

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Estudo e Desenvolvimento de um Sensor Sem
Fio Inteligente para Monitoramento
Distribuído de Poluentes Atmosféricos no
Contexto de Cidades Inteligentes

Mariana Rodrigues Villarim

João Pessoa

2020

Mariana Rodrigues Villarim

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR SEM FIO
INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DISTRIBUÍDO DE
POLUENTES ATMOSFÉRICOS NO CONTEXTO DE CIDADES
INTELIGENTES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal da Paraíba - UFPB como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cleonilson Protásio de Souza

João Pessoa

2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V722e Villarim, Mariana Rodrigues.

Estudo e desenvolvimento de um sensor sem fio inteligente para monitoramento distribuído de poluentes atmosféricos no contexto de cidades inteligentes / Mariana Rodrigues Villarim. - João Pessoa, 2020.
78 f. : il.

Orientação: Cleonilson Protásio de Souza.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia elétrica. 2. Nariz eletrônico. 3. Poluição atmosférica. 4. Qualidade do ar. 5. Rede de sensores sem fio. 6. Material particulado. 7. Cidades inteligentes. I. Souza, Cleonilson Protásio de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR SEM FIO
INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DISTRIBUÍDO DE
POLUENTES ATMOSFÉRICOS NO CONTEXTO DE CIDADES
INTELIGENTES**

Elaborada por:

MARIANA RODRIGUES VILLARIM

Como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Cleonilson Protásio de Souza
Orientador

Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva
Avaliador Interno

Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho
Avaliador Externo

João Pessoa

2020

*“Que não se perturbe o seu rosto, nem seu coração.
Não temas esta doença nem nenhuma outra,
não fiques aflito, não estou eu aqui, que sou sua mãe?
Você não está debaixo da minha sombra e sob o meu cuidado?
Não sou eu a fonte da sua alegria?”
Nossa Senhora de Guadalupe*

RESUMO

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR SEM FIO INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DISTRIBUÍDO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS NO CONTEXTO DE CIDADES INTELIGENTES

A poluição atmosférica está diretamente relacionada à causa e ao agravamento de diversas doenças, além de causar danos ecológicos ao meio ambiente. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que, a cada ano, 4,2 milhões de mortes são atribuídas à poluição atmosférica e 91% da população mundial reside em locais que excedem os limites indicados de qualidade do ar. Neste trabalho foi desenvolvido um sensor sem fio inteligente de poluentes atmosféricos, especificamente de Material Particulado (MP) e de gases, como o Metano (CH_4) e Monóxido de Carbono (CO), a fim de alertar a população e possibilitar o controle de emissões de poluentes. O sensor desenvolvido fará parte de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) distribuída pelas principais avenidas da cidade de João Pessoa-PB, onde será possível identificar rotas, horários e dias de semanas com os maiores índices de poluição. A tecnologia de comunicação sem fio adotada foi a LoRa, a qual foi avaliada em ambientes urbano e florestal. Neste trabalho, foi utilizado o sensor PPD42NS, que usa o método de espalhamento de luz para detecção de partículas, e os sensores da família MQ, que apresentam sensibilidade cruzada e formam um Nariz Eletrônico, capaz de detectar diversos gases com o auxílio de um algoritmo de reconhecimento de padrões. O sensor PPD42NS foi submetido a um processo de calibração a partir do equipamento de referência, HiVol 3000, para correção os seus valores de medição. Além disso, considerando que um dos principais fatores no desenvolvimento de RSSF é o fornecimento limitado de energia para alimentar os nós sensores, este trabalho propõe uma redução no consumo de energia do sensor a partir da substituição de alguns dos seus componentes eletrônicos pelo processamento digital, calibrando a saída a partir da saída digital. Os valores de correlação linear obtidos nos dois experimentos foram superiores a 0,9, indicando uma forte associação entre as variáveis. Com os sensores de gás da família MQ foram realizados experimentos para calibração em ar limpo e, em seguida, foram expostos a substâncias odorantes. Cada sensor reage de forma específica ao detectar odores, tornando possível a etapa de identificação dos gases através de reconhecimento de padrões. Os dados obtidos foram treinados, testados e validados via Rede Neural Artificial (RNA), em que foi possível identificar os diferentes padrões, diferenciando álcool, água e ar, com precisão acima de 98% na saída da rede.

Palavras-chave: Material Particulado, Nariz Eletrônico, Poluição Atmosférica, Qualidade do Ar, Rede de Sensores Sem Fio, Sensores Sem Fio.

ABSTRACT

STUDY AND DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT WIRELESS SENSOR FOR DISTRIBUTED MONITORING OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS IN THE CONTEXT OF SMART CITIES

Air pollution is directly related to the cause and aggravation of various diseases, in addition to causing ecological damage to the environment. According to the World Health Organization (WHO), it is estimated that 4.2 million deaths are attributed to air pollution each year and 91% of the world's population lives in places that exceed indicated air quality limits. In this work, an intelligent wireless sensor for atmospheric pollutants, specifically Particulate Matter (PM) and gases, such as Methane (CH₄) and Carbon Monoxide (CO), was developed in order to alert the population and enable the control of pollutants emissions. The developed sensor will be part of a Wireless Sensor Network (WSN) distributed by the main avenues of the city of João Pessoa-PB, where it will be possible to identify routes, times and days of weeks with the highest pollution rates. The wireless communication technology adopted was LoRa, which was evaluated in urban and forest environments. In this work, the PPD42NS sensor was used, which uses the light scattering method to detect particles, and the MQ family sensors, which present cross sensitivity and form an Electronic Nose, capable of detecting various gases with the support of a pattern recognition algorithm. The PPD42NS sensor was subjected to a calibration process using the reference equipment, HiVol 3000, to correct its measured values. Furthermore, considering that one of the main factors in the development of WSN is the limited supply of energy to power the sensor nodes, this work proposes a reduction in the energy consumption of the sensor by replacing some of its electronic components with digital processing, calibrating the analog output from the digital output. The linear correlation values obtained in the two experiments were greater than 0.9, indicating a strong association between the variables. Experiments were performed with the gas sensors from the MQ family for calibration in clean air and then they were exposed to odorous substances. Each sensor reacts specifically to the detection of odors, making it possible to identify the gases through pattern recognition. The data obtained were trained, tested and validated via Artificial Neural Network (ANN), where it was possible to identify the different patterns, differentiating alcohol, water and air, with an accuracy above 98% at the output.

Keywords: Particulate Matter, Electronic Nose, Atmospheric Pollution, Air Quality, Wireless Sensor Networks, Wireless Sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número de mortes atribuídas à poluição do ar em 2012, por doença, no mundo.	12
Figura 2 – Mapa do número de mortes associadas à poluição atmosférica, de acordo com cada país, em 2012.	13
Figura 3 – Estações de monitoramento distribuídas pelo Brasil.	14
Figura 4 – Estrutura de uma Rede de Sensores Sem Fio.	18
Figura 5 – Comparação de LPWAN com outras tecnologias de comunicação sem fio.	20
Figura 6 – Arquitetura da rede LoRaWAN.	21
Figura 7 – Comparação de tamanho de Material Particulado.	24
Figura 8 – Métodos e instrumentos para medição de concentração de MP.	25
Figura 9 – Impactores utilizados na gravimetria.	26
Figura 10 – Métodos ópticos para medição de Material Particulado.	26
Figura 11 – Comparação das Classes do Método Equivalente Federal da EPA.	29
Figura 12 – Equipamento de coleta HiVol HVS3000.	30
Figura 13 – Funcionamento do amostrador de ar.	31
Figura 14 – Método de espalhamento de luz utilizado no sensor PPD42NS.	32
Figura 15 – Sensor PPD42NS para medição de material particulado.	32
Figura 16 – <i>Low Pulse Occupancy</i> (LPO).	33
Figura 17 – Principais componentes de narizes eletrônicos.	37
Figura 18 – Sensor MQ-4.	38
Figura 19 – Curva característica de sensibilidade do sensor MQ-6.	39
Figura 20 – Esquemático do circuito dos sensores da família MQ.	39
Figura 21 – Esquemático das conexões entre os sensores para medição de MP e gases poluentes.	41
Figura 22 – Sensor portátil para monitoramento de Material Particulado desenvolvido.	43
Figura 23 – Esquemático do experimento para medição de material particulado.	44
Figura 24 – Resultados dos testes de alcance e RSSI em ambiente urbano denso.	45
Figura 25 – Imagem da tela do analisador de espectro nas imediações do ponto 4.	46
Figura 26 – Resultados dos testes de alcance e RSSI em ambiente florestal.	46
Figura 27 – Esquemático do experimento para medição de material particulado.	47
Figura 28 – Etapas de processamento dos dados.	48
Figura 29 – Sensor portátil desenvolvido e HiVol 3000.	48
Figura 30 – Fluxograma do código para medição de Material Particulado a partir do PPD42NS.	49
Figura 31 – Dados de concentração de $MP_{2,5}$ ao longo dos dias de experimento.	50
Figura 32 – Dados de concentração de $MP_{2,5}$ em apenas um dia.	51
Figura 33 – Dados de concentração de $MP_{2,5}$, temperatura e umidade.	51

Figura 34 – Índice de Qualidade do Ar (IQAr) durante os dias de experimento. . .	52
Figura 35 – Curva de calibração do sensor PPD42NS a partir do equipamento HiVol3000.	55
Figura 36 – Circuito do sensor de particulado PPD42NS.	56
Figura 37 – Princípio de detecção de partículas.	57
Figura 38 – Fluxograma do código para substituição dos componentes eletrônicos. .	58
Figura 39 – Esquemático do experimento realizado para calibração do sensor pro- posto eliminando a parte eletrônica.	59
Figura 40 – Curva de concentração de MP2,5, antes da calibração do ponto TP16, durante o experimento a partir da queima de papel.	60
Figura 41 – Curva de calibração da saída analógica TP16 a partir da saída digital.	61
Figura 42 – Curva de concentração de MP2,5, após da calibração do ponto TP16, durante o experimento a partir da queima de papel.	62
Figura 43 – Testes experimentais com os sensores MQ borrifando álcool a cada 20 minutos no ambiente.	64
Figura 44 – Testes experimentais com os sensores MQ borrifando água no ambiente.	65
Figura 45 – Respostas dos sensores MQ em ambiente limpo e com a presença de álcool.	65
Figura 46 – Entradas e saídas da RNA desenvolvida.	66
Figura 47 – Desempenho da Rede Neural Artificial desenvolvida.	67
Figura 48 – Matriz de confusão da RNA desenvolvida.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Número de mortes a partir de doenças associadas à poluição atmosférica no Brasil no período de um ano.	13
Tabela 2	–	Estações ativas e inativas nas unidades federativas que possuem monitoramento de qualidade do ar.	14
Tabela 3	–	Comparação entre o equipamentos de referência e sensores de baixo custo.	29
Tabela 4	–	Métodos para extração de características.	37
Tabela 5	–	Componentes do sensor portátil e suas respectivas funções.	42
Tabela 6	–	Parâmetros utilizados nos testes com a modulação LoRa	44
Tabela 7	–	Consumo de corrente no rádio de acordo com o modo de operação. . .	50
Tabela 8	–	Categorias do Índice de Qualidade do Ar e seus diferentes impactos na saúde.	53
Tabela 9	–	Valores Médios de Concentração de MP nos Equipamentos de Referência e de Baixo Custo	54
Tabela 10	–	Quantidade de papéis queimados em cada etapa do experimento. . . .	60
Tabela 11	–	Coefficiente de correlação para os experimentos.	61
Tabela 12	–	Sensores de gás da família MQ utilizados no projeto.	62
Tabela 13	–	Valores de R_o calibrados em ar limpo para os sensores MQ.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H ₂ S	Gás Sulfídrico
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
LoRa	<i>Long Range</i>
LPO	<i>Low Pulse Occupancy</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Networks</i>
MEF	Método Equivalente Federal
MRF	Método de Referência Federal
MP	Material Particulado
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>
RNA	Rede Neural Artificial
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
ToA	<i>Time on Air</i>

SUMÁRIO

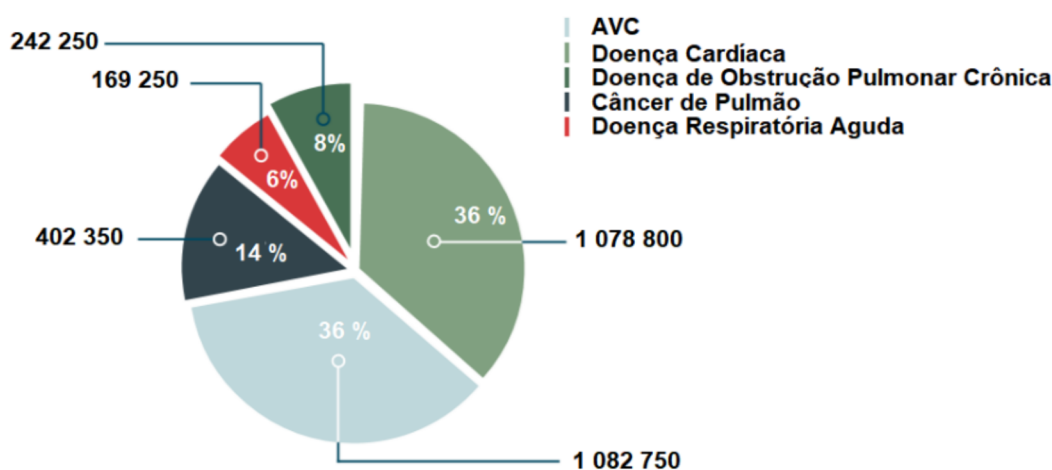
1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	REDE DE SENSORES SEM FIO PARA MONITORAMENTO DISTRIBUÍDO	18
2.1	LPWAN - <i>LOW POWER WIDE AREA NETWORKS</i>	19
2.1.1	Modulação LoRa	20
3	MATERIAL PARTICULADO (MP)	23
3.1	MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO	24
3.1.1	Método Gravimétrico	24
3.1.2	Método Óptico	25
3.1.3	Método Microbalança	27
3.2	LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL PARA MEDIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO	27
3.3	EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA HIVOL 3000 PARA AMOSTRA- GEM DE MATERIAL PARTICULADO NA ATMOSFERA	30
3.4	MEDIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO MP _{2,5} UTILIZANDO O MÉTODO DO ESPALHAMENTO DE LUZ COM O SENSOR SHINYEI PPD42NS	31
4	NARIZ ELETRÔNICO	35
4.1	SENSORES MOS DA FAMÍLIA MQ	38
5	DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR SEM FIO E POR- TÁTIL INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DISTRI- BUÍDO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	41
5.1	ANÁLISE DA COMUNICAÇÃO SEM FIO LORA	43
5.2	DESENVOLVIMENTO DO SENSOR PARA MEDIÇÃO DE CONCEN- TRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO	47
5.2.1	Calibração do Sensor PPD42NS	53
5.2.2	Processo de Redução de Consumo de Energia do Sensor PPD42NS	55
5.3	DESENVOLVIMENTO DO SENSOR PARA MEDIÇÃO DA CONCEN- TRAÇÃO DE GASES POLUENTES	62

5.3.1	Ajuste dos Sensores MQ em Ar Limpo	63
5.3.2	Medição de Substâncias Odorantes e Não Odorantes	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
6.1	PUBLICAÇÕES	70
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um grande problema ambiental e está associada a diversas doenças nos seres humanos, além de causar danos ecológicos ao meio ambiente, animais, solo e água (BOTKIN; KELLER et al., 1998). De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), estima-se que, a cada ano, 4,2 milhões de mortes são atribuídas à poluição atmosférica e 91% da população mundial reside em locais que excedem os limites indicados de qualidade do ar (WHO, 2018). Na Fig. 1 está exposto o número de mortes atribuídas à poluição atmosférica, separados por doença, no mundo.

Figura 1 – Número de mortes atribuídas à poluição do ar em 2012, por doença, no mundo.



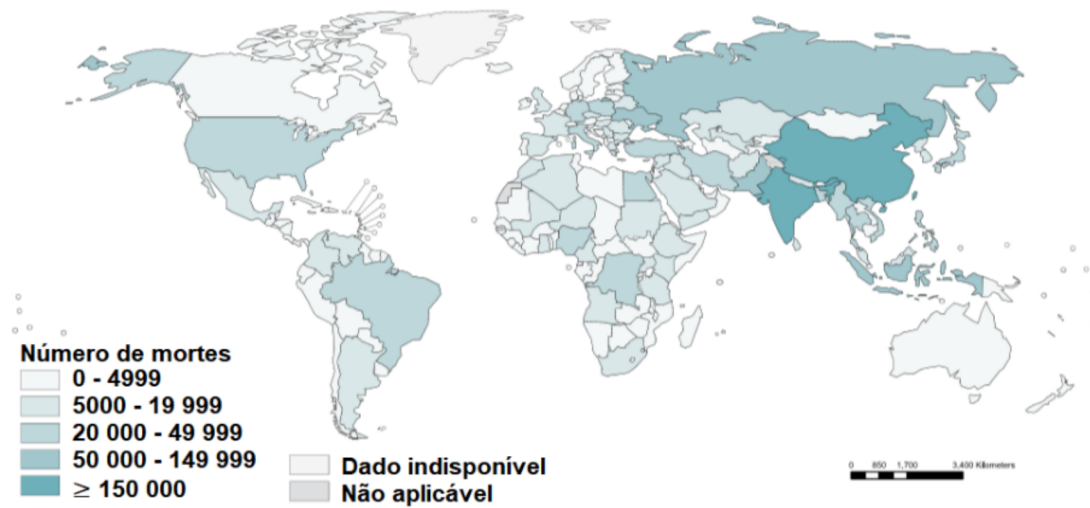
Fonte: (WHO, 2016)

Os poluentes que causam maior preocupação à saúde são Material Particulado (MP), Ozônio (O_3), Dióxido de Nitrogênio (NO_2), Dióxido de Enxofre (SO_2), Chumbo (Pb) e Monóxido de Carbono (CO) (WHO, 2018). As principais fontes de poluentes na atmosfera são os meios de transportes, como carros e caminhões, e as indústrias, principalmente indústrias químicas, metalúrgicas e de papel (MAYER, 1999). As mortes atribuídas à poluição atmosférica, em 2012, distribuídas por países estão ilustradas na Fig. 2. No Brasil, estão resumidas na Tabela 1.

A partir da queima de combustível, uma quantidade significativa de Material Particulado, Hidrocarbonetos e Dióxidos de Nitrogênio e Carbono é gerada. As indústrias, como usinas termelétricas, emitem a maior parte de MP e Óxido de Enxofre na atmosfera, além de quantidades consideráveis de Óxido de Nitrogênio, Óxido de Carbono e Hidrocarbonetos (RAVEN; BERG; HASSENZAHN, 2012).

Estudos em laboratório confirmam evidências epidemiológicas que a função pulmonar é afetada pela poluição do ar, pois a inalação de poluentes, que alcançam as vias aéreas

Figura 2 – Mapa do número de mortes associadas à poluição atmosférica, de acordo com cada país, em 2012.



Fonte: (WHO, 2016)

Tabela 1 – Número de mortes a partir de doenças associadas à poluição atmosférica no Brasil no período de um ano.

Tipo de Doença	Número de Mortes no Brasil em 2012
Infecções respiratórias agudas	108
Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica	317
Câncer de Pulmão	1.757
Doença Cardíaca	7.877
AVC	4.982
Total	15.041

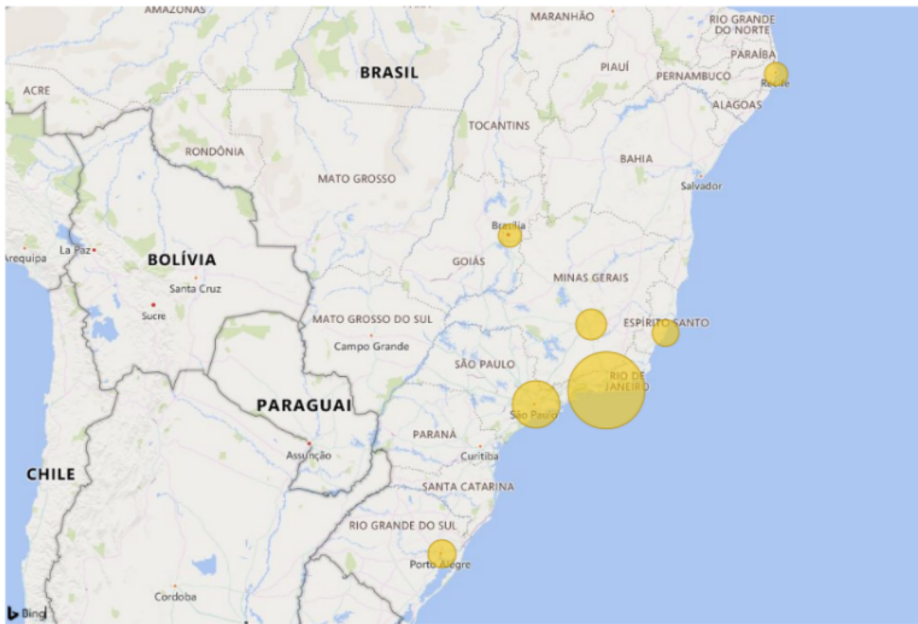
Fonte: (WHO, 2016)

inferiores, causam asma e facilitam reações alérgicas (D'AMATO et al., 2010). O impacto da exposição cumulativa à poluição atmosférica foi estudado por Zhang, Chen e Zhang (2018), que evidenciou o dano causado ao cérebro, afetando as funções cognitivas em testes verbais e matemáticos, afetando principalmente os idosos.

O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) estabelece, de acordo com a Resolução 491-2018, os padrões de qualidade do ar para poluentes atmosféricos, sendo eles Material Particulado (Fumaça, Partículas Totais em Suspensão (PTS), MP_{10} e $MP_{2,5}$), Dióxido de Enxofre (SO_2), Dióxido de Nitrogênio (NO_2), Ozônio (O_3), Monóxido de Carbono (CO) e Chumbo (Pb). Os níveis de concentração dos poluentes são medidos para então ser calculado o Índice de Qualidade do Ar (IQA), descrito mais detalhadamente nos próximos capítulos.

A Resolução também estabelece que, até 2021, os estados devem monitorar e identificar as principais fontes de poluição e poluentes atmosféricos, elaborando relatórios de evolução da qualidade do ar. Atualmente, no Brasil, as estações de monitoramento existentes estão localizadas apenas em seis estados e no Distrito Federal, como ilustrado na Fig. 3.

Figura 3 – Estações de monitoramento distribuídas pelo Brasil.



Fonte: (WRI, 2019)

Não há estações de monitoramento na região Norte, apenas em um estado nas regiões Nordeste e Sul, sendo eles Pernambuco e Rio Grande do Sul, respectivamente, em todos os quatro estados da região Sudeste e no Distrito Fedetal. A quantidade de estações ativas e inativas, separado por unidade federativa, está resumida na Tabela 2.

Tabela 2 – Estações ativas e inativas nas unidades federativas que possuem monitoramento de qualidade do ar.

Unidade Federativa	Nº de Estações Ativas	Nº de Estações Inativas
Distrito Federal	4	0
Espírito Santo	15	2
Minas Gerais	32	0
Pernambuco	4	0
Rio de Janeiro	161	42
Rio Grande do Sul	13	9
São Paulo	90	3

Fonte: (WRI, 2019)

Os principais objetivos das políticas ambientais em desenvolvimento visam o monitoramento da poluição atmosférica, tornando possível identificar locais e horários com maiores índices de emissões e, então, adotar estratégias para reduzir os níveis de poluentes. Porém, quando a área de inspeção não abrange adequadamente a área onde a população se localiza, o sistema fornece dados que não representam o quanto a população está exposta à poluição do ar (BREUER; BOWER, 1999).

