

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANNA GONÇALVES DIAS CHAVES

VIABILIDADE DO SENSOR DE BAIXO CUSTO SDS011 PARA MONITORAMENTO  
DE MATERIAL PARTICULADO

CURITIBA

2021

MARIANNA GONÇALVES DIAS CHAVES

VIABILIDADE DO SENSOR DE BAIXO CUSTO SDS011 PARA MONITORAMENTO  
DE MATERIAL PARTICULADO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Emílio G. F. Mercuri

Coorientador: Dr. André Luciano Malheiros

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

C512v Chaves, Marianna Gonçalves Dias

Viabilidade do sensor de baixo custo SDS011 para monitoramento de material particulado [recurso eletrônico] / Marianna Gonçalves Dias Chaves – Curitiba, 2021.

Dissertação - Programa de Pós-Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Emílio G. F. Mercuri  
Coorientador: Dr. André Luciano Malheiros

1. Qualidade do ar - monitoramento. 2. Sensoriamento remoto. I. Mercuri, Emílio G. F. II. Malheiros, André Luciano. III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 333.9

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB-9/1563



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARIANNA GONÇALVES DIAS CHAVES** intitulada: **Viabilidade do sensor de baixo custo SDS011 para monitoramento de material particulado**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 13 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

28/11/2021 10:51:07.0

EMILIO GRACILIANO FERREIRA MERCURI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

29/11/2021 08:13:13.0

ANDREAS FRIEDRICH GRAUER

Avaliador Externo (PPGMAUI)

Assinatura Eletrônica

29/11/2021 15:07:20.0

FLÁVIA DE PAULA VITORETTI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE)

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O uso de sensores de baixo custo tem se mostrado uma possibilidade para a expansão das redes de monitoramento da qualidade do ar ou até mesmo para a criação de novas redes, fornecendo dados que são importantes para a conscientização da população sobre a poluição atmosférica e para o controle das emissões. Esses sensores representam uma tecnologia ainda em desenvolvimento, e surgiram em uma grande gama de modelos e fabricantes, tornando portanto necessário seu estudo e análise em relação a equipamentos de referência usados no monitoramento regulamentar. O sensor SDS011, que mede a concentração de material particulado, tem tido desempenho em destaque em relação a outros modelos disponíveis e foi o escolhido para este estudo de comparação que utilizou o impactador *Harvard*, o monitor de atenuação Beta BAM1020 e o instrumento de microbalança oscilante TEOM para análise. Foram realizadas medições nas cidades de Curitiba, Joinville e Ponta Grossa, sendo avaliados as variações e erros do sensor, o armazenamento e upload de dados através do uso do *Raspberry Pi* e suas potenciais aplicações para uso no monitoramento da concentração de material particulado. A análise feita em laboratório, com o uso do TEOM para comparação dos dados, forneceu uma inter variabilidade menor do que 3% para o modelo do sensor SDS011. O monitoramento feito em Ponta Grossa incluiu dados de temperatura e umidade relativa, permitindo a construção de gráficos que mostram a distribuição das concentrações de material particulado conforme a variação desses dados. O sensor mostrou desempenho variado nas diferentes condições de instalação e do monitoramento em campo, apresentando correlações desde fracas até forte, tendo sido a melhor encontrada na comparação com o TEOM (com valor de  $R^2$  igual a 0,69) e a pior na comparação com o BAM1020 ( $R^2$  igual a 0,10). Além da correlação entre os resultados das leituras do sensor e as dos equipamentos, foi feito um ajuste linear que permitiu obter as equações das retas ajustadas e analisar o desvio e a existência de erros de viés encontrados em cada monitoramento e uma análise da completude dos dados obtidos, que foi maior que 50% em todas as comparações.

Palavras-chave: Sensor de baixo custo. Material particulado. Monitoramento da qualidade do ar. *Raspberry Pi*.

## ABSTRACT

The use of low-cost sensors has been proven to be a possibility for the expansion of air quality monitoring networks or even the creation of new ones, providing data that are important for the awareness of the population about air pollution and for the control of emissions. These sensors represent a technology still under development, and have emerged within a wide range of models and manufacturers, thus making it necessary to study and analyze them in relation to reference equipment used in regulatory monitoring. The SDS011 sensor, which measures the concentration of particulate matter, has performed prominently compared to other available models and was the one chosen for this comparison study that used the Harvard impactor, the Beta attenuation monitor BAM1020 and the Tapered element oscillating microbalances (TEOM) for analysis. Measurements were carried out in the cities of Curitiba, Joinville and Ponta Grossa evaluating sensor variations and errors, data storage and upload through the use of Raspberry Pi and its potential applications for use in particulate matter concentration monitoring. The analysis performed in laboratory, using TEOM for data comparison, provided an inter variability of less than 3% for the SDS011 sensor model. The monitoring carried out in Ponta Grossa included temperature and relative humidity information, allowing the creation of graphs that showed the distribution of particulate matter concentrations according to the variation of this information. The sensor showed variable performance in different conditions of installation and field monitoring, presenting correlations from weak to strong, being the best correlation found in the comparison with TEOM (with  $R^2$  value equal to 0.69) and the worst in the comparison with BAM1020 ( $R^2$  equal to 0.10). In addition to the correlation between the results of sensor and equipment readings, a linear adjustment was made to obtain the equations of the adjusted lines and analyze the deviation and the existence of bias errors detected in each monitoring and also an analysis of the data completeness, which was greater than 50% in all comparisons.

Keywords: Low-cost sensor. Particulate matter. Air quality monitoring. Raspberry Pi.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EXEMPLO DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS.....	21
FIGURA 2 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO <i>RASPBERRY PI</i> .....	36
FIGURA 3 - CONEXÕES PARA O USO DO <i>RASPBERRY PI</i> .....	37
FIGURA 4 - INTERFACE <i>DESKTOP</i> MOSTRANDO A) OS ACESSÓRIOS INSTALADOS NA <i>RASPIAN</i> E B) O TERMINAL/PROMPT DE COMANDO.....	37
FIGURA 5 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DO SENSOR SDS011.....	39
FIGURA 6 - RESPOSTA DO DETECTOR QUANDO UMA PARTÍCULA PASSA PELA CÂMARA DE AMOSTRAGEM DE UM SENSOR ÓPTICO.....	40
FIGURA 7 - CONEXÃO DO SENSORES AO <i>RASPBERRY PI</i> .....	51
FIGURA 8 - EXEMPLO DE ARQUIVO DE TEXTO GERADO PARA DADOS DO SENSOR SDS011.....	52
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS.....	53
FIGURA 10 - DISPOSIÇÃO DOS SENSORES TESTADOS.....	54
FIGURA 11 - DIAGRAMA DO IMPACTADOR <i>HARVARD</i> .....	55
FIGURA 12 - CIDADE DE JOINVILLE, LOCAL DE MONITORAMENTO E ZONA INDUSTRIAL.....	56
FIGURA 13 - IMPACTADOR <i>HARVARD</i> , ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E SENSOR SDS011 FIXADOS NO LOCAL DE MONITORAMENTO.....	57
FIGURA 14 - GABINETE QUE ABRIGA O TABLET DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E O <i>RASPBERRY PI</i> .....	58
FIGURA 15 - MONITOR DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO BETA MODELO bam1020.....	59
FIGURA 16 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DO BAM1020.....	60
FIGURA 17 - ENTRADA DE AR DO EQUIPAMENTO NA PARTE SUPERIOR DO CONTAINER.....	61
FIGURA 18 - POSIÇÃO DOS SENSORES EM RELAÇÃO À ENTRADA DE AR DO BAM1020.....	61
FIGURA 19 - <i>RASPBERRY PI</i> DENTRO DO CONTAINER DA ESTAÇÃO.....	61
FIGURA 20 - EQUIPAMENTO TEOM NO LABORATÓRIO DA UFPR.....	63
FIGURA 21 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES EM RELAÇÃO À ENTRADA DE AR DO TEOM.....	64