Técnicas de monitoramento são necessárias para avaliar a poluição atmosférica e a perturbação no meio ambiente e na saúde humana, coletando dados ambientais. Soluções em Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) são importantes por tornar possível o desenvolvimento de um sistema capaz de monitorar e compartilhar informações em tempo real sobre variáveis de interesse (MALCHE; MAHESHWARY; KUMAR, 2019), como por exemplo índices de qualidade do ar, concentração de material particulado e gases de efeito estufa.

O mapeamento sistemático da literatura realizado por Saini, Dutta e Marques (2020) expõe o estado da arte, de 2015 a 2020, de soluções em IoT para sistemas de monitoramento da qualidade do ar e conclui que a maior limitação no desenvolvimento dos sistemas para medição em tempo real é a calibração dos sensores.

As novas plataformas para avaliação da poluição atmosférica constituídas de sensores de baixo custo devem ter a qualidade dos dados avaliada de acordo com as aplicações e a necessidade de alta ou baixa precisão. Apesar de sensores de baixo custo apresentarem baixa precisão para determinadas aplicações, eles podem ser considerados adequados para fornecer informações sobre os níveis de poluição ambiental (CASTELL et al., 2017).

Em Bhattacharya, Sridevi e Pitchiah (2012) é proposta uma solução para medição de variáveis ambientais como temperatura e umidade, além de poluentes atmosféricos e material particulado, a partir de sensores de baixo custo e pequeno porte. Os dados são amostrados a cada 1 minuto, porém a calibração não foi realizada nos sensores para verificar a qualidade das medições.

Arroyo et al. (2019) elaborou um nó sensor de baixo custo visando a aplicação em Rede de Sensores Sem Fio para monitoramento de compostos orgânicos voláteis utilizando a comunicação sem fio ZigBee entre os dispositivos para envio dos dados adquiridos. O estudo citado afirma que, com uma quantidade adequada de sensores, a qualidade do ar pode ser avaliada em diversas áreas por equipamentos de baixo custo e baixo consumo.

O desenvolvimento deste trabalho foca em uma solução para a falta de estações de monitoramento da qualidade do ar na cidade de João Pessoa/Paraíba pois, como não há nenhuma estação no estado, não são fornecidos dados de poluição ambiental para a população. Com a utilização de sensores de baixo custo, é possível desenvolver um nó sensor sem fio e portátil para monitoramento de poluentes atmosféricos para aplicação em

idades inteligentes. Os nós sensores poderão ser distribuídos pela cidade, fornecendo alta resolução espacial e gerando o efeito denominado neste trabalho de "Efeito Waze", ou seja, o rastreamento de zonas com altas e baixas emissões para auxiliar no gerenciamento dos impactos ambientais.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão descritos os objetivos gerais e específicos do trabalho de dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é o estudo e desenvolvimento de um sensor sem fio inteligente para monitoramento distribuído de dados ambientais, como temperatura e umidade, e medição de material particulado e gases poluentes na atmosfera.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Avaliar o comportamento da tecnologia de comunicação sem fio LoRa, em ambiente urbano, para aplicação em uma Rede de Sensores Sem Fio visando o monitoramento distribuído da qualidade do ar;
- Avaliar e caracterizar o sensor comercial PPD42NS, fabricado pela Shinyei, para medição de Material Particulado;
- Realizar a calibração do sensor PPD42NS através do equipamento de referência Ecotech HiVol 3000;
- Reduzir o consumo de energia do sensor PPD42NS substituindo os seus componentes eletrônicos pelo processamento digital;
- Avaliar e caracterizar sensores comerciais da família MQ, fabricados pela Hanwei Electronics, para detecção de gases poluentes;
- Desenvolver uma Rede Neural Artificial como algoritmo de reconhecimento de padrões para identificação dos gases e cálculo de suas respectivas concentrações;
- Construir um protótipo de nó sensor caracterizado por ser de baixo consumo e portátil, utilizando a tecnologia de rádio LoRa.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em seis capítulos, sendo eles:

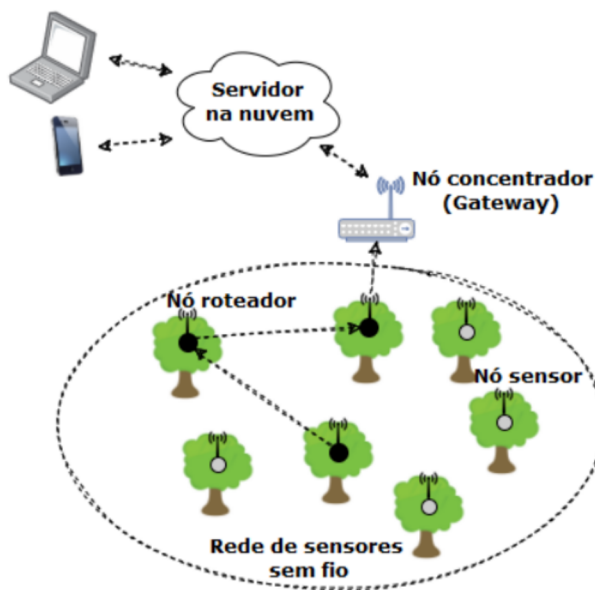
- Capítulo 1: Disserta-se sobre como a poluição atmosférica afeta a população e o meio ambiente, os principais poluentes e a necessidade de monitoramento da qualidade do ar;
- Capítulo 2: São apresentadas as Redes de Sensores Sem Fio e suas tecnologias de comunicação sem fio, focando na modulação LoRa - seus principais componentes e parâmetros de configuração, com o objetivo de monitoramento distribuído da qualidade do ar.
- Capítulo 3: São apresentados os principais métodos de medição de material particulado e explica-se como ocorre a detecção por espalhamento de luz no sensor de baixo custo PPD42NS;
- Capítulo 4: São expostos os principais componentes do nariz eletrônico e como ele pode ser utilizado para medição de gases poluentes com o auxílio de algoritmos de reconhecimento de padrões;
- Capítulo 5: As etapas de desenvolvimento do sensor para medição de material particulado e de gases nocivos são expostas, incluindo testes para analisar o comportamento da tecnologia de comunicação sem fio LoRa;
- Capítulo 6: São feitas conclusões do trabalho de acordo com o levantamento bibliográfico e dos resultados a partir dos experimentos, além de expostas as publicações realizadas pela autora.

2 REDE DE SENSORES SEM FIO PARA MONITORAMENTO DISTRIBUÍDO

O ar pode conter uma combinação complexa de poluentes, que depende das condições atmosféricas e das fontes de emissões. A exposição a curto e longo prazo pode causar, principalmente, doenças cardíacas, pulmonares e infecções respiratórias (DOMINICI et al., 2010) (POPE et al., 2004). Técnicas de monitoramento são necessárias para avaliar a qualidade do ar, verificando a concentração de poluentes no ambiente e fornecendo informações em tempo real, contribuindo para a avaliação de risco e proteção da população.

O sensor desenvolvido fará parte de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) que será distribuída pelas principais avenidas da cidade de João Pessoa/Paraíba para monitoramento da qualidade do ar, onde será possível identificar rotas, horários e dias de semanas com os maiores índices de poluição atmosférica. Uma Rede de Sensores Sem Fio é constituída por nós sensores, *gateways* e roteadores, como ilustrado na Fig. 4, distribuídos em um ambiente e utilizados para monitorar determinadas variáveis de interesse, como por exemplo, temperatura, pressão, umidade, vibração, concentração de elementos químicos, gases, dentre outras (PATEL; KUMAR, 2018).

Figura 4 – Estrutura de uma Rede de Sensores Sem Fio.



Fonte: (MEDEIROS et al., 2020) - Modificado pela autora.

Os nós sensores são dispositivos eletrônicos com capacidade de medição e transmissão dos parâmetros de interesse, com possibilidade de processamento e armazenamento desses dados. Os dados coletados nos nós sensores são enviados a um nó concentrador,

que após manipular os valores recebidos, executam tarefas de gerenciamento e controle pré-determinadas (TRIPATHI et al., 2018).

As RSSF podem ter diferentes aplicações em diversas áreas, dentre elas, no monitoramento ambiental para detecção de incêndio em florestas ou monitoramento de poluição de grandes cidades (SOUZA et al., 2016), na área de prevenção de falhas, como em detecção de vazamentos em dutos de redes de abastecimento (ENACHE et al., 2018), e em diversas áreas da automação residencial ou industrial (LEE et al., 2019).

Algumas das principais características no desenvolvimento de RSSF são o baixo custo de implementação, a eficiência energética e o alcance de comunicação da rede (SINGH et al., 2018). Considerando isso, a tecnologia de comunicação sem fio escolhida é de fundamental importância e a estrutura denominada LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*), que representa redes de baixo consumo e longo alcance, está sendo foco de interesse de diversos estudos na área de RSSF. Alguns dos principais exemplos de tecnologias de comunicação utilizadas na implementação de redes LPWAN são LoRa, NB-IoT e Sigfox (OLATINWO; JOUBERT, 2019).

2.1 LPWAN - LOW POWER WIDE AREA NETWORKS

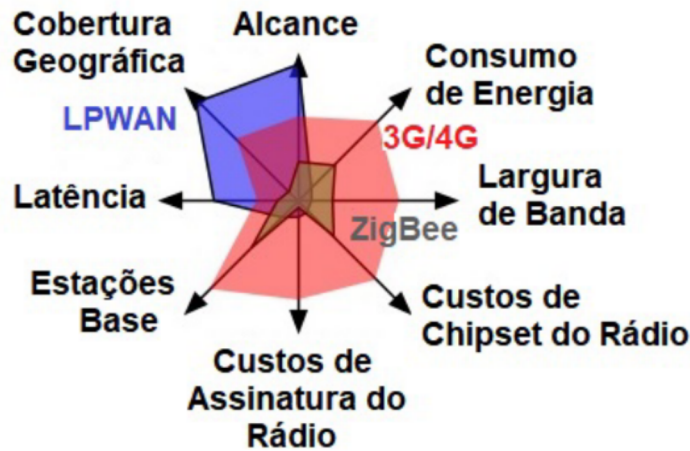
As principais tecnologias de comunicação utilizadas em RSSFs são classificadas como de curto alcance (ZigBee, WiFi, Bluetooth), que apresentam um baixo consumo de energia e curto alcance de transmissão, comunicações celulares (3G, 4G, 5G), que apresentam um alto consumo de energia, médio alcance de transmissão e alta taxa de transmissão de dados, e LPWAN (MEKKI et al., 2019). A categoria denominada de LPWAN satisfaz às necessidades de baixo consumo de energia e longo alcance das redes de sensores sem fio, em ordem de quilômetros (ADELANTADO et al., 2017). Devido a tais característica, pode ser amplamente aplicada em *smart cities*, *smart agriculture*, etc.

Uma comparação visual entre LPWANs, redes de curto alcance (ZigBee) e redes celulares (3G/4G) está ilustrada na Fig. 5, levando em consideração características como largura de banda, alcance, latência, entre outros. A grande limitação em LPWAN está relacionada a largura de banda, que implica em uma pequena taxa de transferência de dados, mas pode ser considerada adequada para determinadas aplicações IoT, como monitoramento de temperatura em florestas e nível de qualidade do ar em ambiente urbano.

Alguns dos principais exemplos das tecnologias denominadas LPWAN são Sigfox, NB-IoT e LoRa. A rede Sigfox foi a primeira tecnologia proposta para aplicações na indústria de IoT, porém sua documentação de camada de rede não está disponível por se tratar de um segredo industrial (CENTENARO et al., 2016). Já a rede NB-IoT (*Narrow Band IoT*) é operada por empresas de telecomunicações e é uma extensão da infraestrutura

de redes celulares 4G (TADAYONI; HENTEN; FALCH, 2017). Essas são características relevantes, pois dificultam a utilização dessas tecnologias em estudos acadêmicos sobre a rede e simulação ou reprodução de resultados.

Figura 5 – Comparação de LPWAN com outras tecnologias de comunicação sem fio.



Fonte: (HERNANDEZ et al., 2017) - Modificado pela autora.

Neste capítulo, foi analisado o comportamento da tecnologia sem fio LoRa, escolhida para comunicação entre o nó sensor e o receptor devido à sua robustez e seu amplo alcance.

2.1.1 Modulação LoRa

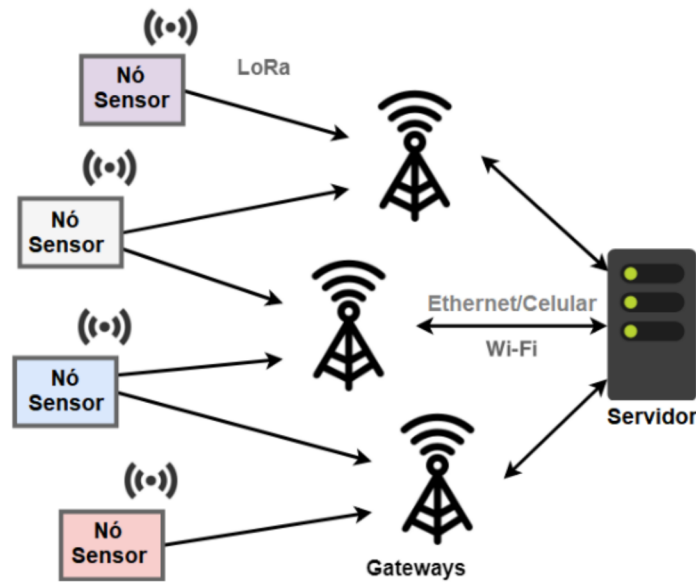
A tecnologia LoRa (*Long Range* - Amplo Alcance) é uma das principais soluções na área de LPWAN por apresentar características físicas promissoras tal como sua robustez à obstáculos, não necessitando determinadamente de uma linha de visada direta entre os dispositivos da rede, sendo adequada para aplicações tanto em áreas urbanas quanto rurais. Em áreas urbanas, uma rede LoRa alcança transmissões na ordem de 15 km (OLATINWO; JOUBERT, 2019).

O desenvolvimento de RSSF utilizando a modulação LoRa pode ser observado em diversas pesquisas, como no monitoramento de temperatura, umidade, incidência luminosa e concentração de diversos gases, como gás carbônico e ozônio ao longo do perímetro de uma cidade (TZORTZAKIS; PAPAFOOTIS; SOTIRIADIS, 2017) ou no monitoramento de condições meteorológicas por sensores e câmeras e envio desses dados a uma central de controle (GARCÍA et al., 2019).

LoRaWAN define o protocolo de comunicação e arquitetura da própria rede (ALLIANCE, 2015). LoRaWAN utiliza topologia estrela e permite que os nós sensores se comuniquem com qualquer *gateway* em seu alcance, mas não podem se comunicar entre si, como pode ser observado na Fig. 6. Um único *gateway* consegue abranger uma área

de diversos quilômetros quadrados. LoRa, por sua vez, é a camada física utilizada para criar um elo de comunicação de amplo alcance, desenvolvida pela Semtech, baseada na modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS) (NOREEN; BOUNCEUR; CLAVIER, 2017) modificada e utiliza as bandas de frequência não licenciadas.

Figura 6 – Arquitetura da rede LoRaWAN.



Fonte: da autora.

CSS é uma técnica de modulação que utiliza chirps (*Compressed High Intensity Radar Pulse*), ou seja, sinais senoidais com amplitude constante que aumentam ou diminuem linearmente sua frequência para modular a mensagem (SPRINGER et al., 2000). Os chirps, que tornam a modulação LoRa robusta, podem ser classificados de duas formas: os *up-chirps*, nos quais a frequência aumenta de uma frequência menor para uma maior, e os *down-chirps*, em que a frequência diminui de uma frequência maior para uma menor. Esses dois tipos de chirp são responsáveis por codificar o pacote de mensagem LoRa.

A modulação LoRa possui três parâmetros principais, os quais são definidos pelo usuário de acordo com a sua necessidade de projeto para alcance, taxa de envio de dados e potência consumida. Os parâmetros são:

- **Largura de Banda (BW - *Bandwidth*):** A largura de banda está relacionada com a faixa de frequência que o sinal irá ocupar no canal. Deve-se atentar para a regulamentação local fornecida pela Anatel para a ocupação permitida da largura de banda nas faixas de frequência disponíveis. A modulação LoRa utiliza a banda ISM (*Instrumentation, Scientific and Medical*) não-licenciada. As larguras de banda recomendadas pela Semtech são 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. Ao dobrar o valor de BW, é possível

transmitir mais dados, reduzindo assim o tempo de transmissão e se tornando mais susceptível a erros (AUGUSTIN et al., 2016);

- Taxa de Código (CR - *Code Rate*): O *Code Rate* (CR) está relacionado com o número de bits redundantes utilizados para a detecção de erros e possível correção do pacote recebido. O *Code Rate* pode assumir os valores 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8. O valor 4/5 define que a cada 4 bits de informação, haverá um bit de correção de erros. De maneira similar, quando CR for igual a 4/8, a cada 4 bits de informação haverá 4 bits redundantes (TSAKALIDES et al., 2018);
- Fator de Espalhamento (SF - *Spreading Factor*): O valor do fator de espalhamento SF está relacionado ao número de bits enviados em cada símbolo e pode assumir valores de 7 a 12. Portanto, quando SF for igual a 7, significa que cada símbolo LoRa representa 7 bits. Para 7 bits são necessárias 2^{SF} posições de frequência (AUGUSTIN et al., 2016). Cada incremento no valor do SF, dobra o tempo de duração de envio do pacote de dados (ou seja, o ToA - *Time on Air*), pois decrementa a taxa de bits, ou seja, SF7 possui a menor latência e SF12 a maior. Sendo assim, SF12 é menos susceptível a erros e incrementa o valor SNR (*Signal Noise Ratio*) porque possui o mais longo ToA (HAXHIBEQIRI et al., 2017).

Em Sanchez-Iborra et al. (2018) é avaliado o comportamento da modulação LoRa nos cenários urbano, suburbano e rural, visando analisar a influência do ambiente na transmissão sem fio. Nos cenários urbano e suburbano, que apresentam adversidades como altos edifícios e construções, a maior distância alcançada de transmissão foi 6 km. Por outro lado, no ambiente rural, onde o ambiente é mais desocupado e aberto, a distância foi de 18 km. Portanto, conclui-se que as condições de propagação afetam a robustez da transmissão, então deve-se atentar a configuração apropriada para alcançar longas distâncias.

O estudo realizado por Iova et al. (2017) avalia como os ambientes montanhosos e florestais podem influenciar o comportamento da modulação LoRa, considerando também a altura e ganho da antena. O teste foi realizado em ambos os ambientes a uma distância fixa de 100 m entre o receptor e transmissor, e os resultados mostram que a escolha da antena apresenta uma grande influência na transmissão e que, mesmo em ambientes sem linha de visada direta e com densa vegetação, a taxa de pacotes recebidos foi alta, não afetando a transmissão.

As vantagens apresentadas pelo monitoramento a partir de uma RSSF composta por sensores ambientais incluem o monitoramento remoto em tempo real, o baixo custo e a portabilidade dos dispositivos. Os testes realizados nesta dissertação de mestrado em ambientes urbano e florestal pretendem analisar o desempenho da modulação LoRa. Algumas das métricas observadas para análise foram alcance de transmissão, taxa de pacotes

recebidos (PDR - *Packet Delivery Ratio*) e RSSI (*Received Signal Strength Indication*), que indica a qualidade com que o sinal está sendo recebido no receptor.

3 MATERIAL PARTICULADO (MP)

Material Particulado (MP) é formado por partículas sólidas e líquidas de diversas origens, como combustão centradas em carbono e inorgânicos secundários, e está relacionado a diversos problemas de saúde respiratórios e cardiovasculares (SCHWARZE et al., 2006).

Além de apresentar problemas à saúde, o MP também prejudica o meio ambiente. Em Rai (2016), é elaborado um estudo sobre os impactos da poluição por Material Particulado em vegetações no período de 1960 a 2016, analisando parâmetros morfológicos, como número de folhas e crescimento, e bioquímicos, como pH. O MP, ao se depositar na vegetação, inibe a atividade fotossintética e modifica as propriedades da planta. Ao se acumular no solo, dificulta a troca de nutrientes e a decomposição.

O MP é classificado de acordo com o diâmetro das partículas em suspensão na atmosfera e de acordo com a sua forma de geração. Partículas formadas a partir de combustão e diretamente emitidas ao ambiente são classificadas como primárias. Por outro lado, as partículas secundárias surgem a partir de reações químicas na atmosfera (ALMEIDA, 1999).

De acordo com a Resolução 491/2018 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o MP pode ser classificado em três categorias de acordo com o diâmetro:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS): Apresentam diâmetro aerodinâmico menor ou igual a $50\ \mu\text{m}$;
- Partículas Inaláveis (MP_{10}): Apresentam diâmetro inferior a $10\ \mu\text{m}$ e, quando inalados, podem passar pelas vias aéreas superiores;
- Partículas Inaláveis Finas ($\text{MP}_{2,5}$): Apresentam o diâmetro inferior a $2,5\ \mu\text{m}$, podem passar pelas vias aéreas inferiores e se depositam nos pulmões. Partículas $\text{MP}_{2,5}$ causam os maiores riscos à saúde.

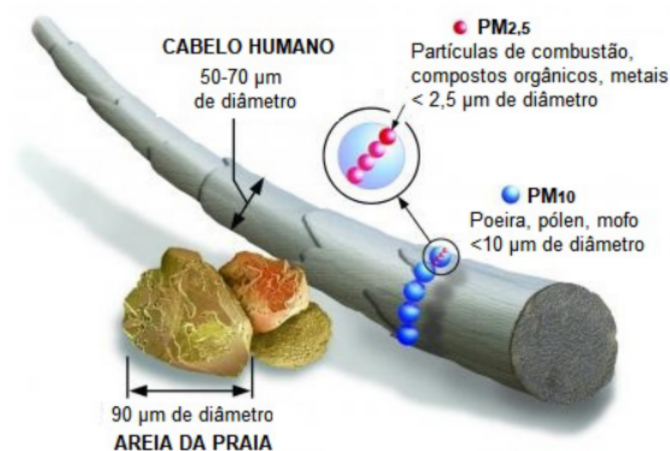
Na Fig. 7 é possível observar a relação entre o tamanho de um fio de cabelo e partículas MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$.

O CONAMA e EPA (*Environmental Protection Agency* - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) definem, para a média de concentração de $\text{MP}_{2,5}$, o período de referência de 24 horas como base de avaliação de risco para MP. Se a concentração média neste período for maior que $125\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, é decretado nível de atenção, acima de $210\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, nível de alerta e, superior a $250\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, nível de emergência.

Novas alternativas de monitoramento ambiental surgem com o desenvolvimento e avanço de sistemas embarcados e sensores de baixo custo. Existem diversos sensores comerciais para medição de material particulado. Entretanto, a leitura de tais sensores

deve ser validada de acordo com estações de monitoramento regulamentadas para verificar a qualidade dos dados.

Figura 7 – Comparação de tamanho de Material Particulado.