FIGURA 22 - DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE MP10 DOS SENSORES ANALISADOS.....	69
FIGURA 23 - DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE MP2,5 DOS SENSORES ANALISADOS.....	69
FIGURA 24 - DADOS POR MINUTO E MÉDIAS DIÁRIAS DO SENSOR SDS11 DESCONSIDERANDO VALORES NO LIMITE DE DETECÇÃO DO SENSOR.....	71
FIGURA 25 - MÉDIAS DIÁRIAS DO SDS011 E DO IMPACTADOR HARVARD DESCONSIDERANDO VALORES NO LIMITE DE DETECÇÃO DO SENSOR.....	72
FIGURA 26 - CORRELAÇÃO E AJUSTE LINEAR DOS DADOS DO SDS011 E DO IMPACTADOR HARVARD.....	73
FIGURA 27 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO IMPACTADOR HARVARD E DOS DADOS AJUSTADOS DO SENSOR SDS011.....	74
FIGURA 28 - MÉDIAS POR MINUTO DOS DADOS DOS SENSORES SDS011.....	75
FIGURA 29 - MÉDIAS HORÁRIAS DO SDS011 E DO BAM1020 NO PERÍODO SELECIONADO.....	76
FIGURA 30 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO AS MÉDIAS HORÁRIAS.....	77
FIGURA 31 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS HORÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A TEMPERATURA LOCAL.....	78
FIGURA 32 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS HORÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A UMIDADE LOCAL.....	78
FIGURA 33 - MÉDIAS DIÁRIAS VÁLIDAS DO SENSOR SDS011 E DO BAM1020.	79
FIGURA 34 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DIÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO AS MÉDIAS DIÁRIAS SEM E COM AJUSTE DA ESCALA.....	80
FIGURA 35 - CORRELAÇÕES DOS DADOS DIÁRIOS DO BAM1020 E DOS DADOS AJUSTADOS DOS SENSORES SDS011.....	80
FIGURA 36 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS DIÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A TEMPERATURA LOCAL.....	81
FIGURA 37 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS DIÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A UMIDADE LOCAL.....	81
FIGURA 38 - MÉDIAS POR MINUTO DOS DADOS DOS SENSORES SDS011.....	83
FIGURA 39 - MÉDIAS POR MINUTO DO SDS011 E DO BAM1020 NO PERÍODO SELECIONADO.....	83

FIGURA 40 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS POR MINUTO.....	84
FIGURA 41 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS HORÁRIAS.....	85
FIGURA 42 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS DE 6 HORAS.....	85
FIGURA 43 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS A CADA 12 HORAS.....	86
FIGURA 44 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS DIÁRIAS.....	86
FIGURA 45 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO TEOM E DOS DADOS AJUSTADOS DO PRIMEIRO SENSOR SDS011.....	87
FIGURA 46 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO TEOM E DOS DADOS AJUSTADOS DO SEGUNDO SENSOR SDS011.....	88
FIGURA 47 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO TEOM E DOS DADOS AJUSTADOS DO TERCEIRO SENSOR SDS011.....	88

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TEMPO MÍNIMO DE AMOSTRAGEM PARA QUE OS DADOS SEJAM CONSIDERADOS REPRESENTATIVOS.....	25
---	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PADRÕES DE QUALIDADE DO AR.....	19
TABELA 2 - ESTRUTURA DO ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR.....	19
TABELA 3 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS OBTIDOS EM OUTROS ESTUDOS..	41
TABELA 4 - SUGESTÕES DE OBJETIVOS DE PERFORMANCE PARA DIFERENTES APLICAÇÕES DO USO DE SENSORES EM COMPARAÇÃO COM EQUIPAMENTOS DE REFERÊNCIA.....	47
TABELA 5 - IDENTIFICAÇÃO DOS SENSORES CONFORME NÚMERO DE SÉRIE. .....	53
TABELA 6 - CUSTO DOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA MONTAGEM DO SISTEMA.....	67
TABELA 7 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS CALCULADOS EM DIFERENTES INTERVALOS.....	84
TABELA 8 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS COMPARAÇÕES DO SDS011.....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AED	- <i>Aerodynamic equivalent diameter</i>
AQI	- <i>Air Quality Index</i>
APPA	- Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina
API	- <i>Application Programming Interface</i>
BAM	- <i>Beta Attenuation Monitor</i>
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DQI	- <i>Data Quality Indicators</i>
E-BAM	- <i>Environmental Beta Attenuation Monitor</i>
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i>
GND	- <i>Graduated Neutral Density Filter</i>
GPIO	- <i>General Purpose Input/Output</i>
GB	- Gigabyte
HDMI	- <i>High Definition Multi-media Interface</i>
IAP	- Instituto Ambiental do Paraná
IAT	- Instituto Água e Terra
IMA	- Instituto do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina
IQAr	- Índice da Qualidade do Ar
kB	- Quilobyte
MAT	- <i>Macro Analysis Tool</i>
MB	- Megabyte
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MP	- Material Particulado
NC	- <i>Not connected</i>
NCA	- <i>National Competent Authority</i>
OMS	- Organização Mundial da Saúde
PF	- Padrão de qualidade do ar final
PI	- Padrões de qualidade do ar intermediários
PRONAR	- Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
PTFE	- Politetrafluoretileno
PTS	- Partículas totais em suspensão
SD	- <i>Secure Digital</i>
TEOM	- <i>Tapered Element Oscillating Microbalance</i>
UART	- <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>
HDMI	- <i>High Definition Multi-media Interface</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu$	- micro
\$	- cifrão
CO	- Monóxido de Carbono
SO <sub>2</sub>	- Dióxido de Enxofre
NO <sub>2</sub>	- Dióxido de Nitrogênio
O <sub>3</sub>	- Ozônio
R <sup>2</sup>	- Coeficiente de Determinação
MAE	- <i>Mean Absolute Error</i>
MBE	- <i>Mean Bias Error</i>
RMSE	- <i>Root Mean Squared Error</i>
nRSME	- <i>normalized Root Mean Squared Error</i>
k $\Omega$	- Quilohm
V	- Volts