Fonte: (EPA, 2020)

3.1 MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

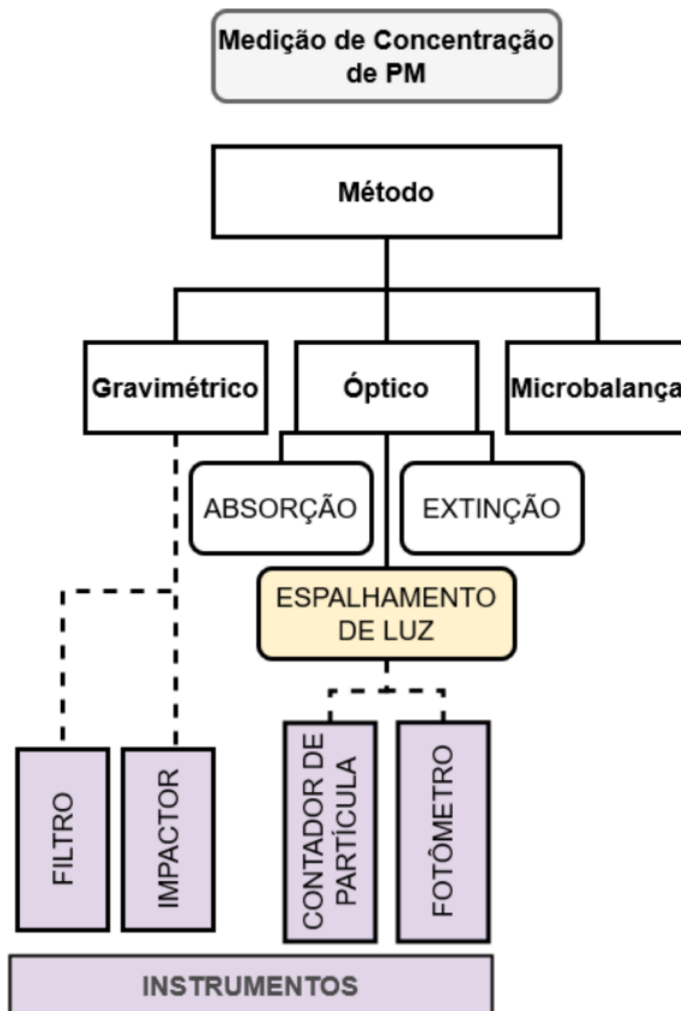
As medições de concentração de MP são necessárias para observar os limites de emissão e os padrões de qualidade do ar. Geralmente, os instrumentos de medição de MP são baseados nos métodos gravimétrico, óptico ou microbalança (AMARAL et al., 2015). Tais métodos estão resumidos na Fig. 8 e são explicados a seguir.

3.1.1 Método Gravimétrico

O valor da concentração de material particulado, expresso em $\mu g/m^3$, pode ser determinado através do método gravimétrico, que consiste em um método analítico quantitativo baseado na diferença entre o valor final e inicial da massa de partículas coletadas em um filtro em um período de amostragem pré-definido (VINCENT, 2007).

O método gravimétrico consiste em uma amostragem em filtros de quartzo ou fibra de vidro. As partículas são captadas pelo filtro e, para remover as partículas com diâmetros superiores ao que está sendo analisado, o equipamento deve possuir impactores e bicos de aceleração (ciclones). Os bicos de aceleração conseguem, a partir da rotação do ar em seu interior, separar partículas com o ponto de corte de interesse da análise, podendo ser, por exemplo, 10 μm ou 2,5 μm (NUSSBAUMER et al., 2008). Impactores são instrumentos de coleta onde as partículas, carregadas pelo ar, são capturadas por uma superfície de coleta interna ao instrumento, por se desviarem do fluxo do ar (HERING, 1995), como ilustrado pela Fig. 9.

Figura 8 – Métodos e instrumentos para medição de concentração de MP.



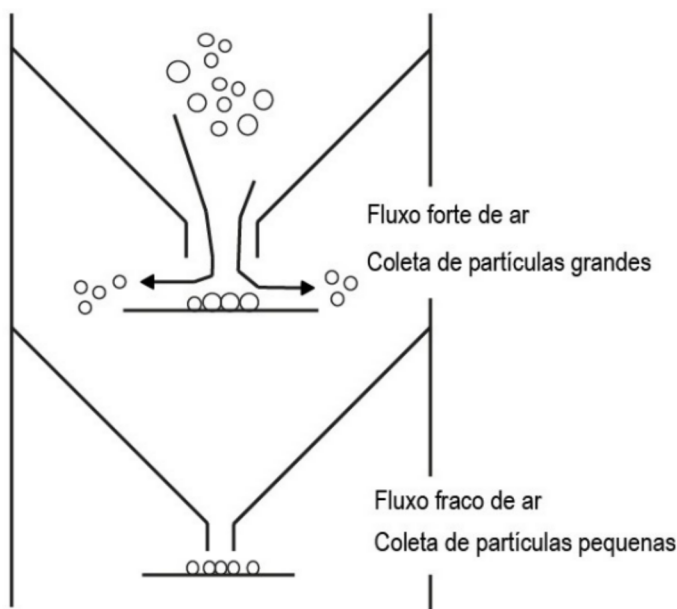
Fonte: (AMARAL et al., 2015) - Modificado pela autora.

É necessário realizar a separação do poluente para, após a pesagem do filtro ao fim do período de amostragem, obter a diferença de massa inicial e final. Os filtros, geralmente, são usados em condições específicas de umidade e temperatura.

3.1.2 Método Óptico

Existem três tipos de métodos ópticos para medição de concentração de MP a partir do comportamento da luz nas partículas: o espalhamento, a absorção e a extinção de luz. No espalhamento de luz, a luz incide nas partículas dispersando-a em várias direções. A medição da incidência de luz é realizada através de equipamentos como o fotômetro, por exemplo. A técnica de espalhamento será explicada mais detalhadamente na Seção 3.3, pois é a utilizada pelo sensor escolhido para o projeto.

Figura 9 – Impactores utilizados na gravimetria.

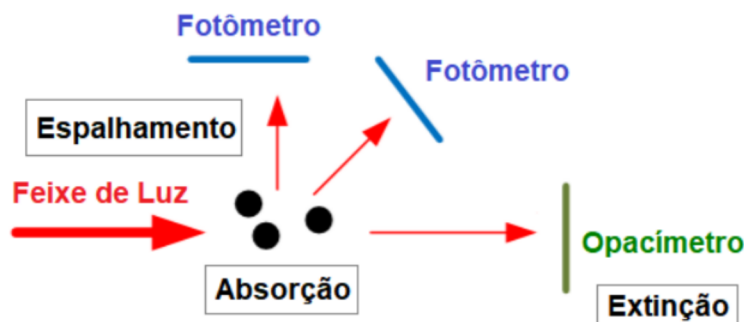


Fonte: (HERING, 1995) - Modificado pela autora.

Na absorção, parte da luz que incide nas partículas é absorvida e pode se transformar em outra forma de energia, como calor. A medição de concentração a partir da absorção de luz pode ser medida através do aquecimento das partículas ou da atenuação da luz em filtros (GIECHASKIEL et al., 2014).

Por fim, a extinção de luz (opacidade) é obtida a partir da diferença entre a luz incidente e a transmitida. Neste método, mede-se a luz emitida em um determinado caminho e a concentração é calculada a partir da fração da luz que não incide no receptor (AMARAL et al., 2015). O equipamento utilizado neste método é o opacímetro. Os três métodos ópticos para medição de material particulado estão expostos de forma simplificada na Fig. 10.

Figura 10 – Métodos ópticos para medição de Material Particulado.



Fonte: (GIECHASKIEL et al., 2014) - Modificado pela autora.

3.1.3 Método Microbalança

No método microbalança, as partículas se depositam na superfície de um equipamento oscilante e, a partir da mudança na frequência de ressonância, é determinado o valor de concentração de MP. Entretanto, sua aplicação apresenta problemas com relação à umidade e oscilação de partículas (GIECHASKIEL et al., 2014).

A seguir é descrita a legislação internacional para monitoramento de MP, de acordo com regulamentações fornecidas pela EPA.

3.2 LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL PARA MEDIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

A EPA define métodos e instrumentos de referência para estações de monitoramento de seis poluentes atmosféricos: Monóxido de Carbono (CO), Chumbo (Pb), Dióxido de Enxofre (SO₂), Ozônio (O₃), Dióxido de Nitrogênio (NO₂) e Material Particulado (MP). Além dos métodos de referência, são especificados métodos alternativos de medição, chamados de equivalentes.

O Método de Referência Federal (MRF) e os Métodos Equivalentes Federais (MEF) seguem normas rigorosas para precisão e confiabilidade das medições para garantir a qualidade dos dados (EPA, 2011). Os métodos equivalentes são classificados em três classes, de acordo com o grau de semelhança com o MRF. Os MEF devem atender a requisitos de instalação, coleta, calibração e manutenção para serem reconhecidos pela EPA, por isso devem passar por testes para validação (NOBLE et al., 2001).

Para a amostragem e análise de material particulado, o MRF, da EPA, consiste em um amostrador que utiliza o método gravimétrico durante um período de amostragem de 24 horas, em concordância com o NAAQS (*National Ambient Air Quality Standards*), que são os padrões de qualidade do ar, definidos pelo Governo Americano, para poluentes considerados prejudiciais ao meio ambiente e aos seus habitantes.

No MRF para MP, o ar deve ser aspirado para dentro do equipamento a uma vazão constante, para, em seguida, passar por etapas de separação de partículas através de impactores. Por fim, as partículas são depositadas em um filtro para então ser realizada a pesagem e cálculo do ganho de massa (NOBLE et al., 2001).

O MRF é chamado de manual, pois mesmo que alguma etapa da amostragem de material seja realizada a partir de um equipamento automatizado, a troca e pesagem dos filtros deve ser feita manualmente¹. Para definir o valor de concentração de MP_{2,5}, deve

¹ O manuseio manual foi constatado *in loco* nesta pesquisa quando medições foram realizadas no prédio da SUDEMA, na cidade de João Pessoa/PB. O equipamento utilizado (descrito na Seção 2.2.1), mesmo sendo automatizado, requer intervenção manual periodicamente (ao fim de 24 horas).

ser calculada a razão entre a massa total de partículas no filtro e o volume total de ar no período de amostragem, determinado a partir das variáveis de vazão e temperatura.

De acordo com o Código de Regulamentação Federal, Parte 50 (40 CRF 50), os Métodos Equivalentes apresentam modificações quando comparados ao de referência e podem ser divididos em três classes, de acordo com o grau de semelhança com o MRF.

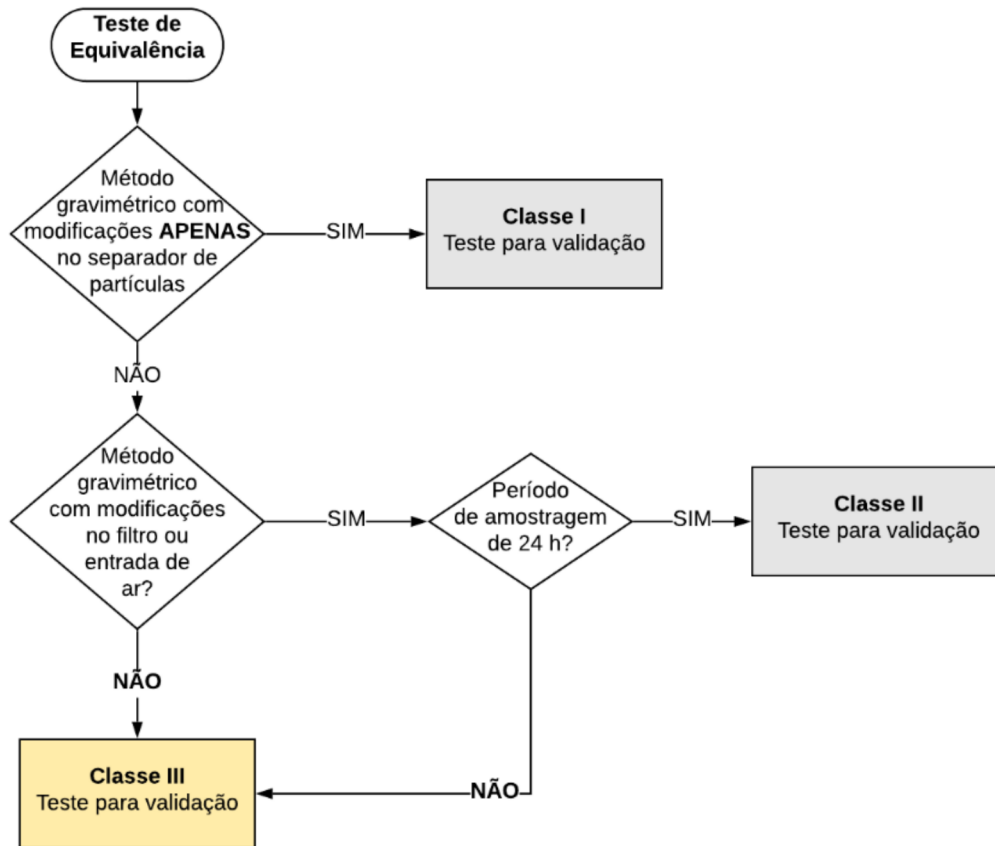
- Classe I: Método manual, apresenta apenas algumas pequenas modificações, geralmente no mecanismo de separação de partículas, quando comparado ao método de referência. Por exemplo, pode ser substituído os impactores por bicos de aceleração.
- Classe II: Método manual, altera a configuração e o desempenho do equipamento de referência. Além de apresentar as modificações da Classe I, apresenta também pequenas modificações em algumas partes do amostrador, como na entrada de ar ou filtro.
- Classe III: Método automatizado, realiza amostragem dos dados de forma contínua, em intervalos de tempo inferiores a 24 horas, como minutos ou segundos. Ou seja, utiliza outros métodos, diferente do gravimétrico, para estimar a concentração de MP.

A Classe I indica equipamentos com uma forte semelhança e a Classe III representa equipamentos com o menor grau de semelhança quando comparados aos de referência. Na Fig. 11 é possível observar como classificar os métodos alternativos de acordo com as modificações aplicadas ao Método de Referência Federal da EPA.

A comparação entre os equipamentos que utilizam o método de referência e sensores de baixo custo está listada na Tabela 3. O baixo custo e a portabilidade dos sensores permitem a distribuição espacial dos dispositivos e a medição da qualidade do ar em diversos locais, pois os MRF representam equipamentos de grande porte e, em consequência, sua portabilidade, manuseio e necessidade de substituição diária dos filtros dificultam sua instalação em ambientes de difícil acesso.

Um exemplo de equipamento equivalente da Classe III, reconhecido pela EPA, para monitoramento de $MP_{2,5}$ é o GRIMM modelo EDM180. Este equipamento utiliza o método de espalhamento de luz para monitorar a concentração de material particulado, em intervalos de, no mínimo, 6 segundos (GRIMM, 2019).

Figura 11 – Comparação das Classes do Método Equivalente Federal da EPA.



Fonte: (NOBLE et al., 2001) - Modificado pela autora.

Tabela 3 – Comparação entre o equipamentos de referência e sensores de baixo custo.

	Equipamentos de Referência	Sensores de Baixo Custo
Faixa de Preço	15.000 a 50.000 dólares	10 a 2.500 dólares
Custo de Operação	Alto	Baixo
Portabilidade dos Equipamentos	Fixa	Móvel
Qualidade dos Dados	Qualidade elevada e consistente em várias condições climáticas	Qualidade desconhecida e pode variar em diferentes condições climáticas

Fonte: (EPA, 2011)

Os equipamentos de referência e equivalentes possuem uma qualidade de dados consistente e conhecida devido aos diversos testes que devem ser realizados em variadas condições climáticas para a aprovação da EPA. Portanto, é necessário executar a calibração

dos sensores de baixo custo a partir desses equipamentos para analisar se as medições são coerentes e realizar as devidas correções nos dados.

3.3 EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA HIVOL 3000 PARA AMOSTRAGEM DE MATERIAL PARTICULADO NA ATMOSFERA

O equipamento de coleta HiVol HVS3000, desenvolvido pela Ecotech, aprovado pela EPA como Método de Referência Federal, foi utilizado para realizar a calibração do sensor portátil de MP escolhido para este trabalho e pode ser visto na Fig. 12. O HiVol 3000 possibilita a aquisição de amostras de $MP_{2,5}$, MP_{10} ou PTS, dependendo do separador de partículas escolhido (ECOTECH, 2013).

Figura 12 – Equipamento de coleta HiVol HVS3000.

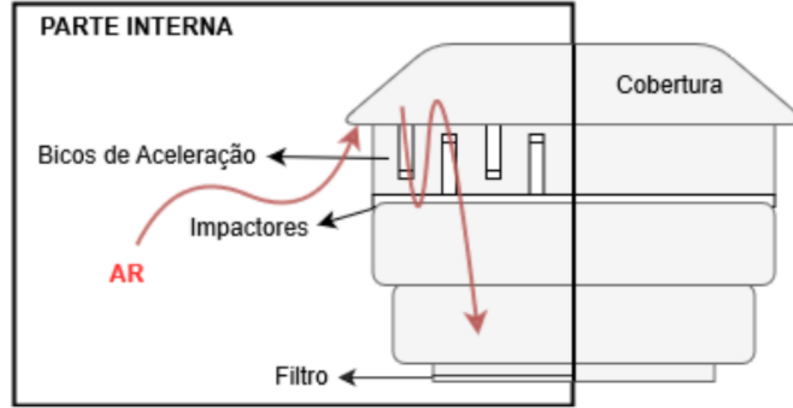


Fonte: (ECOTECH, 2013)

Na primeira etapa do processo de amostragem do HiVol 3000, o fluxo de ar é mantido constante a partir de bicos de aceleração, conforme mostrado na Fig. 13. As partículas com maior quantidade de massa ganham um impulso maior e são presas na chapa de impacto, que possui uma superfície com graxa, auxiliando a aderência. Após essa primeira parte, restam as partículas menores que são arrastadas para a segunda etapa, que consiste em um filtro de material poroso o qual irá coletar as partículas (ECOTECH, 2013).

Um diagrama esquemático do amostrador de ar de grandes volumes pode ser observado na Fig. 13.

Figura 13 – Funcionamento do amostrador de ar.



Fonte: (QUEENSLAND GOVERNMENT, 2020) - Modificado pela autora.

Conforme visto na Fig. 13, as partículas se depositam no filtro após o período determinado de amostragem, e então o filtro é novamente pesado para ser calculada a concentração de massa do material particulado depositado, como determinado pela Equação 3.1.

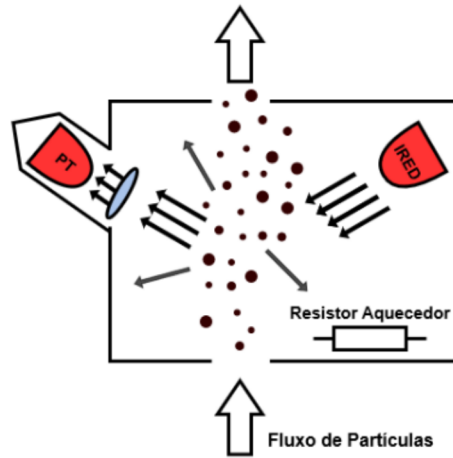
$$MP = \frac{(P_f - P_i) \cdot 10^6}{vol} \quad (3.1)$$

em que MP representa a concentração do material particulado ($\mu g/m^3$), P_f e P_i , a massa final e inicial, respectivamente, 10^6 a conversão de grama para micrograma e vol , o volume total de ar amostrado (m^3), corrigido para as condições padrão e determinado a partir do fluxo medido e do período de amostragem. A partir desta medida, a concentração do material particulado é calculada como a massa de partículas coletada dividido pelo volume de ar obtido no período de amostragem (EPA, 1999).

3.4 MEDIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO $MP_{2,5}$ UTILIZANDO O MÉTODO DO ESPALHAMENTO DE LUZ COM O SENSOR SHINYEI PPD42NS

O sensor desenvolvido pela Shinyei, modelo PPD42NS, utilizado neste trabalho, baseia-se no método de espalhamento de luz para detecção de material particulado (JIAO et al., 2016). O método consiste em dois elementos principais: um led infravermelho e um fototransistor, como pode ser visto na Fig. 14. O LED (IRED) emite luz infravermelha com comprimento de onda igual a 940 nm e, quando atinge as partículas, essas irão refratar, ou seja, espalhar parte da luz incidente, a qual será captada pelo fototransistor (PT), gerando um determinado nível de tensão, diretamente proporcional ao valor de concentração de partículas (WANG et al., 2015).

Figura 14 – Método de espalhamento de luz utilizado no sensor PPD42NS.

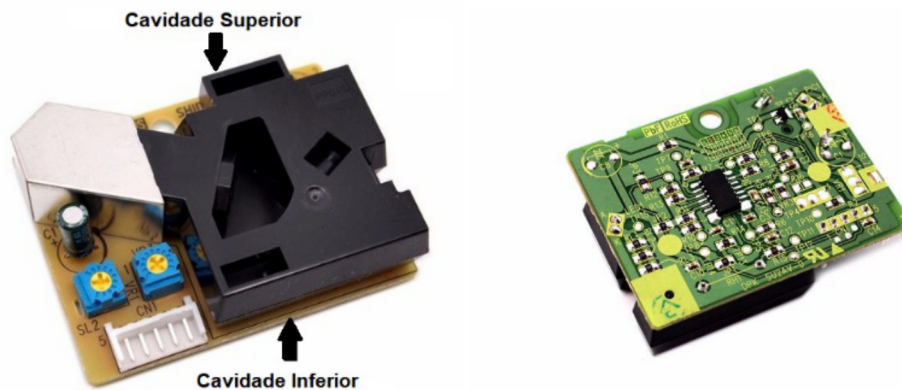


Fonte: (WANG et al., 2015) - Modificado pela autora.

O espalhamento, ou seja, reflexão e refração, de radiação eletromagnética em partículas esféricas é descrito pela Teoria de Mie, a qual descreve a relação entre o diâmetro das partículas e o comprimento de ondas eletromagnéticas (BOHREN; HUFFMAN, 2008).

O sensor e suas cavidades podem ser observadas na Fig. 15. O ar irá entrar pela cavidade inferior carregando as partículas e deve fluir até a cavidade superior, sendo assim, o sensor deve ser utilizado sempre na vertical. O PPD42NS possui um resistor aquecedor para direcionar o fluxo de ar, o qual é responsável pela convecção do ar, pois o ar quente, por ser menos denso, irá para a parte superior (AHMED; CHAICHAN, 2011), e assim as partículas fluem pela área de detecção.

Figura 15 – Sensor PPD42NS para medição de material particulado.



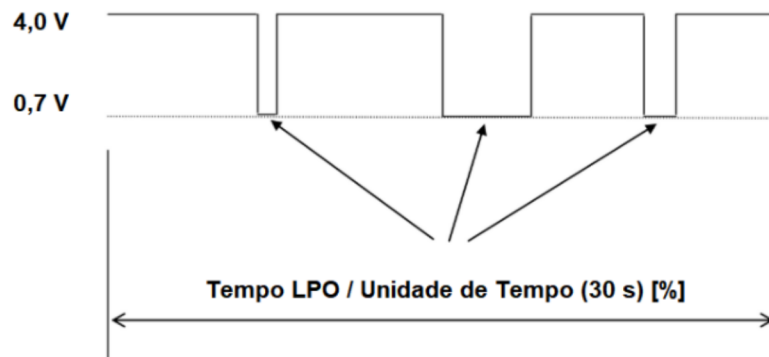
(a) Parte Frontal

(b) Parte Traseira

Fonte: (GROVE, 2020) - Modificado pela autora.

O PPD42NS contém um circuito eletrônico que converte a tensão de saída do fototransistor (PT) em pulsos digitais com níveis baixo e alto, conforme pode ser visto na Fig. 16. Dessa forma, o sensor mede a concentração de MP no ambiente a partir da razão entre o tempo LPO (*Low Pulse Occupancy*), que corresponde ao tempo de ocupação em nível lógico baixo em uma unidade de tempo determinada. A unidade de tempo considerada é de 30 segundos. A partir dessa razão, é possível encontrar, através da curva característica fornecida pelo fabricante, o valor de concentração correspondente em pcs/ft^3 (partículas/pés cúbicos).