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1 QUALIDADE DO AR.....	17
2.1.1 Material Particulado.....	20
2.1.2 Monitoramento da qualidade do ar.....	22
2.2 MÉTODOS DE REFERÊNCIA E MÉTODOS EQUIVALENTES PARA O MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO.....	25
2.3 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS.....	28
2.3.1 Inter variabilidade.....	28
2.3.2 Completude/Integridade dos Dados.....	29
2.3.3 Correlação.....	30
2.3.4 Coeficiente de determinação $R^2$ .....	31
2.3.5 Viés.....	31
2.3.6 Precisão e acurácia.....	32
2.3.7 Erro médio e Raiz do erro quadrático médio.....	33
2.4 PLATAFORMA E SENSOR DE BAIXO CUSTO.....	35
2.4.1 Raspberry Pi.....	35
2.4.2 Sensor óptico de material particulado modelo SDS011.....	39
2.4.3 Potencialidades e relevância do uso de sensores de baixo custo para monitoramento do material particulado.....	43
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>49</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO E COLOCAÇÃO DOS SENSORES.....	49
3.2 CONEXÃO DOS SENSORES E CONFIGURAÇÃO DO RASPBERRY PI.....	50
3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS.....	51
3.4 ANÁLISE DA INTER VARIABILIDADE DO SENSOR SDS011.....	53
3.5 COMPARAÇÃO SDS011 E IMPACTADOR HARVARD.....	54
3.6 COMPARAÇÃO SDS011 E BAM1020.....	59
3.7 COMPARAÇÃO SDS011 E TEOM.....	62

3.8 ANÁLISE DOS DADOS E COMPARAÇÃO.....	65
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>67</b>
4.1 CUSTO DO SISTEMA.....	67
4.2 ARQUIVOS GERADOS E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO.....	67
4.3 INTER VARIABILIDADE.....	68
4.4 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DE DADOS.....	70
4.5 COMPARAÇÃO SDS011 E IMPACTADOR HARVARD.....	70
4.6 COMPARAÇÃO SDS011 E BAM1020.....	75
4.7 COMPARAÇÃO SDS011 E TEOM.....	82
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>
.....	92
<b>APÊNDICE 1 – CÓDIGO PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS DO SENSOR SDS011</b>	
.....	100
<b>APÊNDICE 2 – CÓDIGO PARA A TRANSMISSÃO DOS ARQUIVOS GERADOS</b>	
<b>NA AQUISIÇÃO DOS DADOS.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO I – PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO UART.....</b>	<b>104</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar tem sido um problema presente nos grandes centros urbanos, sobretudo em áreas altamente industrializadas e com grande volume de veículos. Essa poluição se espalha pelas cidades, afetando sua população e gerando problemas de saúde relacionados à penetração das partículas de poluentes no sistema respiratório e circulatório, com más consequências ao funcionamento dos pulmões, coração e até mesmo do cérebro (BARTH WAL; ACHARYA, 2018; COHEN et al., 2005). Ainda dentro desse cenário, estima-se que 7 milhões de pessoas morram por ano em decorrência dos efeitos da poluição atmosférica, número esse que tende a aumentar em se não houver expansão do uso de tecnologias limpas e do controle das emissões (OMS, 2020).

Para que haja o controle das emissões é necessário garantir o monitoramento com informações sobre a qualidade do ar e os tipos de poluentes presentes. Atualmente este monitoramento é feito através de estações fixas que possuem equipamentos certificados quanto ao seu desempenho, sendo altamente precisos e capazes de medir uma ampla gama de poluentes, porém que envolvem alto custo de instalação e manutenção e ainda possuem limitações em relação à sua distribuição espacial e à publicação dos dados das amostragens (BLAKE; POPE; GATARI, 2018; JOHNSTON et al., 2019).

No Brasil existem em torno de 250 estações de monitoramento num total de mais de 5500 municípios, sendo que as redes de monitoramento – que contam com um conjunto de estações fixas e móveis – estão presentes em apenas 1,7% das cidades (AGUIAR et al., 2015). O Ministério do Meio Ambiente relata a implantação da Rede Nacional de Monitoramento e o desenvolvimento do Sistema Nacional do Monitoramento da Qualidade do Ar como formas de melhoria na gestão da qualidade do ar no Brasil (MMA, 2020). No entanto, para que tais objetivos sejam atingidos é necessário que os Estados estejam comprometidos em controlar as emissões atmosféricas, o que não será possível sem a expansão das redes de monitoramento nas cidades.

Visando diminuir os gastos com equipamentos de monitoramento, aumentar o número de estações existente e possibilitar a criação de novas redes de monitoramento, têm surgido sensores de baixo custo a serem implementados com auxílio de outros recursos da tecnologia da informação, como as plataformas

Arduino e Raspberry Pi (MACEDO; VARGAS-CUENTAS, 2018; PU'AD et al., 2018). Enquanto os equipamentos de referência podem custar mais de 10000 dólares (U\$), o preço dos sensores de baixo custo varia entre menos de U\$50 até U\$1000 (LEVY ZAMORA et al., 2018). Existem sensores para a análise de gases contidos no ar como o monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, metano, entre outros, e também para a análise da concentração de material particulado (MP) (BANERJEE et al., 2019). O material particulado é classificado de acordo com o seu tamanho de partículas, sendo  $MP_{2,5}$  referente à partículas com diâmetro de até 2,5 micrômetros ( $\mu m$ ) e  $MP_{10}$  à partículas com tamanho de até 10  $\mu m$  (TAGLE et al., 2020). Tanto os sensores de gases quanto de material particulado precisam estar conectados a um processador para a leitura, processamento e conversão do sinal emitidos e a recursos de armazenamento ou conectividade para armazenamento e envio dos dados processados.

A expansão do interesse e do uso de sensores de baixo custo tem sido evidente em trabalhos recentes nos quais os autores comparam os diversos modelos e fabricantes existentes (BADURA et al., 2018a; JOHNSTON et al., 2019). A principal justificativa para seu uso é que além de ser uma alternativa barata e de fácil instalação e manutenção, ainda envolve baixo consumo de energia e possibilita um monitoramento em tempo real (BINSY; SAMPATH, 2019; PARMAR et al., 2018). Por outro lado, poucos estudos dão enfoque ao uso de ferramentas de conectividade que possibilitem a divulgação dos dados e ainda há um questionamento – sobretudo por parte das agências e órgãos governamentais – sobre a confiabilidade das medições destes sensores, sua forma correta de utilização e o seu grau de precisão em relação aos equipamentos considerados como referência para a análise (EPA, 2020a)

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de sensores de baixo custo para monitoramento da concentração de material particulado poderá servir para a construção de redes de monitoramento nas cidades, como forma de iniciar e incentivar o controle das emissões nas cidades onde ainda não há monitoramento ou como complemento das estações de monitoramento já existentes. Dessa forma, os dados obtidos poderão ainda ser disponibilizados em tempo real fornecendo informações sobre a qualidade do ar à

população, trazendo conhecimento sobre os níveis de exposição aos quais estão expostos e suas consequências à saúde.

Para garantir que os dados das medições dos sensores de baixo custo forneçam uma avaliação da qualidade do ar, é necessário avaliar a confiabilidade das suas medições não somente em relação aos modelos em si, mas em comparação aos equipamentos de referência. Ainda que um sensor apresente baixo desvio padrão e incerteza associada, é preciso calcular esses parâmetros em relação a um instrumento calibrado e certificado.

Badura et al. (2018b) realizou monitoramento da qualidade do ar durante aproximadamente 6 meses, comparando 4 modelos de sensores ópticos de baixo custo – dentre eles o SDS011 – com o equipamento de referência TEOM em Wrocław (Polônia). Johnston et al. (2019) utilizou 4 modelos de sensores de baixo custo para monitoramento de material particulado durante um período de sete meses, na cidade de Southampton (Reino Unido), utilizando o *Raspberry Pi* para conexão dos sensores. Liu et al. (2019) utilizou o sensor SDS011 para monitoramento da concentração de  $MP_{2,5}$  na cidade de Oslo (Noruega) por um período de 4 meses, comparando os resultados com o do equipamento de referência TEOM. Além desses estudos, existem projetos como o *Village Green* e o HazeWatch que contribuíram para o fornecimento de informações sobre a qualidade do ar local e o consequente envolvimento da população nas questões relacionadas à poluição do ar. O *Village Green Project* foi conduzido entre os anos de 2013 a 2019, nos Estados Unidos, utilizando sensores e plataformas de baixo custo para monitoramento de ozônio, material particulado e dados meteorológicos em locais públicos, acessíveis à população, com disponibilização dos dados em seu *website* (EPA, 2020b; JIAO et al., 2015) e o projeto *Haze Watch* foi criado a partir de uma iniciativa de estudantes da Universidade de New South Wales em Sydney, Austrália, promovendo o monitoramento da concentração de poluentes através do uso de sensores móveis e celulares incluindo a integração com recursos de localização para análise da exposição pessoal dos usuários do aplicativo desenvolvido (SIVARAMAN et al., 2013; YOUNDALE, 2010).