Figura 16 – *Low Pulse Occupancy* (LPO).



Fonte: (SHINYEI, 2010)

Para converter a unidade de pcs/ft^3 para o padrão em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, algumas considerações devem ser feitas. Sendo assim, tal conversão é apenas uma aproximação para quantificar as partículas sendo contadas. As considerações que foram adotadas foram:

- Todas as partículas são esféricas, com uma densidade de $1,65^{12} \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TITTARELLI et al., 2008);
- O raio das partículas $\text{MP}_{2,5}$ possui distribuição bimodal com picos em 0,44 e 1,1 μm (LEE et al., 2008);
- 1 ft^3 pode ser convertido em m^3 multiplicando por 35,315.

O sensor PPD42NS custa em média 12 dólares e possui duas saídas digitais: P1, para detecção de partículas com diâmetro em torno de 1 μm ou ligeiramente maior, e P2, para partículas com diâmetro próximo a 2,5 μm ou maior. O PPD42NS é alimentado com 5 V, consome 90 mA e, após sua inicialização, necessita de aproximadamente 3 minutos para estabilizar suas medições (SHINYEI, 2010). Por realizar aquisição dos dados em períodos de segundos, ele pode ser classificado como MEF Classe III.

Testes em laboratório foram realizados por Austin et al. (2015) para caracterizar o comportamento do PPD42NS, expondo-o a partículas de diferentes tamanhos com um espectrômetro que mede o diâmetro das partículas. Após os testes, a correlação linear obtida variou entre 0,66, para detecção de partículas até $0,75 \mu\text{m}$, e 0,99, para partículas entre 1 e $3 \mu\text{m}$. Ao ser analisado pelo espectrômetro, concluiu-se que o menor diâmetro detectável das partículas é $0,5 \mu\text{m}$ e, quando calibrado, é uma alternativa adequada para estimar os níveis de concentração e a exposição à poluição atmosférica em ambientes ainda não monitorados.

Em Wang et al. (2015) um teste em ambiente controlado em laboratório foi executado com sensores de baixo custo baseados no método de espalhamento de luz, um deles sendo o PPD42NS. A correlação linear das medições entre o PPD42NS e os instrumentos monitores de MP foi igual a 0,9452, para concentrações de partículas variando de 0 a $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Wang et al. (2015) também observou a influência da umidade na medição de concentração de MP, verificando o comportamento do sensor em diversos valores de umidade relativa do ar. Em altos índices de umidade (acima de 90%), a medição do poluente é afetada, pois as partículas de água absorvem a radiação infravermelha, reduzindo a intensidade de luz recebida pelo fototransistor e interferindo no funcionamento do circuito dos sensores.

Neste trabalho, um dos poluentes monitorados pelo sensor portátil será o Material Particulado $2,5 \mu\text{m}$. Este poluente, como exposto anteriormente, pode causar diversos danos à saúde, pois pode se depositar em várias regiões do sistema respiratório ou na corrente sanguínea. A medição de concentração de $\text{MP}_{2,5}$ será com o auxílio do sensor PPD42NS e suas medições serão avaliadas a partir da estação de monitoramento HiVol 3000.

4 NARIZ ELETRÔNICO

As emissões de gases nocivos na atmosfera, principalmente proveniente da combustão de combustíveis fósseis, contribuem para o aquecimento global, mudanças climáticas e poluição do ar. Além disso, em níveis elevados, é a causa de diversos problemas de saúde, como asma e câncer (NAJJAR, 2011).

A tecnologia de detecção de gás vem se desenvolvendo e se tornando cada vez mais significativa nos últimos anos, principalmente devido à preocupação com as emissões de poluentes e como afeta a população, colocando a saúde e o meio ambiente em risco. A detecção de gás pode ser aplicada em diversas áreas, tais como análise de alimentos, diagnósticos médicos e controles ambientais (detecção de metano em minas, de gases poluentes em veículos, monitoramento de gases de efeito estufa) (LIU et al., 2012). É de extrema importância identificar qualitativamente e detectar quantitativamente gases nocivos, pois estes causam danos a uma determinada concentração.

A medição dos odores geralmente é classificada em dois grupos (LIU et al., 2012):

- Medidas Sensoriais: empregam o nariz humano, através de painéis humanos, e medem os efeitos do odor do modo como é percebido pelo observador. Porém, podem ser afetadas por diversos fatores e interpretação dos resultados.
- Medidas Analíticas: caracterizam os odores em termos qualitativos, a partir de sua composição química, e quantitativos, calculando a concentração no ambiente. As tecnologias de detecção de gases são determinadas de acordo com a variação de suas propriedades e composição, podendo se basear em métodos ópticos, acústicos, cromatografia gasosa ou a partir da variação de suas propriedades elétricas, como por exemplo semicondutores de óxido metálico, nanomateriais e polímeros.

O semicondutor de óxido metálico (MOS - *Metal Oxide Semiconductor*) é o método mais utilizado em sensores de gás e existem diversas combinações químicas adequadas para detecção através da medição da condutividade elétrica, como ZnO, SnO₂, NiO, entre outros (LI et al., 2019). As ligações entre as substâncias na camada sensível são rompidas liberando ou aprisionando elétrons através da reação química do material com os gases oxidantes ou redutores (WANG et al., 2010), alterando a resistência do sensor.

O desempenho dos sensores de gás é avaliado de acordo com parâmetros como sensibilidade, seletividade, tempo de resposta, entre outros. A seletividade é o parâmetro que determina a capacidade do sensor de detectar um gás específico em uma mistura de gases (DEY, 2018). O sensor do tipo MOS apresenta vantagens como baixo custo, tamanho reduzido e alta sensibilidade, porém possui baixa seletividade e isso ocorre

devido à característica de sensibilidade cruzada, ou seja, são sensíveis a diversos gases simultaneamente (DEY, 2018), não havendo um sensor seletivo para um gás-alvo.

Alguns métodos foram propostos buscando a melhoria da seletividade em sensores semicondutores de óxido metálico para detecção de gases, compensando sua desvantagem. Uma abordagem bastante aplicada no reconhecimento de odores simples e complexos é a partir de um conjunto de sensores não seletivos, capaz de discriminar gases a partir de ferramentas apropriadas de reconhecimento de padrões (FENG et al., 2019), denominada de Nariz Eletrônico.

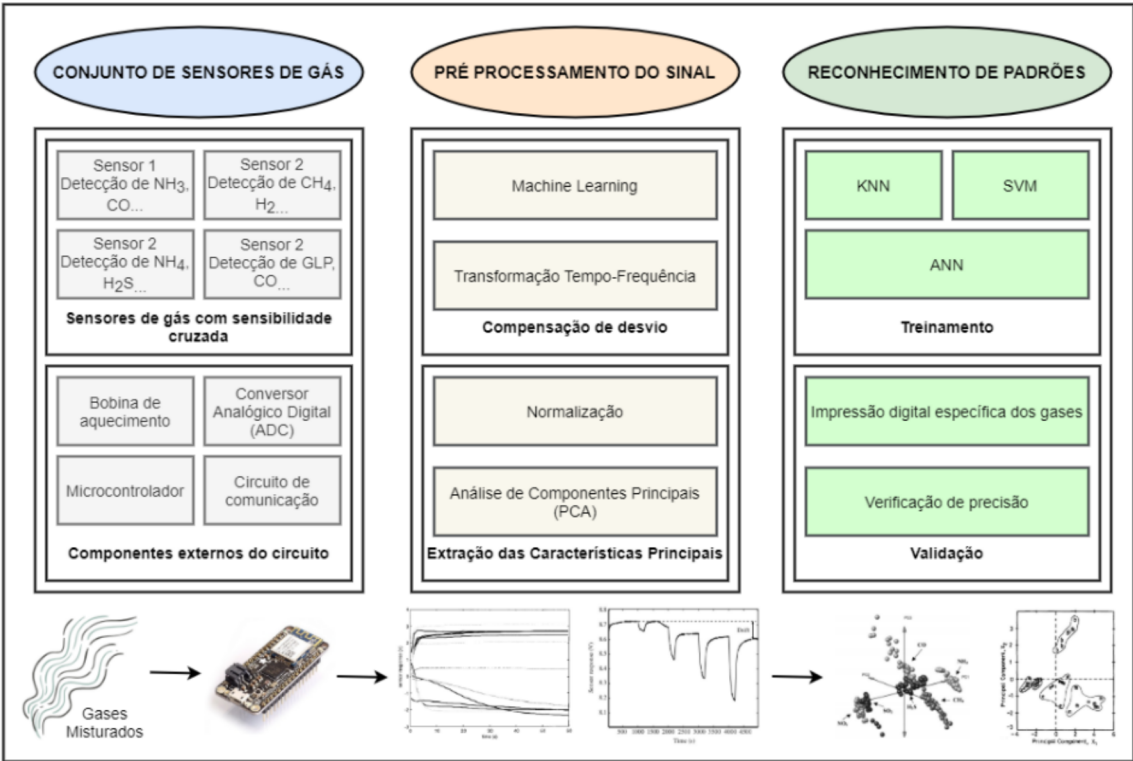
O Nariz Eletrônico é capaz de medir a concentração odorante, detectando automaticamente os compostos químicos e classificando-os, apresentando uma resposta em ordem de segundos, permitindo uma análise em tempo real. Cada sensor no conjunto escolhido responde de forma diferente quando exposto à gases, de acordo com sua temperatura de operação ou material semicondutor utilizado na camada de detecção, gerando padrões de respostas específicos da variação.

Os principais componentes do Nariz Eletrônico são (XU et al., 2018):

- Conjunto de sensores de gás: Geram sinais elétricos a partir da variação no ambiente da concentração dos gases aos quais o conjunto é sensível;
- Aquisição e processamento do sinal: O sinal elétrico irá passar pelos conversores A/D e então processado. A etapa de processamento é responsável por compensar erros e reduzir a dimensionalidade dos dados a partir da extração das principais características;
- Algoritmo de reconhecimento de padrões: Responsável por fornecer informações sobre tipo e concentração de gases, sendo capaz de identificar e quantificar os gases detectados após realizado o treinamento com odores previamente conhecidos.

Se o nariz eletrônico for treinado corretamente, ele será capaz de, além de detectar gases nocivos no ambiente, determinar a concentração de odores e atribuir a uma fonte odorante específica (DENTONI et al., 2012), ou seja, classificando-os de acordo com a sua composição química. Os principais componentes de narizes eletrônicos podem ser vistos na Fig. 17, separados segundo as três categorias citadas anteriormente.

Figura 17 – Principais componentes de narizes eletrônicos.



Fonte: (XU et al., 2018) - Modificado pela autora.

Visando a melhoria do desempenho do nariz eletrônico, as etapas de fundamental importância são a seleção do conjunto de sensores e seus materiais sensíveis, a extração de características e o reconhecimento de padrões. A etapa de extração das principais características é essencial para as etapas posteriores, pois diminui a redundância dos dados, mas segue representando corretamente os diferentes padrões de saída gerados pelos sensores (YAN et al., 2015). Alguns dos métodos mais utilizados nesta etapa estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Métodos para extração de características.

Método	Descrição
Valor máximo	Valor máximo da resposta do sensor
Área	Valores de área da curva de resposta do sensor
Máximo	O valor máximo de resposta
Média	Média de todos os pontos de resposta

Fonte: (YAN et al., 2015) - Modificado pela autora.

O objetivo do reconhecimento de padrões é gerar rótulos de classe para dados desconhecidos, a partir de categorias previamente treinadas. Algumas técnicas para pro-

cessamento e classificação dos dados são Redes Neurais Artificiais (RNA), lógica Fuzzy, K-Nearest Neighbors (KNN), entre outros (XU et al., 2018).

A detecção de gás a partir do Nariz Eletrônico pode ser aplicada em diversas áreas, tais como análise da qualidade dos alimentos (CHEN et al., 2019), diagnósticos médicos (DRAGONIERI et al., 2017) e monitoramento ambiental da qualidade do ar (SZULCZYŃSKI et al., 2018) (JASINSKI et al., 2018). A tecnologia do Nariz Eletrônico encontra-se em desenvolvimento e os benefícios desse dispositivo incluem sua forma compacta, baixo custo, análise em tempo-real e automatização.

Um estudo sobre a eficiência do Nariz Eletrônico foi realizado por Costa et al. (2016) e comprovou que utilizar um conjunto de sensores de gás pode auxiliar no monitoramento em tempo real da produção de biogás. Giungato et al. (2016) desenvolveu um Nariz Eletrônico com diferentes materiais sensores aplicado em uma planta de gerenciamento de resíduos para monitoramento da qualidade do ar e identificou o biogás como a fonte mais impactante na produção de odor, afetando a população que vive nos arredores do local. Szulczyński et al. (2017) aplicam Narizes Eletrônicos de diferentes formas para a detecção de odorantes no ambiente e destaca o desafio das pesquisas preliminares do uso deste equipamento em locais abertos como aterros sanitários, devido à distribuição de odores em uma área extensa e à variação das condições climáticas.

4.1 SENSORES MOS DA FAMÍLIA MQ

Os sensores da família MQ, ilustrados na Fig. 18 pelo sensor MQ-4, se baseiam na variação da condutividade elétrica a partir de semicondutores de óxido metálico para detecção dos gases.

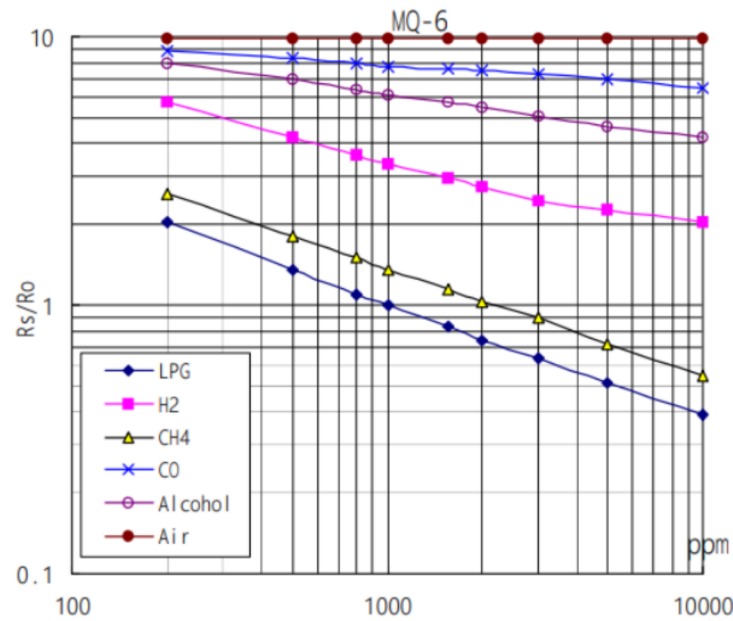
Figura 18 – Sensor MQ-4.



Fonte: (SPARKFUN, 2020)

Eles apresentam sensibilidade cruzada, ou seja, a seletividade não é singular e são sensíveis a diversos gases-alvo, como pode ser visto na Figura 19, a curva de sensibilidade para o sensor MQ-6, o qual pode responder a metano, gás liquefeito de petróleo (GLP), hidrogênio, monóxido de carbono e álcool.

Figura 19 – Curva característica de sensibilidade do sensor MQ-6.

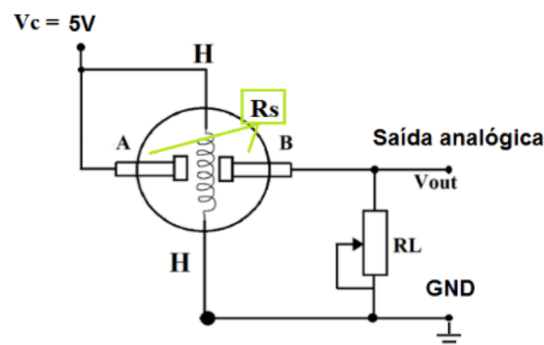


Fonte: (HANWEI SENSORS, 2020).

A partir da curva de sensibilidade, é possível observar que a concentração é dada em ppm (partes por milhão) a partir da razão $\frac{R_s}{R_o}$. R_s representa a resistência do sensor, a qual varia em diferentes concentrações de gases, e R_o a resistência do sensor em ambiente considerado limpo. Para o sensor MQ-6, por exemplo, a razão $\frac{R_s}{R_o}$ em ar limpo é igual a 10.

Ao estar na presença de algum gás oxidante ou redutor, a superfície MOS do sensor irá reagir com as partículas odorantes, variando a resistência R_s entre os pontos A e B do dispositivo, como visto na Fig. 20. Essa resistência é proporcional à concentração dos gases. A bobina aquecedora se posiciona entre os pontos H e é responsável por manter a temperatura de operação em um valor determinado como ótimo para a operação do sensor.

Figura 20 – Esquemático do circuito dos sensores da família MQ.



Fonte: (HANWEI SENSORS, 2020) - Modificado pela autora.

A resistência de carga R_L em conjunto com a resistência do sensor R_s formam um divisor resistivo. Sendo assim, o valor de R_s pode ser encontrado pela Equação 4.1.

$$R_s = \frac{V_c \cdot R_L}{V_{RL}} - R_L \quad (4.1)$$

Após calcular o valor de R_s , é possível encontrar a razão $\frac{R_s}{R_o}$ a partir de um valor ajustado de R_o para um ambiente com o ar limpo ou uma concentração conhecida de gás.

Em Sanacifar et al. (2014) é realizado o desenvolvimento de um nariz eletrônico de baixo custo, composto por seis sensores distintos da família MQ, para classificação de diferentes estágios de amadurecimento de alimentos com o auxílio de uma Rede Neural Artificial. Foi observado que o número de sensores utilizados pode ser otimizado para um subconjunto de três unidades (MQ-5, MQ-135 e MQ-136), os quais têm maior influência na detecção e podem classificar quase todas as variações no processo de maturação.

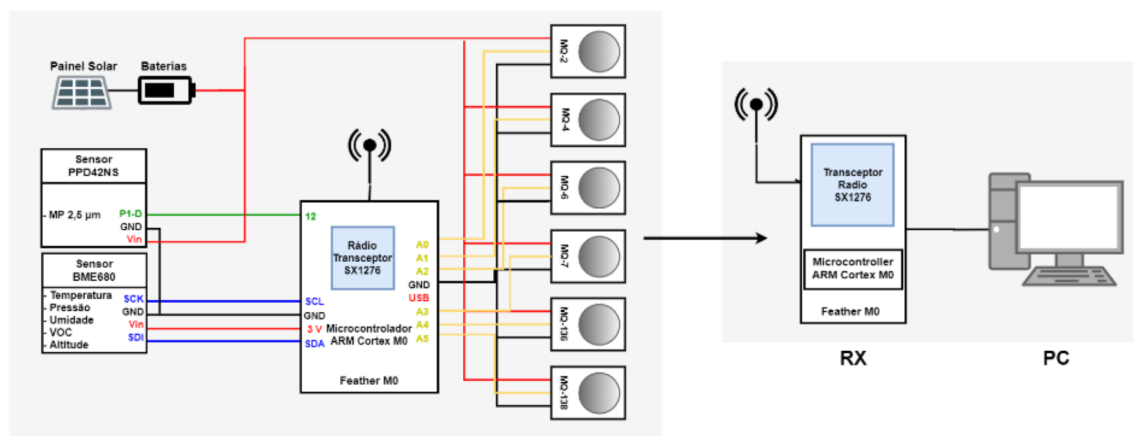
Firdaus, Murti e Alinursafa (2019) desenvolvem uma aplicação em IoT para monitoramento de monóxido e dióxido de carbono através de sensores MQ-7 e MQ-135, enviando as informações adquiridas para nuvem via modulação LoRa. A comparação entre os dados dos sensores MQ e um analisador de gás indicou alta precisão na leitura dos dispositivos de baixo custo, acima de 85% para ambos.

5 DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR SEM FIO E PORTÁTIL INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DISTRIBUÍDO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento do sensor sem fio e portátil para medição de material particulado e gases poluentes, como metano e monóxido de carbono. O capítulo está dividido em três seções. A primeira seção descreve os testes experimentais visando analisar o comportamento da modulação LoRa na transmissão de dados em ambiente urbano e florestal. A segunda seção aborda a medição de $MP_{2,5}$ com o sensor PPD42NS, realizando a sua calibração a partir de uma estação de monitoramento de referência e uma proposta para redução do seu consumo de energia. A terceira seção apresenta os procedimentos para medição de gases de efeito estufa a partir dos sensores da família MQ, a calibração realizada em ambiente com o ar limpo e o desenvolvimento de uma Rede Neural Artificial como algoritmo de reconhecimento de padrões para treinamento e validação dos dados em experimentos com substâncias odorantes.

Os transmissores (TX) e receptores (RX) neste trabalho utilizaram a placa de desenvolvimento Feather M0 RFM95 com rádio LoRa produzida pela Adafruit, que contém um processador ATSAMR21G18 ARM Cortex M0 (48 MHz/3,3V) e ADC de 12 bits de resolução (ADAFRUIT, 2019b). As conexões entre os sensores utilizados neste projeto e a placa de desenvolvimento Feather M0 estão ilustradas na Fig. 21. Os dados serão adquiridos e enviados via modulação LoRa a um receptor, que irá armazená-los *online* para então ocorrer o processamento.

Figura 21 – Esquemático das conexões entre os sensores para medição de MP e gases poluentes.



Fonte: da autora

Na Tabela 5 são listados os principais componentes do sensor proposto, suas respectivas funções e preços. A sensibilidade cruzada dos sensores da família MQ será descrita na seção 5.3, na tabela a seguir estão apenas os gases aos quais os sensores são

mais sensíveis.

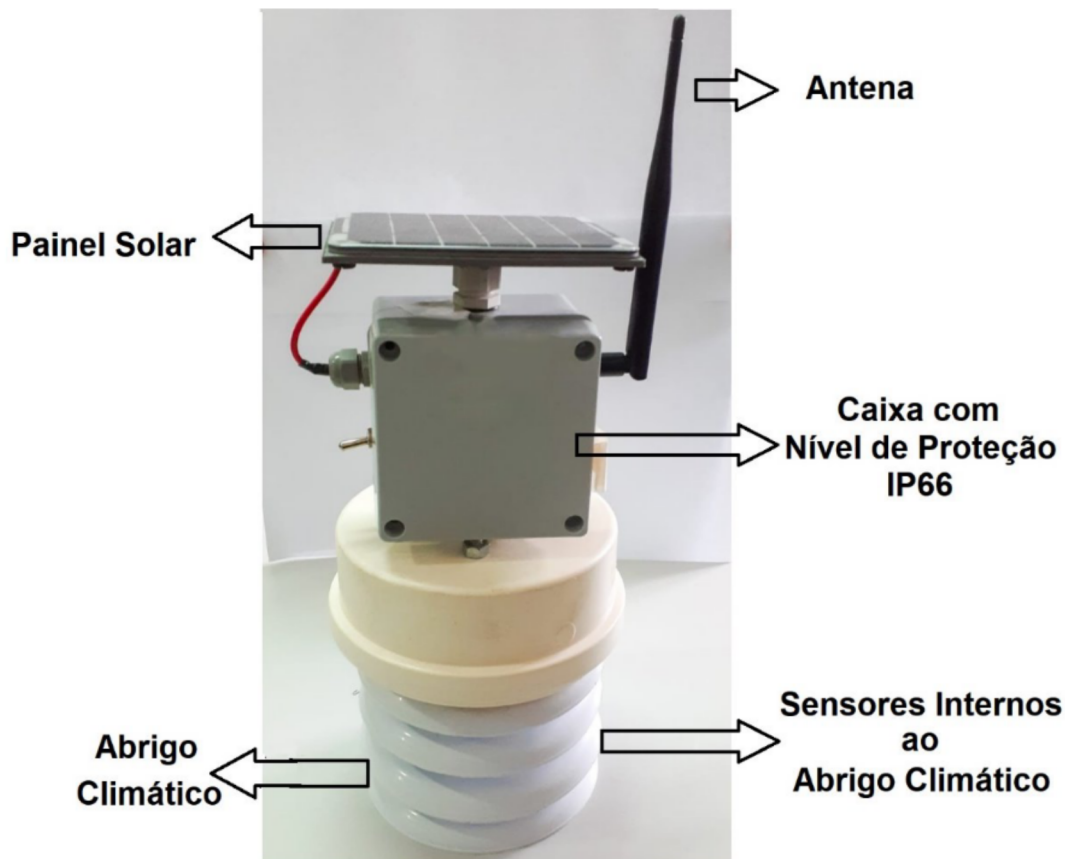
Tabela 5 – Componentes do sensor portátil e suas respectivas funções.