Aguiar et al. (2015) propôs a calibração e a validação de sensores de gases de baixo custo para o monitoramento da qualidade do ar em Brasília (Distrito Federal), realizando testes em laboratório e em campo. No entanto, tal estudo não englobou o uso de sensores para monitoramento da concentração de material

particulado nem utilizou equipamentos de referência como base para a análise das medições. Portanto, percebe-se que no Brasil além da falta de monitoramento regulamentado há escassez de estudos sobre a utilização de sensores de baixo custo para diferentes aplicações e em longo prazo, e também não há iniciativas que envolvam a participação da população, seja através da disponibilização dos dados ou do desenvolvimento de estratégias de conscientização sobre a poluição e a qualidade do ar.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o uso do sensor de baixo custo SDS011 para monitoramento da concentração de material particulado no ar e comparar suas medições com as de equipamentos de referência através do cálculo de parâmetros estatísticos, avaliando também suas possibilidades de aplicação e uso.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) Comparar o resultado das médias diárias das leituras do sensor SDS011 com as médias diárias do Impactador Harvard, na análise de  $MP_{2,5}$  na cidade de Joinville;
- b) Comparar o resultado das médias horárias e diárias das leituras do sensor SDS011 com as médias do Monitor de atenuação da radiação beta BAM, na análise de  $MP_{10}$  na cidade de Ponta Grossa;
- c) Comparar o resultado das médias por minuto, a cada 6 horas, a cada 12 horas e médias diárias das leituras do sensor SDS011 com o instrumento de microbalança oscilante TEOM, na análise de  $MP_{10}$  em laboratório na cidade de Curitiba.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão de conceitos importantes e pertinentes ao tema do uso de sensores de baixo custo para o monitoramento da concentração de material particulado e sua comparação com equipamento de referência para garantir a qualidade e representatividade dos dados obtidos.

### 2.1 QUALIDADE DO AR

O lançamento de poluentes no ar traz impactos à saúde humana e ao meio ambiente, de modo que está diretamente associado às doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas e está relacionado à ocorrência de chuvas ácidas, contaminando os corpos d'água (BRASIL, 2014; DE MIRANDA et al., 2012). As consequências que um poluente numa concentração elevada pode trazer são avaliadas segundo sua forma de exposição. Numa exposição crônica, que se repete durante um longo período de tempo, alguns dos principais efeitos sobre o sistema respiratório são o aumento da incidência de asma, o menor desenvolvimento pulmonar em crianças e jovens e o aumento da incidência e de mortalidade por pneumonia e por câncer de pulmão. Já na exposição aguda, os efeitos se manifestam pouco tempo após a exposição (horas ou dias) e alguns deles são: sinais de irritação nos olhos, narinas e garganta, maior frequência de infecções respiratórias e o aumento do número de internações hospitalares por pneumonia (ARBEX et al., 2012).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) define poluente atmosférico como:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- I. Impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- II. Inconveniente ao bem-estar público;
- III. Danoso aos materiais, à fauna e flora.
- IV. Prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. (CONAMA, 2018, p.1)

Atualmente, a qualidade do ar nas cidades é determinada segundo os padrões de qualidade do ar definidos, ou seja, valores de concentração de

determinado poluente na atmosfera que levam em conta o intervalo de exposição (SANTANA et al., 2012) Tais limites começaram a ser estabelecidos no século XX após casos de elevações da concentração de poluentes no ar, como o da inversão térmica em Londres no ano de 1952, que ocasionaram aumento na taxa de mortalidade relacionada à poluição (BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002; CANÇADO et al., 2006). A partir desse cenário surgiram estudos que identificaram e relacionaram os principais poluentes e seus efeitos na saúde. Os padrões de qualidade do ar começaram a ser estabelecidos nos Estados Unidos, através da criação da Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (*Environmental Protection Agency – EPA*) que inicialmente tinha o intuito de efetivar o controle da poluição atmosférica a partir dos padrões adotados e que, mais tarde, passou a atuar também no estabelecimento de critérios técnicos para o controle das substâncias tóxicas e nocivas à saúde (BRAGA; PEREIRA; SALDIVA, 2002). Na Europa o controle das emissões teve início com dificuldades no setor industrial em relação ao cumprimento das metas de adequação e diminuição estabelecidas nos “*Clean Air Act*” contudo, em 1976 foram estabelecidos padrões de qualidade do ar para SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, material particulado e oxidantes foto-químicos por parte de uma comissão de países europeus (BRAGA; PEREIRA; SALDIVA, 2002).