Componente	Descrição	Preço (em Reais)
Sensor PPD42NS	Fornecer dados de material particulado 2,5 μm	R\$ 46,00
Sensor MQ-2	Deteção de gases inflamáveis e fumaça.	R\$ 20,50
Sensor MQ-4	Deteção de Metano (CH ₄)	R\$ 23,38
Sensor MQ-6	Deteção de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	R\$ 28,85
Sensor MQ-7	Deteção de Monóxido de Carbono (CO)	R\$ 26,33
Sensor MQ-136	Deteção de Gás Sulfídrico (H ₂ S)	R\$ 419,48
Sensor MQ-138	Deteção de Compostos Voláteis Orgânicos (VOC - <i>Volatile Organic Compounds</i>)	R\$ 310,84
Placa de Desenvolvimento Adafruit Feather M0 RFM95 com Rádio LoRa	Realiza a leitura dos sensores e envia os dados via modulação LoRa ao receptor	R\$ 300,05
Sensor BME680	Fornecer dados ambientais de temperatura, pressão, umidade, compostos orgânicos voláteis e altitude	R\$ 193,50
Baterias	Armazenar energia. Responsável por parte da alimentação do sensor de monitoramento	R\$ 85,57
Painel Solar 6 V / 2 W	Responsável por parte da alimentação do sensor de monitoramento	R\$ 249,40

Fonte: da autora.

O nó sensor desenvolvido para a medição de poluentes atmosféricos pode ser visto na Fig. 22. Por ser portátil e sem fio, pode ser posicionado em qualquer localidade para avaliação da qualidade do ar. O abrigo climático projetado possui pratos na base que permitem o fluxo de ar e protegem da chuva. Também possui uma caixa com nível de proteção IP66 para abrigar os componentes eletrônicos do projeto.

Figura 22 – Sensor portátil para monitoramento de Material Particulado desenvolvido.



Fonte: da autora.

5.1 ANÁLISE DA COMUNICAÇÃO SEM FIO LORA

Os testes realizados neste trabalho em ambientes urbano e florestal na cidade de João Pessoa/Paraíba pretendem analisar a performance da modulação LoRa. Algumas das métricas observadas para análise foram alcance de transmissão, taxa de pacotes recebidos (PDR - *Packet Delivery Ratio*) e RSSI (*Received Signal Strength Indication*), que indica a qualidade com que o sinal está sendo recebido no receptor. O valor de RSSI varia devido aos obstáculos na propagação do sinal, como edifícios e construções, e à distância entre os dispositivos (MCGIRR; CASSIDY, 1992).

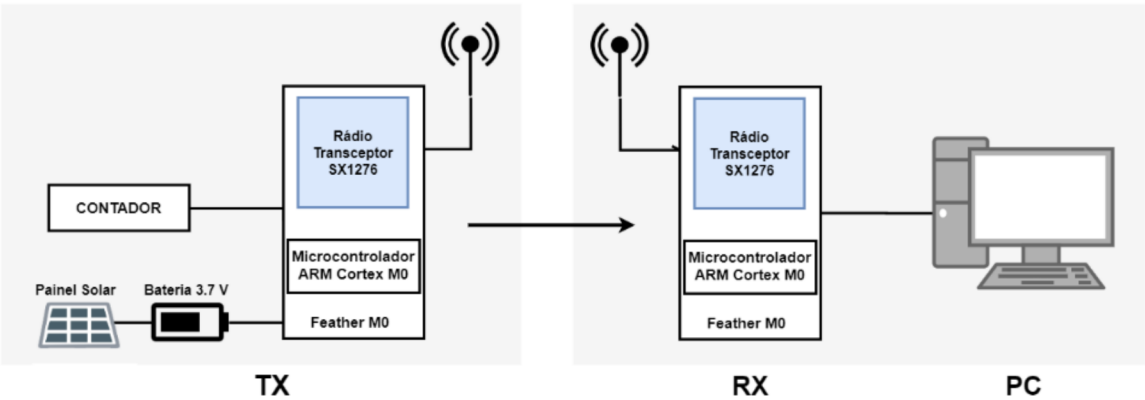
Nos experimentos, o transmissor (TX) era alimentado de forma híbrida via energia solar e bateria, enviando pacotes numerados pelo contador a cada 2 segundos. O receptor (RX) estava conectado ao computador, onde era possível analisar os dados que estavam sendo recebidos. Ambos os dispositivos de transmissão e recepção foram desenvolvidos a partir da placa de desenvolvimento Adafruit Feather M0 RFM95 com rádio LoRa. Os parâmetros escolhidos para os testes podem ser vistos na Tabela 6 e o esquemático do experimento na Fig. 23.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados nos testes com a modulação LoRa

Parâmetro	Valor
Frequência	915 MHz
Fator de Espalhamento	12
Largura de Banda	250 kHz
Code Rate	4/5

Fonte: da autora.

Figura 23 – Esquemático do experimento para medição de material particulado.



Fonte: da autora.

Os parâmetros foram escolhidos visando a avaliação da modulação LoRa com respeito ao alcance de transmissão, não focando no consumo de energia. O valor do parâmetro SF foi definido com 12, o fator mais alto possível, que permite o maior ToA, alcança as maiores distâncias e é menos susceptível a erros. O procedimento para os testes em ambos os ambientes está descrito passo a passo pelo pseudocódigo a seguir.

- Passo 1: Transmitir um pacote a cada 2 segundos.
- Passo 2: Em um determinado local de observação, contar o número de pacotes recebidos em 1 minuto.
- Passo 3: Repetir o Passo 2 três vezes. Duração total em um ponto de observação: 3 minutos.
- Passo 4: Calcular a porcentagem de Pacotes Recebidos (PDR).
- Passo 5: Ir para outro ponto de observação e repetir o Passo 2. Se for o último local, finalizar o experimento.

Para o teste em ambiente urbano denso, o transmissor (TX) foi posicionado no topo do prédio do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a aproximadamente 15 m de altura. O receptor foi disposto

em nove locais diferentes de João Pessoa, em distâncias que variavam de 100 a 4000 m do transmissor. Na Fig. 24 estão apresentados os resultados obtidos em cada um dos nove pontos de observação com seus respectivos valores de distância, PDR e RSSI.

Figura 24 – Resultados dos testes de alcance e RSSI em ambiente urbano denso.



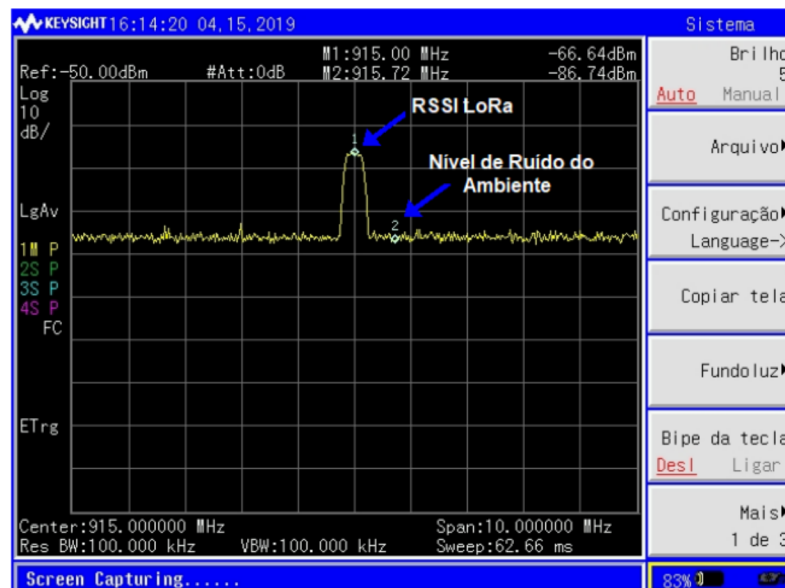
Fonte: da autora.

Com os resultados do primeiro teste, o local indicado pelo número 4 no mapa apresentou uma baixa porcentagem de pacotes recebidos, equivalente a 54,4%. Dispondo de um analisador de espectro, equipamento utilizado para estimar como a potência está distribuída pela frequência (STOICA; MOSES et al., 2005), foi analisado se haviam outras transmissões na mesma largura de banda que a modulação LoRa nas imediações do ponto 4, porém nenhuma interferência foi detectada, como pode ser visto na Fig. 25.

Para uma segunda análise foram examinadas as características do ambiente onde o ponto estava inserido. O mesmo estava próximo à florestas e vegetações, então foram realizados novos testes de transmissão em ambiente florestal fechado, onde não é possível observar o céu ou os arredores devido à densidade da mata, no Jardim Botânico Benjamin Maranhão.

O experimento consistia em observar a distância e RSSI até o receptor começar a perder pacotes, para isso, duas trilhas foram percorridas. Na Fig. 26 estão expostas as distâncias percorridas antes da perda total de pacotes. Quando os dispositivos não estavam em linha de visada direta, o receptor perdia um número considerável de pacotes.

Figura 25 – Imagem da tela do analisador de espectro nas imediações do ponto 4.



Fonte: da autora.

Figura 26 – Resultados dos testes de alcance e RSSI em ambiente florestal.



Fonte: da autora.

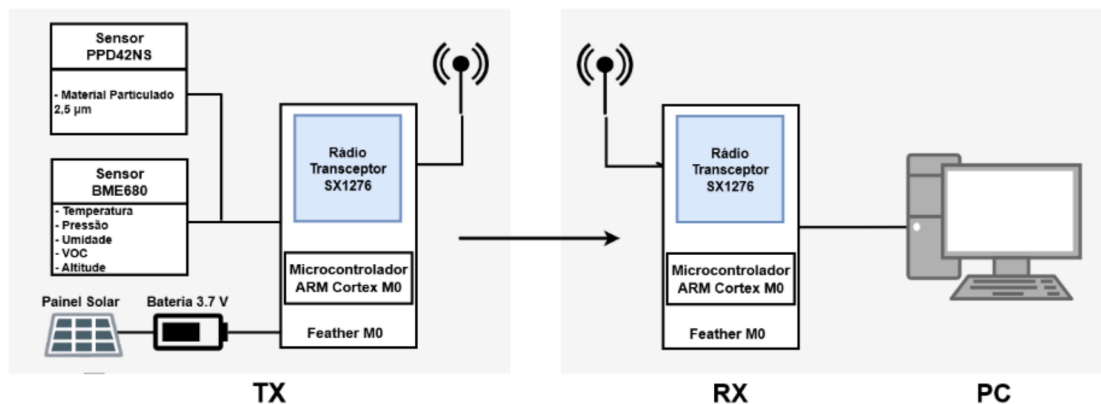
Portanto, as trilhas percorridas em ambiente florestal comprovaram a influência da vegetação na perda de pacotes ao utilizar a modulação LoRa para transmissão pois, quando não há linha de visada direta entre os nós sensores, os pacotes são perdidos completamente, mesmo em pequenas distâncias.

Sendo assim, os testes em ambiente urbano comprovaram a eficiência da tecnologia de comunicação LoRa. As informações foram enviadas com até 4 quilômetros de distância entre o transmissor e o receptor e a taxa de pacotes recebidos foi superior a 95%, porém é necessário ter atenção ao ambiente onde o nó será posicionado, evitando locais cercados por vegetação densa, pois pode ocorrer interferência na transmissão dos dados.

5.2 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR PARA MEDIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

Para medição de Material Particulado, o esquemático do sistema proposto para teste experimental pode ser observado na Fig 27. Os dados dos sensores ambientais (BME680 e PPD42NS) são transmitidos via modulação LoRa para um receptor conectado a um computador com acesso à internet, onde são armazenados. Posteriormente, os dados são processados *offline* pelo *software* livre Octave. O sensor BME680 fornece dados de temperatura, umidade, pressão atmosférica, gases VOC e altitude.

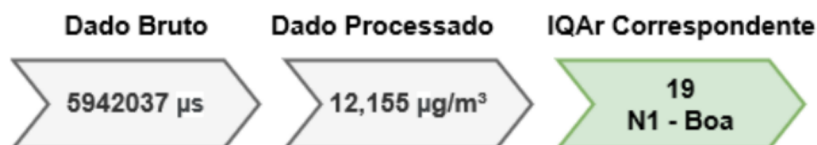
Figura 27 – Esquemático do experimento para medição de material particulado.



Fonte: da autora.

Os dados enviados eram dados brutos das leituras dos sensores, ou seja, sem o devido processamento. Por exemplo, o dado bruto da saída digital representa o tempo, em microssegundos, que o nível lógico ficou baixo e o dado processado é o valor de concentração, convertido para $\mu g/m^3$, e seu respectivo valor de IQAr, conforme visto na Fig. 28.

Figura 28 – Etapas de processamento dos dados.



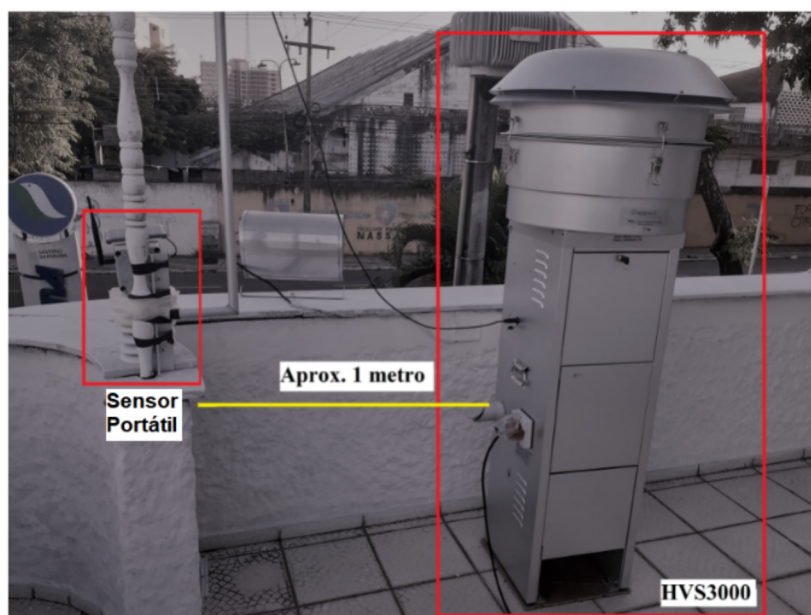
Fonte: da autora.

Após finalizados os testes, era realizado o tratamento e cálculo dos valores de concentração de MP no período considerado. O experimento para medição de $MP_{2,5}$ foi realizado no período de 5 dias, de 07 a 11 de Novembro de 2019. Neste período, o equipamento de referência HiVol 3000, responsável pela validação e ajuste da leitura do sensor PPD42NS, estava disponível para uso.

Para a avaliação de sensores comerciais de baixo custo a partir de equipamentos de referência, é utilizado o método de "proximidade", onde ambos devem ser posicionados próximos um ao outro, em um período predeterminado, para então as medições serem comparadas (PIEDRAHITA et al., 2014). Após tal período de avaliação, é possível verificar o desempenho do sensor proposto e a qualidade dos dados.

No experimento realizado, o sensor foi posicionado a aproximadamente 1 metro de distância do equipamento HiVol 3000, como pode ser visto na Fig. 29. Ambos foram instalados na área superior do edifício da Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA), localizada no Centro da cidade de João Pessoa/Paraíba.

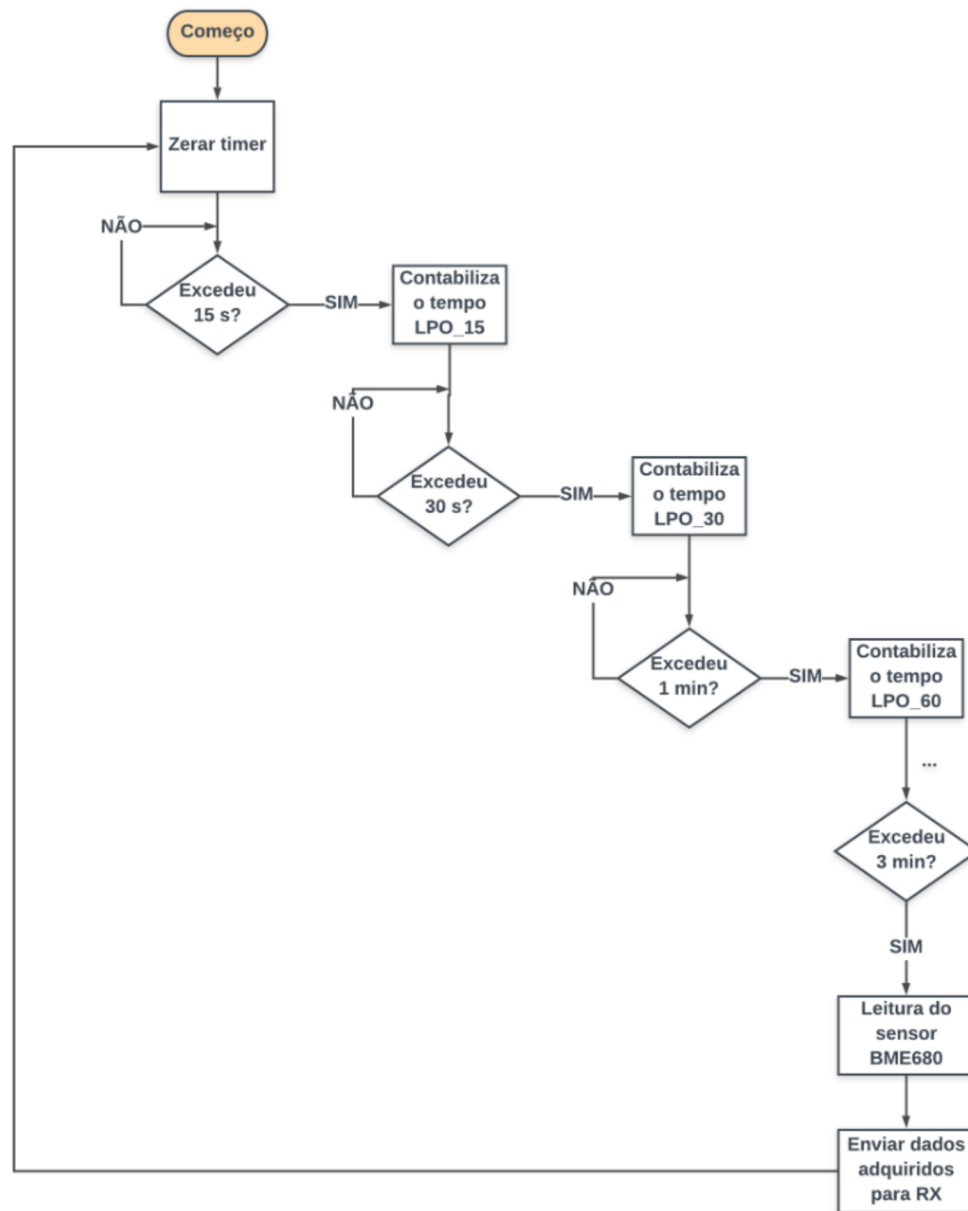
Figura 29 – Sensor portátil desenvolvido e HiVol 3000.



Fonte: da autora.

A operação básica definida para o sensor desenvolvido é a seguinte: os dados são amostrados a cada 15 segundos, porém transmitidos periodicamente a cada 3 minutos via modulação LoRa. O rádio é colocado em modo *sleep* enquanto não atinge os 3 minutos, visando minimizar o consumo de corrente no modo de transmissão e aumentar o tempo de vida útil da bateria. O fluxograma de leitura e transmissão dos dados está exposto na Fig. 30.

Figura 30 – Fluxograma do código para medição de Material Particulado a partir do PPD42NS.



Fonte: da autora.

O consumo de corrente do rádio, de acordo com os possíveis modos de operação, é

resumido na Tabela 7.

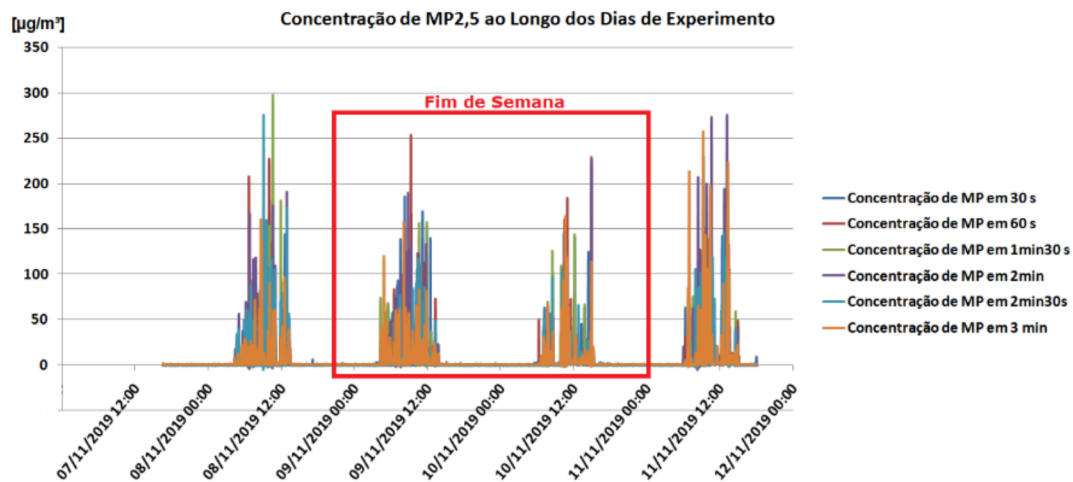
Tabela 7 – Consumo de corrente no rádio de acordo com o modo de operação.

Modo de Operação	Consumo de Corrente
<i>Sleep</i>	300 μ A
Transmissão	120 mA
Recepção	40 mA

Fonte: (ADAFRUIT, 2019b)

Os dados de $MP_{2,5}$ [$\mu g/m^3$] obtidos ao longo dos 5 dias de experimento e em apenas um dia, podem ser observados na Figura 31 e 32, respectivamente. Os maiores valores de concentração do poluente ocorreram nos períodos de 06:00 às 15:00 horas, aproximadamente.

Figura 31 – Dados de concentração de $MP_{2,5}$ ao longo dos dias de experimento.



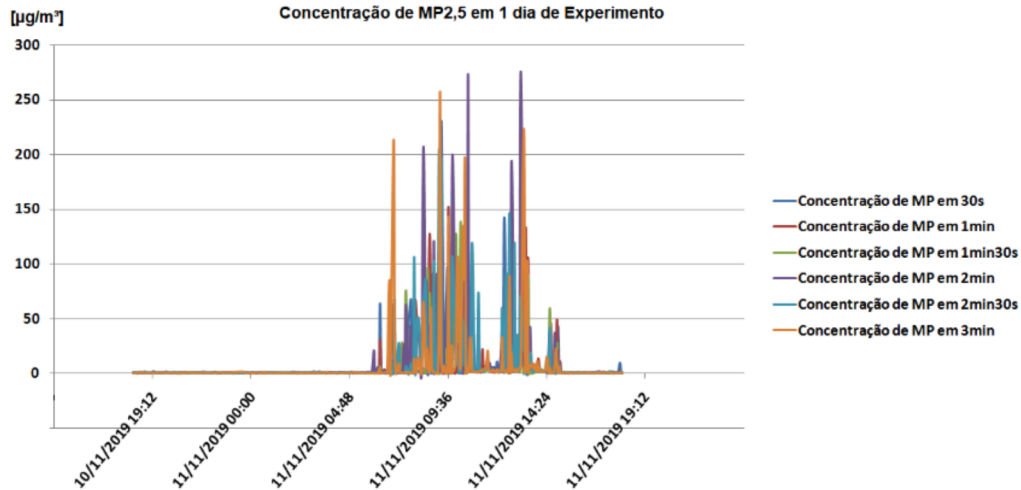
Fonte: da autora.

Ao analisar o gráfico, é possível constatar que os dados de concentração no fim de semana, destacados na Fig. 31, possuem valores menores que nos outros dias, essa queda nos valores de concentração é ainda mais notável no domingo. Isso se deve ao fato da movimentação, de pessoas e automóveis, ser mais reduzida quando comparada com os outros dias da semana.

A partir dos dados de concentração, foi observada a relação entre a temperatura, umidade e MP, como ilustrado na Fig. 33. Observa-se pelo gráfico que a temperatura e umidade estão relacionadas com a concentração de MP pois, no período diurno, com o aumento da temperatura, ocorre o processo de convecção do ar, que contribui para a suspensão das partículas. Ao entardecer e no período noturno, com o aumento da umidade

relativa do ar, as partículas de água absorvem a radiação infravermelha, reduzindo a quantidade captada pelo fototransistor.

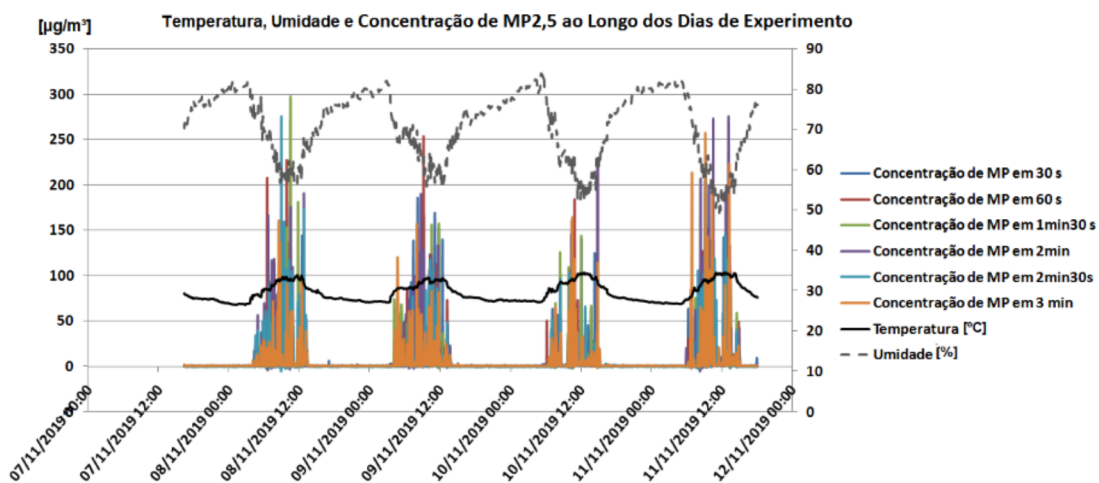
Figura 32 – Dados de concentração de $MP_{2,5}$ em apenas um dia.



Fonte: da autora.

Quando há uma elevação na temperatura, a partir das 6 horas da manhã, aproximadamente, a umidade relativa do ar diminui e o nível de concentração de MP aumenta. Analogamente, quando a temperatura diminui, a partir das 15 horas, aproximadamente, a umidade aumenta e o nível de concentração de MP diminui.

Figura 33 – Dados de concentração de $MP_{2,5}$, temperatura e umidade.



Fonte: da autora.

A partir de valores de concentração obtidos dos poluentes na atmosfera, é possível calcular o Índice de Qualidade do Ar (IQA) e fornecer de forma mais simples o dado à

população, para informar qual o nível de poluição em determinada área. O IQAr é um valor adimensional que representa a concentração de poluentes na atmosfera, através de um índice que varia de N1 até N5. Quanto maior o valor do IQAr, pior a qualidade do ar no ambiente, por exemplo, N5 indica péssima qualidade do ar. As categorias e os diferentes impactos do valor do IQAr na saúde estão resumidas na Tabela 8. Quando classificado como N1, ou seja, boa qualidade do ar, não há impacto sobre a saúde.

O IQAr, de acordo com a Resolução CONAMA 491/2018, pode ser calculado a partir da Eq. 5.1.

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \cdot (C - C_{ini}) \quad (5.1)$$

em que I_{ini} - Valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa.

I_{fin} - Valor do índice que corresponde à concentração final da faixa.

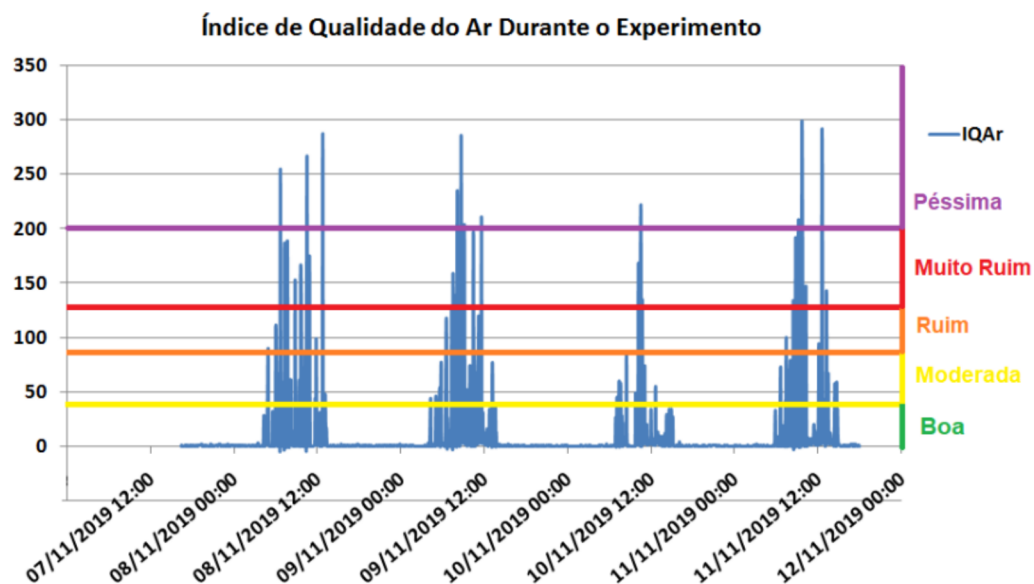
C_{ini} - Concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida.

C_{fin} - Concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.

C - Concentração medida do poluente.

Foi calculado o valor do Índice de Qualidade do Ar (IQAr) durante os dias do experimento. A linha amarela, na Fig. 34, indica o nível em que o IQAr ultrapassa o nível Moderado, passando para os níveis Ruim, Muito Ruim e em alguns momentos chegando a Péssimo.

Figura 34 – Índice de Qualidade do Ar (IQAr) durante os dias de experimento.



Fonte: da autora.

Tabela 8 – Categorias do Índice de Qualidade do Ar e seus diferentes impactos na saúde.

Qualidade do Ar e Efeitos à Saúde		
Qualidade	Índice	Significado
N1 - Boa	0 - 40	Não afeta à saúde
N2 - Moderada	41 - 80	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.
N3 - Ruim	81 - 120	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.
N4 - 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).
N5 - 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, 2020)

5.2.1 Calibração do Sensor PPD42NS

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM):

"Calibração é uma operação que estabelece uma relação entre valores de medições de um padrão e as indicações correspondentes, estabelecendo uma relação entre eles. A calibração pode ser obtida através de funções de calibração, diagramas de calibração, curvas de calibração ou uma tabelas de calibração."

Sendo assim, com base no equipamento de referência, o HiVol3000, estabeleceu-se uma relação linear entre este e o sensor PPD42NS a ser calibrado. A partir da curva de calibração foi possível ajustar os valores das medições do sensor de particulado.

O HiVol3000 fornece dados da média diária de concentração, pois como explicado anteriormente, calcula o valor de concentração baseado no volume total de ar amostrado durante o dia (24 horas). Portanto, foi utilizado o mesmo período de tempo, 24 horas, para o cálculo da média de concentração das amostras transmitidas pelo sensor PPD42NS. Os resultados das médias de concentração diária de MP para o equipamento de referência e para o sensor desenvolvido estão listados na Tabela 9, considerando a incerteza de medição do sensor PPD42NS.

Tabela 9 – Valores Médios de Concentração de MP nos Equipamentos de Referência e de Baixo Custo

Dia	Equipamento de Referência HiVol 3000 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Sensor PPD42NS [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
07 a 08/11	10,345	$7,558 \pm 0,725$
08 a 09/11	10,681	$7,347 \pm 0,715$
09 a 10/11	7,838	$5,057 \pm 0,763$
10 a 11/11	10,969	$8,112 \pm 0,881$
Média	9,958	$6,483 \pm 0,771$

Fonte: da autora.

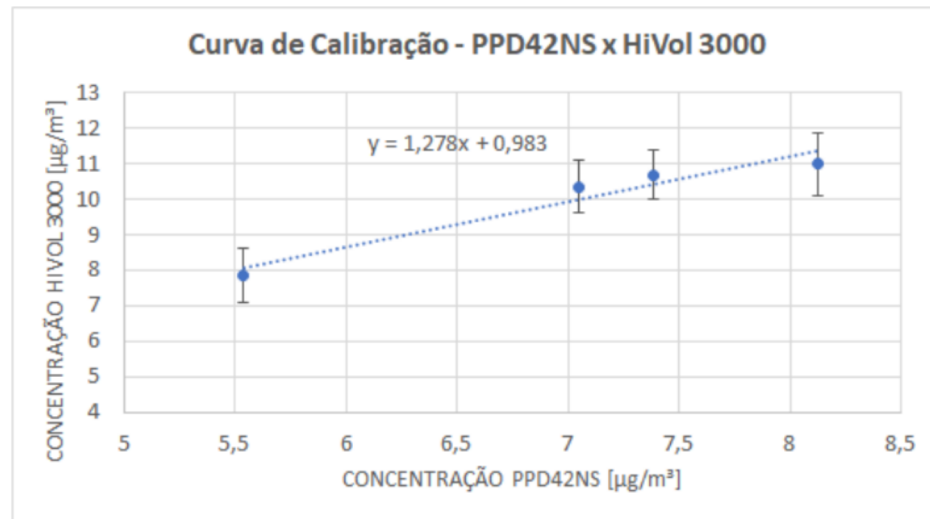
As médias diárias do sensor PPD42NS eram calculadas a partir da média aritmética, somando todos os valores processados de concentração de acordo com o número de pacotes recebidos durante 24 horas. Os quatro valores de média diária de concentração são referentes ao período no qual o equipamento HiVol 3000 estava em funcionamento.

Para obter a curva de calibração a partir dos pontos do equipamento de referência no eixo das ordenadas e os valores de média do sensor de baixo custo no eixo das abscissas, utilizou-se a função *polyfit*, do Octave (ferramenta de *software* livre que opera semelhante ao Matlab). Tal função retorna os coeficientes do polinômio que melhor representa os pontos de entrada fornecidos pelo usuário. O polinômio de grau 1 resultante é expresso pela Eq. 5.2 e a curva pode ser vista na Fig. 35.

$$y = 1,278x + 0,983 \quad (5.2)$$

A qualidade de ajuste da curva pode ser determinada pelo coeficiente de correlação R^2 e pelo Erro Médio Quadrático. O coeficiente de correlação varia de -1 a 1, quando igual a 1 indica correlação linear perfeita positiva, isto é, se uma variável aumenta linearmente, a outra aumenta também, quando igual a -1 indica correlação linear perfeita negativa, ou seja, se uma variável aumenta linearmente, a outra diminui. Quando igual a 0, significa que as duas variáveis não possuem associação alguma (TAYLOR, 1990). Para a Eq. 5.2, o valor de R^2 obtido foi de 0,967, indicando alta correlação linear entre as variáveis e o erro médio quadrático obtido foi de 0,316.

Figura 35 – Curva de calibração do sensor PPD42NS a partir do equipamento HiVol3000.



Fonte: da autora.

Desse modo, dispondo da Eq. 5.2, as leituras do sensor PPD42NS serão os valores de entrada x e a saída y será o valor corrigido de acordo com a calibração implementada com o equipamento HiVol 3000 como referência.

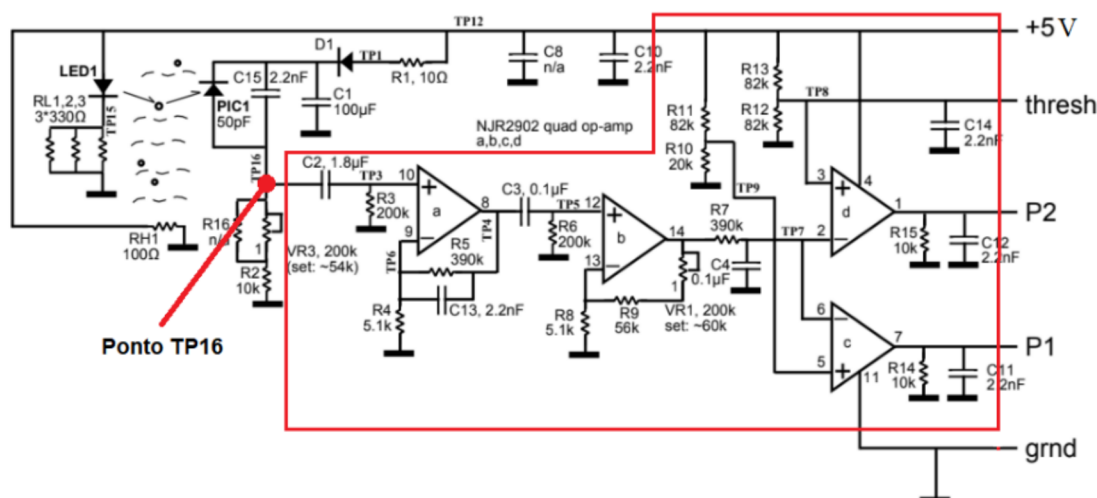
A incerteza de medição, indicada pelo desvio padrão da média para cada dia de experimento, resultou em valores elevados. Isso ocorre devido ao fato de que os valores de concentração ao longo do dia variam bastante quando comparados à média. Sendo assim, fornecer apenas o valor da média diária pode não ser suficiente para a avaliação da qualidade do ar e portanto, o sensor inteligente desenvolvido permite o monitoramento em tempo real e em locais de difícil acesso, indicando os horários e locais com maiores índices de emissões. Os valores da média diária do sensor PPD42NS, após a calibração das medições, se aproximaram bastante quando comparados ao HiVol 3000.

5.2.2 Processo de Redução de Consumo de Energia do Sensor PPD42NS

Visando uma proposta de economia do consumo de corrente do sensor PPD42NS, decidiu-se realizar o processamento do sinal de forma digital, através somente do processador do nó sensor desenvolvido, eliminando os componentes físicos eletrônicos do sensor. O fabricante do sensor PPD42NS não fornece o diagrama esquemático do circuito eletrônico, porém Allen (2002) fez uma engenharia reversa para compreender melhor seu funcionamento.

Na Fig. 36, a parte destacada em vermelho será eliminada, a partir do ponto após o fototransistor, TP16. Esta proposta originou-se do fato que eliminando esses componentes, além da economia de consumo de corrente, pode-se reduzir o tamanho do sensor e os custos com a necessidade de troca de componentes.

Figura 36 – Circuito do sensor de particulado PPD42NS.



Fonte: (ALLEN, 2002) - Modificado pela autora.

As alterações na luz, devido ao fluxo de partículas, causam mudanças na corrente do fototransistor e, conseqüentemente, na tensão correspondente no ponto TP16. Na primeira etapa, após o fototransistor, há um filtro passa faixa centrado em 10 Hz, aproximadamente, obtido a partir dos filtros passa alta (C2, R3), para remover flutuações da tensão de alimentação, e passa baixa com um ganho de 77,5 (R4, R5, C13), dado pelo amplificador A (CANU et al., 2018).

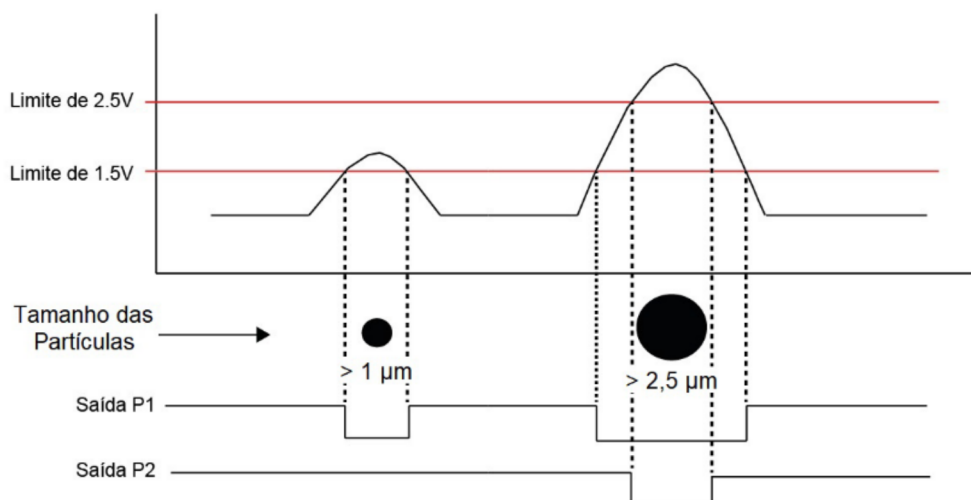
Na segunda etapa, há novamente um filtro passa faixa, com frequência centrada em 5,7 Hz, gerado a partir dos filtros passa alta (C3, R6) e passa baixa (R7, C4), com um ganho de tensão de 22, devido ao amplificador B. A combinação dos dois filtros passa faixa gera um filtro de segunda ordem com ganho máximo de 616,6 e frequência centrada em 5,7 Hz (CANU et al., 2018).

Por fim, após amplificar as variações na tensão de entrada, os comparadores geram pulsos de saída em P1 e P2 a partir do nível de tensão analisado. Quando a tensão é maior que 1 V, a saída P1 é alterada para nível lógico baixo. Quando é maior que 2,5 V, as saídas P1 e P2 atingem nível lógico baixo, como pode ser observado na Fig. 37.

O fluxograma do código proposto para a substituição dos componentes eletrônicos está exposto na Fig. Os filtros digitais implementados foram do tipo IIR (*Infinite Impulse Response* - Resposta ao Impulso Infinita) de primeira ordem, com um único pólo. O primeiro filtro, logo após o ganho de 77,5, era do tipo passa alta com frequência de corte em 8 Hz e o segundo filtro, após o ganho de 22, era do tipo passa baixa com frequência de corte centrada em 4 Hz.

Após a substituição, no PPD42NS, da parte eletrônica pelo processamento digital,

Figura 37 – Princípio de detecção de partículas.

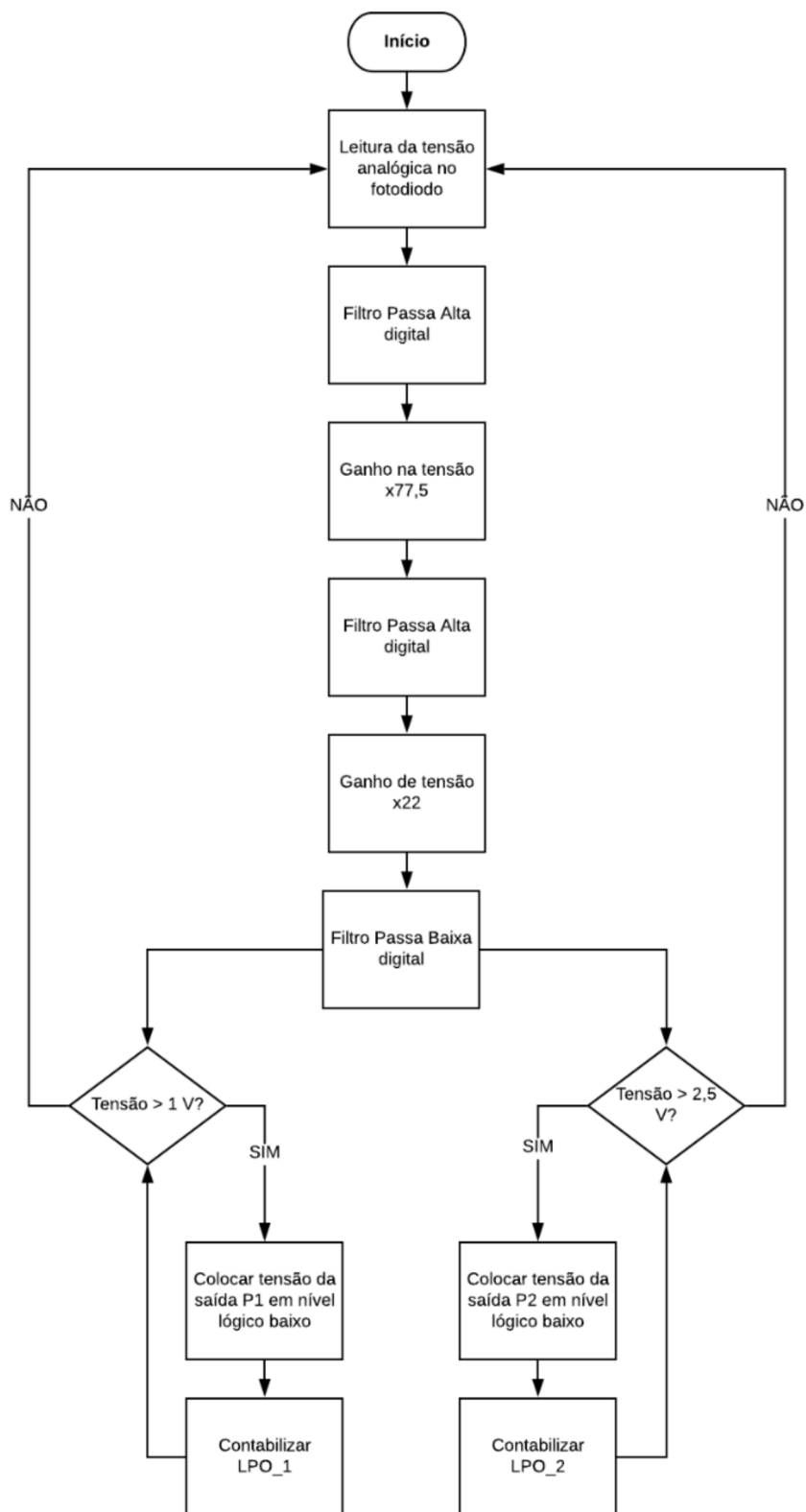


Fonte: (CANU et al., 2018) - Modificado pela autora.

foram realizados experimentos a fim de calibrar e analisar o comportamento do sensor a partir da leitura de tensão analógica (TP16), após o fotodiodo. O experimento idealizado foi realizado em quatro etapas distintas. Inicialmente, foi utilizada uma determinada quantidade de papel para ser queimado a uma certa distância do sensor desenvolvido. A folha de papel, de dimensões 11,5 cm x 11,5 cm, era queimada a aproximadamente 30 cm de altura de distância do sensor.