Numa escala global, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda valores guia para concentrações de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>), Ozônio (O<sub>3</sub>) e Material Particulado (MP) (WHO, 2006), e apesar de serem considerados valores de referência, não são seguidos de forma unânime pelos países, pois cada um estabelece os padrões de qualidade segundo suas características econômicas, tecnológicas, capacidade de implementação e consideração dos riscos à saúde (MONTEIRO et al., 2018; VAHLSING; SMITH, 2012). No Brasil, os padrões de qualidade são divididos em: padrões de qualidade do ar intermediários (PI), que são valores temporários a serem cumpridos em etapas, e padrão de qualidade do ar final (PF), que são os valores guia definidos pela OMS (CONAMA, 2018). A tabela 1 mostra os valores dos padrões intermediários e finais para os poluentes determinados pela resolução CONAMA nº 491 de 19 de Novembro de 2018.

TABELA 1 - PADRÕES DE QUALIDADE DO AR.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PI-2 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PI-3 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PF ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		ppm
Material Particulado – MP <sub>10</sub>	24 horas	120	100	75	50	-	-
	Anual	40	35	30	20	-	-
Material Particulado – MP <sub>2,5</sub>	24 horas	60	50	37	25	-	-
	Anual	20	17	15	10	-	-
Dióxido de Enxofre – SO <sub>2</sub>	24 horas	125	50	30	20	-	-
	Anual	40	30	20	-	-	-
Dióxido de Nitrogênio – NO <sub>2</sub>	1 hora	260	240	220	200	-	-
	Anual	60	50	45	40	-	-
Ozônio – O <sub>3</sub>	8 horas	140	130	120	100	-	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-	-
	Anual	40	35	30	20	-	-
Monóxido de Carbono – CO	8 horas	-	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	240	-	-
	Anual	-	-	-	80	-	-
Chumbo – Pb <sup>1</sup>	Anual	-	-	-	0,5	-	-

1 - Medido nas partículas totais em suspensão

FONTE: CONAMA (2018).

Além dos padrões de qualidade, foi criado o Índice da Qualidade do Ar (IQA) – ou Air Quality Index (AQI) – que é um valor adimensional calculado com o intuito de simplificar a divulgação da qualidade do ar através de uma estrutura de níveis que varia de boa a péssima qualidade (CETESB, 2020). Cada país tem sua forma de calcular o índice levando em conta os principais poluentes atmosféricos (RANE; NAIK; VACHHANI, 2018) e, no Brasil ele é calculado para as concentrações de MP<sub>10</sub>, MP<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. Para cada poluente é atribuído uma qualificação conforme o valor do índice correspondente, como mostra a Tabela 2. Ressalta-se que a resolução CONAMA 491/2018 indica apenas o índice para a qualidade considerada boa.

TABELA 2 - ESTRUTURA DO ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR.

Qualidade	Índice	MP <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24h	MP <sub>2,5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24h	O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 8h	CO (ppm) 8h	NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 1h	SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24h
<b>N1 – Boa</b>	0 – 40	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
<b>N2 – Moderada</b>	41 – 80	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240	>20 – 40
<b>N3 – Ruim</b>	81 – 120	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320	>40 – 365
<b>N4 – Muito Ruim</b>	121 – 200	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	> 320 – 1130	>365 – 800
<b>N5 – Péssima</b>	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

FONTE: CETESB (2020).

### 2.1.1 Material Particulado

Dentre os poluentes que podem estar contidos no ar, destaca-se o material particulado (MP) cujas características e heterogeneidade torna complexa a interpretação de suas concentrações e seus efeitos na saúde. Sua origem pode ser tanto natural, proveniente de atividades vulcânicas, aerossol marinho e tempestades de areia, quanto antropogênica, resultante principalmente da queima de combustíveis fósseis em processos industriais e emissões veiculares (ANDERSON; THUNDIYIL; STOLBACH, 2012). O material particulado é uma mistura de partículas sólidas e líquidas dispersas no ar que pode ter diferentes tamanhos, formatos e composições conforme suas fontes de emissão e seu processo de formação (CANÇADO et al., 2006; EPA, 2020c).