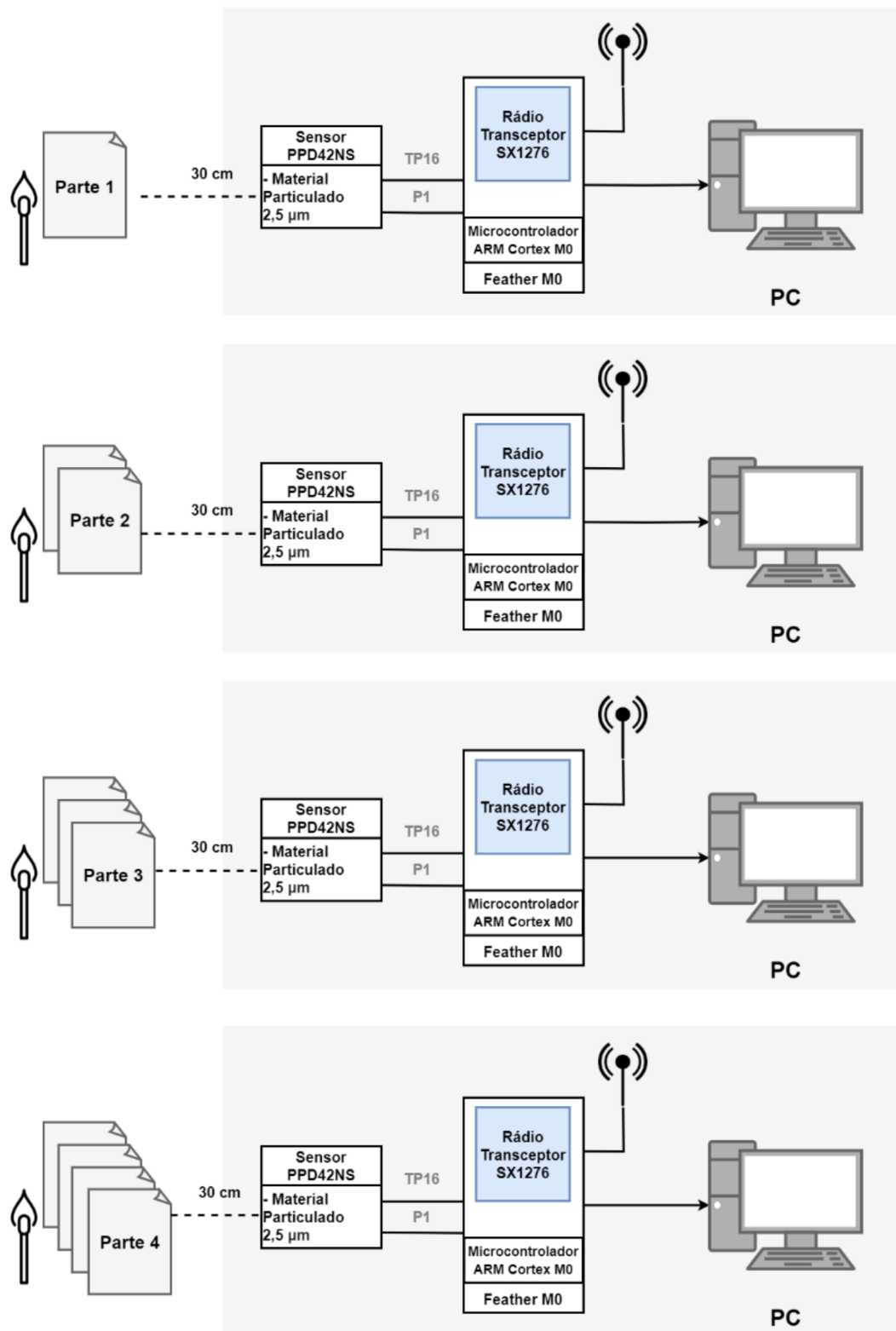
As etapas subsequentes foram constituídas da realização do mesmo experimento, mas com quantidades de papel distintas, que aumentaram em uma escala exponencial de base 2. Ou seja, na primeira parte do experimento foi realizada a queima de uma quantidade determinada desse material, já na segunda etapa, a quantidade dobrou, o que ocorreu novamente nas terceira e quarta partes do processo. O procedimento realizado está ilustrado detalhadamente na Fig. 39.

Figura 38 – Fluxograma do código para substituição dos componentes eletrônicos.



Fonte: da autora.

Figura 39 – Esquemático do experimento realizado para calibração do sensor proposto eliminando a parte eletrônica.



Fonte: da autora.

Na Tabela 10 está listada a quantidade de folhas de papel queimadas em cada etapa do processo. Ao fim de cada etapa, esperava-se aproximadamente 10 minutos para o sensor estabilizar sua leitura e, em seguida, começar a próxima parte com o dobro de papel a ser queimado.

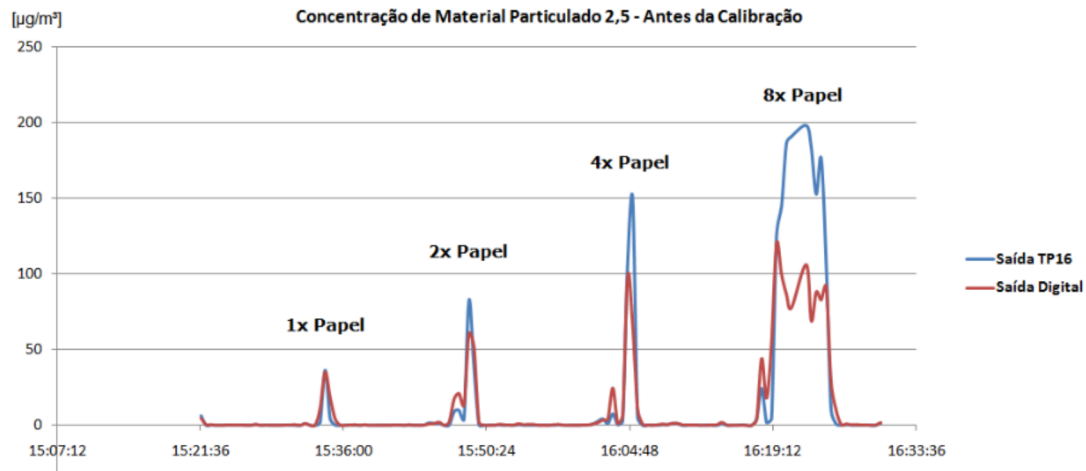
Tabela 10 – Quantidade de papéis queimados em cada etapa do experimento.

Etapa	Quantidade de Papéis
Etapa 1	3 Papéis
Etapa 2	6 Papéis
Etapa 3	12 Papéis
Etapa 4	24 Papéis

Fonte: da autora.

Ao fim do experimento, os dados de tempo LPO na saída digital e em TP16 (saída do fotodiodo) foram salvos e processados para obter o valor de concentração de MP2,5. Os dados após o processamento e antes da calibração, podem ser vistos na Fig. 40.

Figura 40 – Curva de concentração de MP2,5, antes da calibração do ponto TP16, durante o experimento a partir da queima de papel.

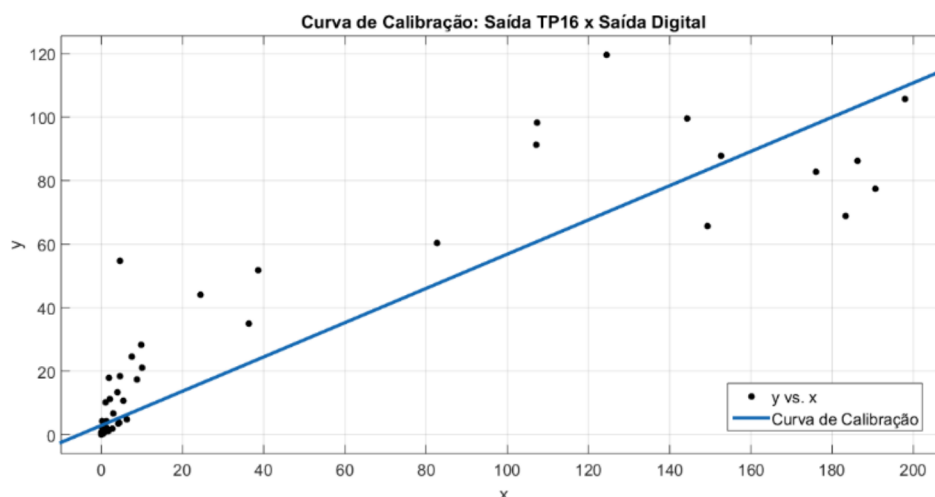


Fonte: da Autora.

Através dos dados de concentração de MP2,5, a saída após o fotodiodo foi calibrada a partir da saída digital. A curva de calibração dos pontos do experimento está exposta na Fig. 41 e é representada pela Eq. 5.3.

$$y = 0,5797x + 1,902 \quad (5.3)$$

Figura 41 – Curva de calibração da saída analógica TP16 a partir da saída digital.



Fonte: da autora.

O experimento foi realizado 3 vezes, repetindo os mesmos passos. Os coeficientes de correlação entre o valor da saída digital e o valor calibrado, de acordo com a Eq. 5.3, para os três experimentos realizados estão listados na Tabela 11.

Tabela 11 – Coeficiente de correlação para os experimentos.

Experimento	Coeficiente de Correlação R^2
Experimento 1	0,9021
Experimento 2	0,9165
Experimento 3	0,9035

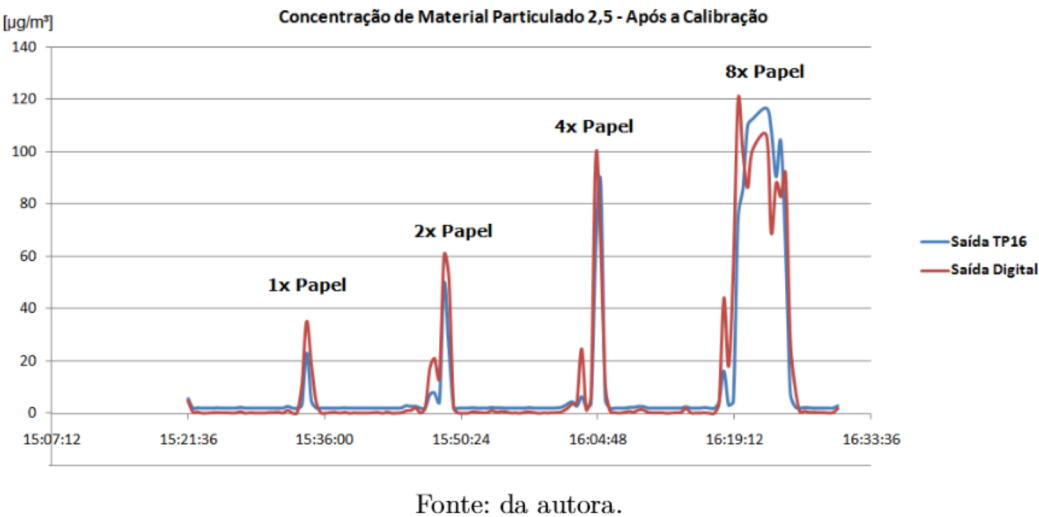
Fonte: da autora.

A curva resultante de concentração de MP2,5 após a calibração dos pontos pode ser vista na Fig. 42.

A redução no consumo de energia do PPD42NS após a substituição dos seus componentes eletrônicos pelo processamento digital foi verificada por simulação, utilizando o *software* Proteus. O consumo total era igual a 90 mA e diminuiu para 84,8 mA, representando uma redução de 5,8%.

As medições analógicas, após a correção nos seus valores de erros sistemáticos, se aproximam bastante do valor da saída digital, possibilitando a eliminação da parte eletrônica do sensor PPD42NS. A substituição pelo processamento digital dos dados contribui para a redução dos custos do sensor, seu tamanho e a necessidade de troca dos componentes físicos, além do consumo de energia.

Figura 42 – Curva de concentração de MP2,5, após da calibração do ponto TP16, durante o experimento a partir da queima de papel.



5.3 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR PARA MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE GASES POLUENTES

Um conjunto de sensores de gás não seletivo pode ser utilizado, com o auxílio de algoritmos de reconhecimento de padrões, para detecção, classificação e cálculo da concentração dos gases. Neste projeto foram selecionados 6 sensores de gases da família MQ, resumidos na Tabela 12. Cada sensor possui sensibilidade a diferentes gases, e utilizou-se uma RNA como ferramenta para reconhecimento de padrões.

Tabela 12 – Sensores de gás da família MQ utilizados no projeto.

Sensor	Descrição
MQ-2	Sensibilidade para detecção de gás GLP (Gás de cozinha), Metano, Propano, Butano, Hidrogênio, Álcool, Gás Natural, outros inflamáveis e fumaça
MQ-4	Sensibilidade para detecção de Gás GLP, Metano e Fumaça
MQ-6	Sensibilidade para detecção Gás GLP, Propano, Isobutano e Gás Natural Liquefeito
MQ-7	Sensibilidade para detecção de Monóxido de Carbono e Metano
MQ-136	Sensibilidade para detecção de Gás Sulfídrico e Monóxido de Carbono
MQ-138	Sensibilidade para detecção de Compostos Orgânicos Voláteis, Aldeídos, Álcool, Cetonas

Fonte: da autora.

5.3.1 Ajuste dos Sensores MQ em Ar Limpo

O procedimento para a ajuste da resistência R_o dos sensores em ambiente considerado com o "ar limpo" está descrito passo a passo pelo pseudocódigo a seguir.

Passo 1: Realizar 500 leituras da saída analógica.

Passo 2: Calcular a média das 500 leituras realizadas.

Passo 3: Calcular o valor analógico de tensão da média calculada no Passo 2.

$$Tensao = Media \cdot \left(\frac{5}{4095}\right)$$

em que 5 equivale à tensão de alimentação dos sensores e 4095 aos 12 bits do processador ATSAM21G18 ARM Cortex M0.

Passo 4: Calcular a resistência do sensor R_s .

Passo 5: Calcular o valor calibrado de R_o em ar limpo, a partir da curva característica de sensibilidade de cada sensor.

Após a leitura dos dados em ambiente sem poluentes atmosféricos, o valor de R_s pode ser calculado pelo divisor resistivo previamente apresentado e então, pela curva de sensibilidade para cada sensor, é possível encontrar o valor de R_o a partir da razão $\frac{R_s}{R_o}$ em ar limpo. Os valores ajustados de R_o para os sensores utilizados neste projeto estão listados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de R_o calibrados em ar limpo para os sensores MQ.

Sensor	Valor R_o
MQ-2	7,6 k Ω
MQ-4	7,3 k Ω
MQ-6	6,2 k Ω
MQ-7	1,5 k Ω
MQ-136	13,1 k Ω
MQ-138	3,1 k Ω

Fonte: da autora.

Após os ajustes nos valores de R_o , é possível prosseguir para a etapa de medição das substâncias odorantes.

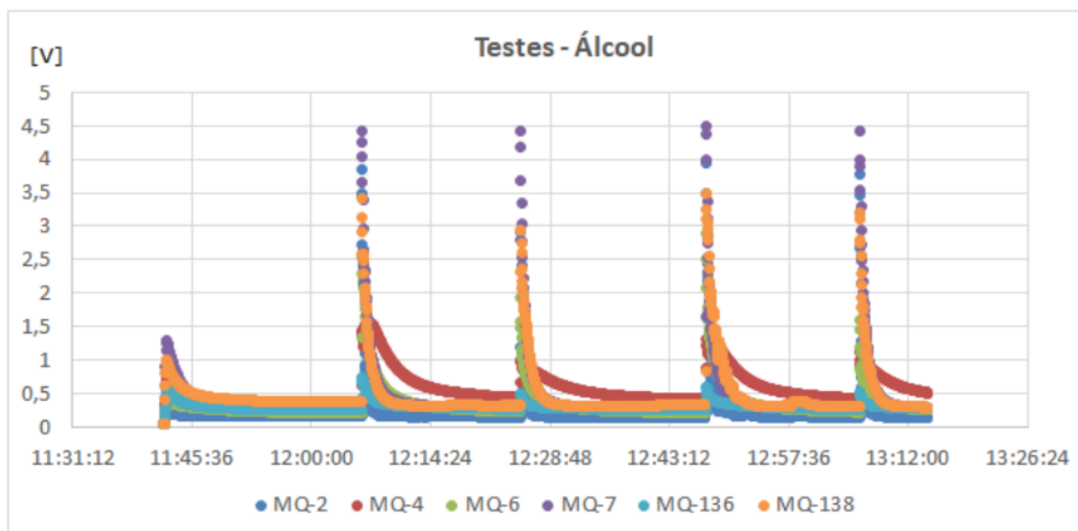
5.3.2 Medição de Substâncias Odorantes e Não Odorantes

Para a medição de substâncias odorantes e não odorantes, é necessário expor os conjunto contendo os seis sensores de gás às substâncias e realizar o seu treinamento e classificação com o auxílio de um algoritmo de reconhecimento de padrões. Os testes

realizados consistiam em borrifar cerca de 5 ml álcool ou água a cada 20 minutos a uma distância de 1 m do ambiente onde os sensores estavam dispostos. Nas Figs. 43 e 44 estão ilustrados testes realizados borrifando álcool e água, respectivamente.

A partir da composição química do álcool etílico (C_2H_5OH), os sensores que apresentam maior sensibilidade à esta substância são o MQ-2 e MQ-138, conforme pode ser observado na Tabela 12. Este procedimento de teste foi um experimento inicial com o intuito de realizar uma avaliação preliminar do nariz eletrônico desenvolvido. Testes e experimentos futuros devem ser realizados para o procedimento de treinamento com gases poluentes, como metano e monóxido de carbono, em laboratórios especializados.

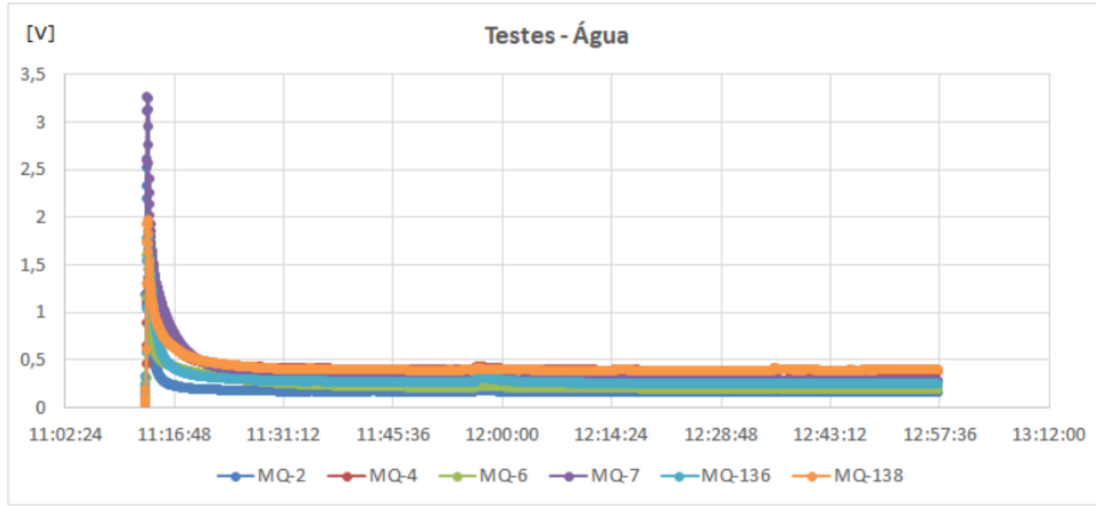
Figura 43 – Testes experimentais com os sensores MQ borrifando álcool a cada 20 minutos no ambiente.



Fonte: da autora.

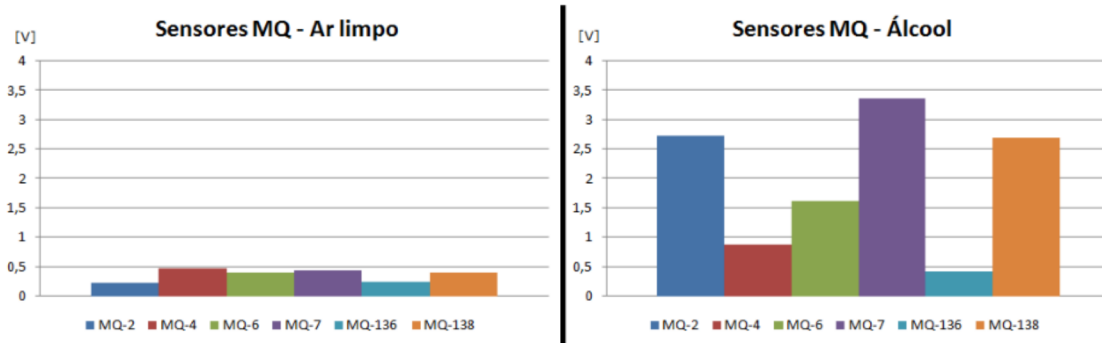
O pico inicial em ambos os testes é referente ao período necessário de aproximadamente 3 minutos para aquecimento. Visualmente, pela Fig. 45, é possível perceber a diferença entre as respostas dos sensores quando é borrifado água ou álcool no ambiente no qual estão inseridos.

Figura 44 – Testes experimentais com os sensores MQ borrifando água no ambiente.



Fonte: da autora.

Figura 45 – Respostas dos sensores MQ em ambiente limpo e com a presença de álcool.



Fonte: da autora.

As amostras de dados dos 6 sensores da família MQ eram adquiridas a cada 3 segundos. Sendo assim, em 1 hora de experimento, por exemplo, a matriz para todos os dados seria de 1200 x 6, onde cada coluna representa uma informação.

$$\text{dados [1200x6]} = \begin{bmatrix} MQ2_1 & MQ4_1 & MQ6_1 & MQ7_1 & MQ136_1 & MQ138_1 \\ MQ2_2 & MQ4_2 & MQ6_2 & MQ7_2 & MQ136_2 & MQ138_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ MQ2_{1200} & MQ4_{1200} & MQ6_{1200} & MQ7_{1200} & MQ136_{1200} & MQ138_{1200} \end{bmatrix}$$

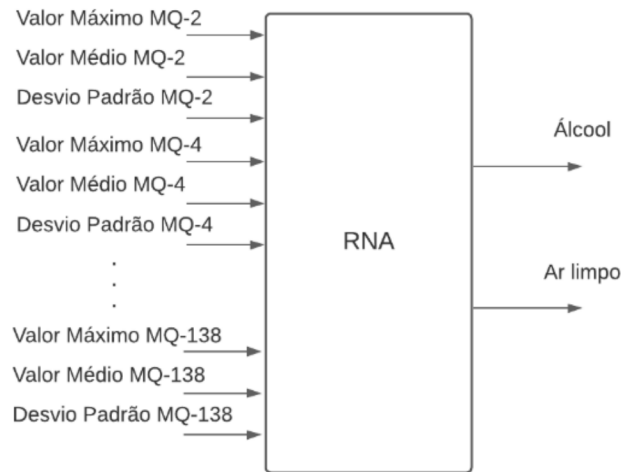
Para realizar a redução na dimensionalidade e redundância, as características selecionadas para análise foram média (MED), valor máximo (MAX) e desvio padrão (STD). Portanto, a matriz de dados foi reduzida para 18 entradas, representando as três

características para cada um dos sensores MQ, e o número de colunas (N) é equivalente ao número de vezes em que o álcool ou água eram borrifados no ambiente e ao período entre as dispersões.

$$\text{dados } [18 \times N] = \begin{bmatrix} MQ2_{max_1} & \dots & MQ2_{max_N} \\ MQ2_{med_1} & \dots & MQ2_{med_N} \\ MQ2_{std_1} & \dots & MQ2_{std_N} \\ MQ4_{max_1} & \dots & MQ4_{max_N} \\ MQ4_{med_1} & \dots & MQ4_{med_N} \\ MQ4_{std_1} & \dots & MQ4_{std_N} \\ MQ6_{max_1} & \dots & MQ6_{max_N} \\ MQ6_{med_1} & \dots & MQ6_{med_N} \\ MQ6_{std_1} & \dots & MQ6_{std_N} \\ \dots & \dots & \dots \\ MQ138_{max_1} & \dots & MQ138_{max_N} \\ MQ138_{med_1} & \dots & MQ138_{med_N} \\ MQ138_{std_1} & \dots & MQ138_{std_N} \end{bmatrix}$$

O número de colunas, após o experimento borrifando álcool e água ter sido repetido diversas vezes, foi igual a 34. O algoritmo de reconhecimento de padrões escolhido para a etapa de treinamento e validação foi a Rede Neural Artificial. A RNA desenvolvida, ilustrada na Fig. 46, é composta pela camada de entrada, equivalente as 3 características principais de cada sensor do conjunto, totalizando em 18 entradas, uma camada escondida contendo 10 neurônios e a camada de saída, que é representada por duas opções: álcool ou água, representando o ar limpo.

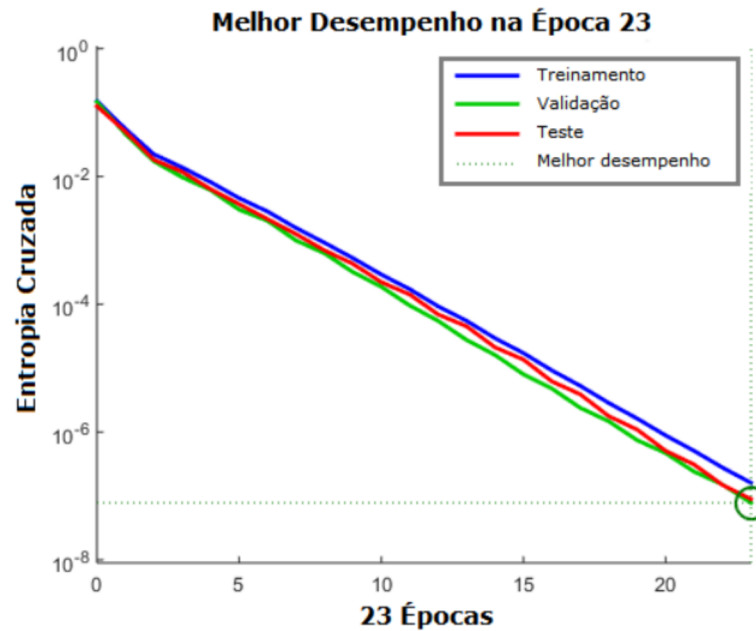
Figura 46 – Entradas e saídas da RNA desenvolvida.



Fonte: da autora.

Os dados foram divididos entre 70% para treinamento, 15% para validação e 15% para teste. O desempenho da Rede Neural Artificial desenvolvida pode ser vista pela Fig. 47.

Figura 47 – Desempenho da Rede Neural Artificial desenvolvida.

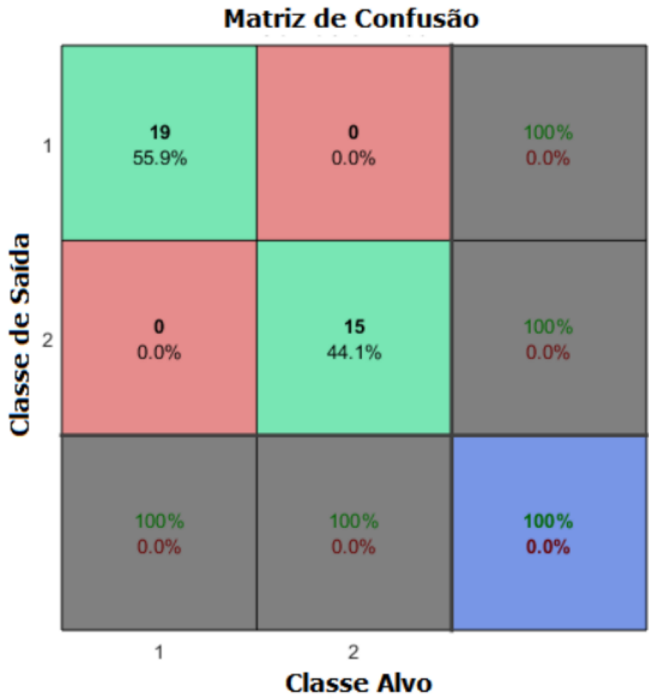


Fonte: da autora.

Na matriz de confusão, vista na Fig. 48, a diagonal principal com as cores verdes expõe os dados que foram corretamente classificados nas categorias álcool ou ar livre de poluentes, e em azul o total de classificações corretas, equivalente a 100%.

Ao utilizar os sensores MQ individualmente, a resposta não é conclusiva pois são sensíveis a diversos outros gases, mas o conjunto de sensores combinado com uma RNA para reconhecimento de padrões conseguiu identificar corretamente todas as vezes que o álcool estava presente no ambiente.

Figura 48 – Matriz de confusão da RNA desenvolvida.



Fonte: da autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação foram apresentados métodos para medição de Material Particulado e gases de efeito estufa, dois dos principais poluentes atmosféricos, as suas fontes de emissão e os impactos à saúde humana e ao meio ambiente. Técnicas de monitoramento em tempo real para estes poluentes são extremamente necessárias para auxiliar no acompanhamento da evolução da qualidade do ar.

As vantagens apresentadas pelo monitoramento a partir de uma Rede de Sensores Sem Fio composta por sensores ambientais incluem o monitoramento remoto em tempo real, o baixo custo, a distribuição espacial e a portabilidade dos dispositivos. Para desenvolver uma RSSF para monitoramento ambiental, pretende-se utilizar a modulação LoRa para comunicação, a qual transmite pequenas taxas de dados com baixa potência em grandes distâncias, dependendo do ambiente. Testes experimentais em ambiente urbano comprovaram a eficácia e robustez da modulação na transmissão dos dados, alcançando até 4 km, porém foi comprovada a influência da vegetação densa nos arredores dos nós sensores, afetando a taxa de recepção de pacotes.

Foi desenvolvido um sensor inteligente portátil e sem fio, o qual é composto pelo sensor ambiental BME680 informando dados de temperatura e umidade, o sensor PPD42NS, fornecendo dados de concentração de $MP_{2,5}$ a partir do espalhamento de luz, como alternativa para equipamentos de referência que utilizam a análise gravimétrica e necessitam trocar os filtros diariamente para a pesagem, e, por fim, um conjunto de sensores não seletivos de gás da família MQ, constituindo um Nariz Eletrônico para a medição de gases nocivos.

Para analisar a qualidade dos dados do PPD42NS, foi realizada a calibração do sensor a partir do equipamento de referência Ecotech HiVol 3000. Visando reduzir o consumo de corrente, a parte eletrônica do PPD42NS foi substituída pelo processamento digital. As correlações lineares em ambos os experimentos alcançaram valores acima de 0,9, ou seja, o baixo custo e a dispensabilidade da troca de filtros diária com o método gravimétrico sugerem que o sensor proposto pode auxiliar na amostragem de $MP_{2,5}$ para o monitoramento da qualidade do ar. Porém, a incerteza de medição apresentou um valor elevado, pois as medições ao longo do dia variaram bastante de acordo com a média diária. O horário com os maiores índices de emissão de poluentes é no turno da manhã e início da tarde, onde há uma maior movimentação de pessoas e veículos, excedendo os limites de nível moderado de poluição do ar.

A medição dos gases nocivos como metano e monóxido de carbono ocorreu a partir do desenvolvimento de um nariz eletrônico, instrumento composto por seis sensores não seletivos e um algoritmo de reconhecimento de padrões a partir de uma RNA para treinamento e validação dos dados. Os experimentos foram realizados borrifando álcool e

água no ambiente onde os sensores estavam inseridos e a resposta dos seis sensores gera um padrão para cada odorante detectado, possibilitando a classificação entre ambiente limpo e álcool. Os dados foram reduzidos escolhendo características principais e a RNA conseguiu classificar os dados com 100% de eficiência.

Sendo assim, os estudos teóricos alertaram para a necessidade do monitoramento da qualidade do ar com distribuição espacial abrangente, por isso os sensores de baixo custo aplicados em uma RSSF se tornam uma ótima alternativa. O sensor inteligente, composto por sensores de medição de material particulado e de gases nocivos, é capaz de fornecer medições em tempo real à população, contribuindo na elaboração de medidas preventivas ambientais.

6.1 PUBLICAÇÕES

- CAMBOIM, Marcelo Miranda et al. An Online Remote Verification System of Thermal Sources for Energy Harvesting Application. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2020.
- VILLARIM, Mariana Rodrigues et al. Calibration of a Low Cost Sensor for PM2.5 using a Reference PM Monitoring Station. In: **6th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances (SEIA)**. IEEE, 2020.
- MEDEIROS, Douglas de Farias et al. Implementation and Analysis of Routing Protocols for LoRa Wireless Mesh Networks. In: **11th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)**. IEEE, 2020.
- MEDEIROS, Douglas de Farias et al. Análise Comparativa entre as Tecnologias LoRa, Zigbee e Wi-Fi utilizando o simulador Cupcarbon. In: **X Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM)**, 2020.
- VILLARIM, Mariana Rodrigues et al. An Evaluation of LoRa Communication Range in Urban and Forest Areas: A Case Study in Brazil and Portugal. In: **2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)**. IEEE, 2019. p. 0827-0832.
- VILLARIM, Mariana Rodrigues et al. LoRa Performance Assessment in Dense Urban and Forest Areas for Environmental Monitoring. In: **2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)**. IEEE, 2019. p. 1-5.
- DE LUNA, João Vitor Holanda et al. Computation-Time and Mean-Squared-Error Trade-off of Calibration Curves for Electrical Soil Conductivity Smart Sensor. In:

2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). IEEE, 2019. p. 1-5.

REFERÊNCIAS

- ADAFRUIT. Datasheet Adafruit Feather M0 Radio with LoRa Radio Module. 2019b. Disponível em: <<https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-feather-m0-radio-with-lora-radio-module.pdf>>.
- ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 55, n. 9, p. 34–40, 2017.
- AHMED, S. T.; CHAICHAN, M. T. A study of free convection in a solar chimney model. *Engineering and Technology Journal*, University of Technology, v. 29, n. 14, p. 2986–2997, 2011.
- ALLEN, T. De-construction of the shinyei ppd42ns dust sensor. *no*, v. 510, p. 0–3, 2002.
- ALLIANCE, L. A technical overview of lora and lorawan. *White Paper*, 2015.
- ALMEIDA, I. T. d. *A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 1999.
- AMARAL, S. S. et al. An overview of particulate matter measurement instruments. *Atmosphere*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 9, p. 1327–1345, 2015.
- ARROYO, P. et al. Wireless sensor network combined with cloud computing for air quality monitoring. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 3, p. 691, 2019.
- AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.
- AUSTIN, E. et al. Laboratory evaluation of the shinyei ppd42ns low-cost particulate matter sensor. *PloS one*, Public Library of Science, v. 10, n. 9, 2015.
- BHATTACHARYA, S.; SRIDEVI, S.; PITCHIAH, R. Indoor air quality monitoring using wireless sensor network. In: IEEE. *2012 Sixth International Conference on Sensing Technology (ICST)*. [S.l.], 2012. p. 422–427.
- BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. *Absorption and scattering of light by small particles*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- BOTKIN, D. B.; KELLER, E. A. et al. *Environmental science: earth as a living planet*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- BREUER, D.; BOWER, J. *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*. [S.l.]: WHO Regional Office Europe, 1999. v. 85.
- CANU, M. et al. Understanding the shinyei ppd24ns low-cost dust sensor. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE)*. [S.l.], 2018. p. 1–10.
- CASTELL, N. et al. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment international*, Elsevier, v. 99, p. 293–302, 2017.

- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- CETESB. *Padrões de Qualidade do Ar*. 2020. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- CHEN, J. et al. Freshness evaluation of three kinds of meats based on the electronic nose. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 3, p. 605, 2019.
- COSTA, A. et al. Evaluating an e-nose ability to detect biogas plant efficiency: a case study. *Italian Journal of Animal Science*, Taylor & Francis, v. 15, n. 1, p. 116–123, 2016.
- D'AMATO, G. et al. Urban air pollution and climate change as environmental risk factors of respiratory allergy: an update. *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, v. 20, n. 2, p. 95–102, 2010.
- DENTONI, L. et al. Development of an electronic nose for environmental odour monitoring. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 11, p. 14363–14381, 2012.
- DEY, A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering: B*, Elsevier, v. 229, p. 206–217, 2018.
- DOMINICI, F. et al. Protecting human health from air pollution: shifting from a single-pollutant to a multi-pollutant approach. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, NIH Public Access, v. 21, n. 2, p. 187, 2010.
- DRAGONIERI, S. et al. Electronic nose technology in respiratory diseases. *Lung*, Springer, v. 195, n. 2, p. 157–165, 2017.
- ECOTECH. *HiVol 3000 High Volume Air Sampler*. [S.l.], 2013. Version 1.8.
- ENACHE, D. et al. Residual water burst detection using wsn measurements and cloud analysis. In: IEEE. *2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. [S.l.], 2018. p. 926–931.
- EPA. *Selection, Preparation and Extraction of Filter Materials*. Revised september 27, 2011. [S.l.], 1999. United States Environmental Protection Agency. Compendium Method IO-3.1.
- _____. *Reference and Equivalent Method Applications - GUIDELINES FOR APPLICANTS*. [S.l.], 2011. US Patent 5,129,098. United States Environmental Protection Agency.
- EPA. *Particulate Matter (PM) Basics*. 2020. United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- FENG, S. et al. Review on smart gas sensing technology. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 17, p. 3760, 2019.
- FIRDAUS, R.; MURTI, M. A.; ALINURSAFA, I. Air quality monitoring system based internet of things (iot) using lpwan lora. In: IEEE. *2019 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IoT&IS)*. [S.l.], 2019. p. 195–200.

- GARCÍA, S. et al. Heterogeneous lora-based wireless multimedia sensor network multiprocessor platform for environmental monitoring. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 16, p. 3446, 2019.
- GIECHASKIEL, B. et al. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number. *Journal of Aerosol Science*, Elsevier, v. 67, p. 48–86, 2014.
- GIUNGATO, P. et al. Improving recognition of odors in a waste management plant by using electronic noses with different technologies, gas chromatography–mass spectrometry/olfactometry and dynamic olfactometry. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 133, p. 1395–1402, 2016.
- GRIMM. *Environmental Dust Monitor for Approved PM Measurements EDM 180*. [S.l.], 2019. 2 p. Disponível em: <<https://www.grimm-aerosol.com/fileadmin/files/grimm-aerosol/3/%20Products/Environmental%20Dust/%20Monitoring/Approved%20PM/%20Monitor/EDM180/Product/%20PDFs/EDM%20180.pdf>>.
- GROVE. *Grove - Dust Sensor (PPD42NS)*. 2020. Disponível em: <<https://www.seecstudio.com/Grove-Dust-Sensor-PPD42NS.html>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- HANWEI SENSORS. Technical Data MQ-6 Gas Sensor. 2020. Disponível em: <<https://datasheetspdf.com/pdf-file/699271/HANWEI/MQ6/1>>.
- HAXHIBEQIRI, J. et al. Lora indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study. In: IEEE. *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017 22nd IEEE International Conference on*. [S.l.], 2017. p. 1–8.
- HERING, S. V. Impactors, cyclones, and other inertial and gravitational collectors. *Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants*, American Conference of Governmental Industrial Hygienists Cincinnati, OH, v. 8, p. 279–321, 1995.
- HERNANDEZ, D. M. et al. Energy and coverage study of LPWAN schemes for Industry 4.0. *Proceedings of the 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2017*, 2017.
- IOVA, O. et al. Lora from the city to the mountains: Exploration of hardware and environmental factors. In: . [S.l.: s.n.], 2017.
- JASINSKI, G. et al. Evaluation of the electronic nose used for monitoring environmental pollution. In: IEEE. *2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE)*. [S.l.], 2018. p. 1–4.
- JIAO, W. et al. Community air sensor network (cairsense) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern united states. *Meas. Tech*, v. 9, n. 11, p. 5281–5292, 2016.
- LEE, J. et al. Secure three-factor authentication protocol for multi-gateway iot environments. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 10, p. 2358, 2019.
- LEE, J. Y. et al. Seasonal variation of particle size distributions of pahs at seoul, korea. *Air Quality, Atmosphere & Health*, Springer, v. 1, n. 1, p. 57–68, 2008.

- LI, Z. et al. Advances in designs and mechanisms of semiconducting metal oxide nanostructures for high-precision gas sensors operated at room temperature. *Materials Horizons*, Royal Society of Chemistry, v. 6, n. 3, p. 470–506, 2019.
- LIU, X. et al. A survey on gas sensing technology. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 12, n. 7, p. 9635–9665, 2012.
- MALCHE, T.; MAHESHWARY, P.; KUMAR, R. Environmental monitoring system for smart city based on secure internet of things (iot) architecture. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 107, n. 4, p. 2143–2172, 2019.
- MAYER, H. Air pollution in cities. *Atmospheric environment*, Elsevier, v. 33, n. 24-25, p. 4029–4037, 1999.
- MCGIRR, A. E.; CASSIDY, B. J. *Radio telephone using received signal strength in controlling transmission power*. [S.l.]: Google Patents, 1992. US Patent 5,129,098.
- MEDEIROS, D. d. F. et al. Implementation and analysis of routing protocols for lora wireless mesh networks. In: IEEE. *2020 IEEE 11th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. [S.l.], 2020.
- MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT express*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.
- NAJJAR, Y. S. Gaseous pollutants formation and their harmful effects on health and environment. *Innovative energy policies*, v. 1, p. 1–9, 2011.
- NOBLE, C. A. et al. Federal reference and equivalent methods for measuring fine particulate matter. *Aerosol Science & Technology*, Taylor & Francis, v. 34, n. 5, p. 457–464, 2001.
- NOREEN, U.; BOUNCEUR, A.; CLAVIER, L. A study of lora low power and wide area network technology. p. 1–6, 2017.
- NUSSBAUMER, T. et al. Particulate emissions from biomass combustion in iea countries. *Survey on Measurements and Emission Factors, International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task*, v. 32, 2008.
- OLATINWO, S. O.; JOUBERT, T.-H. Enabling communication networks for water quality monitoring applications: a survey. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 100332–100362, 2019.
- PATEL, N. R.; KUMAR, S. Wireless sensor networks’ challenges and future prospects. In: IEEE. *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*. [S.l.], 2018. p. 60–65.
- PIEDRAHITA, R. et al. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, Copernicus GmbH, v. 7, n. 10, p. 3325–3336, 2014.
- POPE, C. A. et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation*, Am Heart Assoc, v. 109, n. 1, p. 71–77, 2004.
- QUEENSLAND GOVERNMENT. *High and low volume air samplers*. 2020. Disponível em: <<https://www.qld.gov.au/environment/pollution/monitoring/air/air-monitoring/measuring/samplers>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

- RAI, P. K. Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and environmental safety*, Elsevier, v. 129, p. 120–136, 2016.
- RAVEN, P. H.; BERG, L. R.; HASSENZAHN, D. M. *Environment*. [S.l.: s.n.], 2012.
- SAINI, J.; DUTTA, M.; MARQUES, G. Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 14, p. 4942, 2020.
- SANAEIFAR, A. et al. Development and application of a new low cost electronic nose for the ripeness monitoring of banana using computational techniques (pca, lda, simca and svm). *Czech Journal of Food Sciences*, v. 32, n. 6, p. 538–548, 2014.
- SANCHEZ-IBORRA, R. et al. Performance evaluation of lora considering scenario conditions. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 3, p. 772, 2018.
- SCHWARZE, P. et al. Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. *Human & experimental toxicology*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 25, n. 10, p. 559–579, 2006.
- SHINYEI. *Particle Sensor Model PPD42NS*. [S.l.], 2010. Version 1.8.
- SINGH, M. K. et al. A survey of wireless sensor network and its types. In: IEEE. *2018 International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)*. [S.l.], 2018. p. 326–330.
- SOUZA, C. P. et al. On harvesting energy from tree trunks for environmental monitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 12, n. 6, p. 9383765, 2016.
- SPARKFUN. *LPG Gas Sensor - MQ-6*. 2020. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/9405>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- SPRINGER, A. et al. Spread spectrum communications using chirp signals. In: IEEE. *IEEE/AFCEA EUROCOMM 2000. Information Systems for Enhanced Public Safety and Security (Cat. No. 00EX405)*. [S.l.], 2000. p. 166–170.
- STOICA, P.; MOSES, R. L. et al. Spectral analysis of signals. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2005.
- SZULCZYŃSKI, B. et al. Determination of odour interactions in gaseous mixtures using electronic nose methods with artificial neural networks. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 2, p. 519, 2018.
- _____. Different ways to apply a measurement instrument of e-nose type to evaluate ambient air quality with respect to odour nuisance in a vicinity of municipal processing plants. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 11, p. 2671, 2017.
- TADAYONI, R.; HENTEN, A.; FALCH, M. Internet of things—the battle of standards. In: IEEE. *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*. [S.l.], 2017. p. 1–7.

- TAYLOR, R. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *Journal of diagnostic medical sonography*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 6, n. 1, p. 35–39, 1990.
- TITTARELLI, A. et al. Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter. *Atmospheric Environment*, Elsevier, v. 42, n. 36, p. 8543–8548, 2008.
- TRIPATHI, A. et al. Coverage and connectivity in wsns: A survey, research issues and challenges. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 26971–26992, 2018.
- TSAKALIDES, P. et al. *Smart Water Grids: A Cyber-Physical Systems Approach*. [S.l.]: CRC Press, 2018.
- TZORTZAKIS, K.; PAPAFOOTIS, K.; SOTIRIADIS, P. P. Wireless self powered environmental monitoring system for smart cities based on lora. In: IEEE. *2017 Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET)*. [S.l.], 2017. p. 1–4.
- VINCENT, J. H. *Aerosol sampling: science, standards, instrumentation and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- WANG, C. et al. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors. *Sensors, Molecular Diversity Preservation International*, v. 10, n. 3, p. 2088–2106, 2010.
- WANG, Y. et al. Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement. *Aerosol Science and Technology*, Taylor & Francis, v. 49, n. 11, p. 1063–1077, 2015.
- WHO. Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. World Health Organization, 2016.
- WHO. *Ambient air pollution: a major threat to health and climate*. 2018. World Health Organization. Disponível em: <<https://www.who.int/airpollution/ambient/en/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- WRI. *Veja onde é feito o monitoramento da qualidade do ar no Brasil*. 2019. World Resources Institute - Brasil. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/06/veja-onde-e-feito-o-monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-brasil>>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- XU, Y. et al. Research on a mixed gas recognition and concentration detection algorithm based on a metal oxide semiconductor olfactory system sensor array. *Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 18, n. 10, p. 3264, 2018.
- YAN, J. et al. Electronic nose feature extraction methods: A review. *Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, v. 15, n. 11, p. 27804–27831, 2015.
- ZHANG, X.; CHEN, X.; ZHANG, X. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 115, n. 37, p. 9193–9197, 2018.