A classificação das partículas se dá a partir do seu diâmetro aerodinâmico equivalente (*Aerodynamic equivalent diameter – AED*) e com base na sua deposição nas vias aéreas do corpo humano, sendo as que possuem diâmetro de até 10  $\mu\text{m}$  e que são em grande parte filtradas pelo nariz e pela parte superior da via aérea, podendo atingir a região torácica, classificadas como  $\text{MP}_{10}$  (também chamadas de partículas inaláveis) e as que possuem diâmetro de até 2,5  $\mu\text{m}$  e podem se depositar nos alvéolos classificadas como  $\text{MP}_{2,5}$  (ANDERSON; THUNDIYIL; STOLBACH, 2012; EPA, 2020c; WHO, 2006). Além dessas classificações, define-se ainda as partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5  $\mu\text{m}$  como partículas finas e as com diâmetro menor que 0,1  $\mu\text{m}$  como ultrafinas, sendo que essas possuem maior poder de penetração no sistema respiratório podendo ser transportadas até ao sistema circulatório (ANDERSON; THUNDIYIL; STOLBACH, 2012; KAMPA; CASTANAS, 2008).

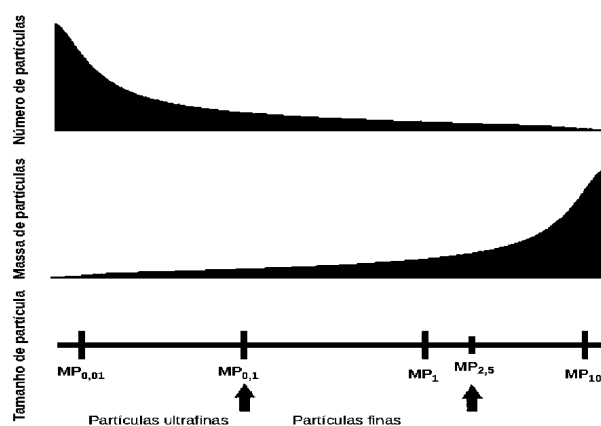
No que diz respeito à distribuição de partículas, há uma relação exponencial entre o número, área e massa das partículas e seu diâmetro, sendo que o número e a área das partículas aumenta e a massa diminui exponencialmente com a diminuição do diâmetro, como mostra a Figura 1 (ANDERSON; THUNDIYIL; STOLBACH, 2012). Enquanto para a maioria dos poluentes a análise da qualidade do ar leva em conta apenas a concentração, no caso do material particulado o entendimento sobre a relação entre a concentração e a distribuição de tamanho de partícula fornece uma informação mais concreta, tendo em vista seu tempo de

deposição e a capacidade de penetração das partículas no corpo humano (AMARAL et al., 2015; GHALEBANI, 2020).

Em termos de regulamentação, a divisão conforme o diâmetro aerodinâmico só teve início em 1987, pela EPA, através do estabelecimento de padrões para  $MP_{10}$ , já que até então as regulamentações e padrões limitavam-se a incluir as partículas totais em suspensão (PTS) (WHO, 2006). Dez anos depois foi incluído o padrão para partículas com diâmetro menor que  $2,5 \mu\text{m}$  e mais tarde, no ano 2000, a OMS definiu padrões para ambas classificações (WHO, 2006). No Brasil, os primeiros padrões nacionais da qualidade do ar só foram estabelecidos pelo Ministério do Meio Ambiente em 1990, na resolução CONAMA nº 3 (CONAMA, 1990; SICILIANO et al., 2020). Quase 30 anos depois, em Novembro de 2018, o CONAMA publicou uma resolução estabelecendo novos padrões de qualidade do ar, que são os vigentes até o momento e que consideram os padrões publicados pela OMS em 2005 (CONAMA, 2018; SICILIANO et al., 2020). São definidos nessa resolução:

- Material Particulado –  $MP_{10}$ : partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 10 micrômetros;
- Material Particulado –  $MP_{2,5}$ : partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 2,5 micrômetros;
- Partículas Totais em Suspensão – PTS: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 50 micrômetros. (CONAMA, 2018, p.1-2)

FIGURA 1 - EXEMPLO DE UMA DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS.



FONTE: Adaptado de Anderson; Thundiyil; Stolbach (2012).

### 2.1.2 Monitoramento da qualidade do ar

Um dos primeiros esforços do Brasil em estabelecer um controle das emissões de poluentes foi a instituição do Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR) na resolução CONAMA de nº 5, em junho de 1989. Dentre os tópicos abordados nesse programa está o monitoramento da qualidade do ar através da criação de uma Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade do Ar definida como ação de médio prazo, assim como a criação do Inventário Nacional de Fontes e Emissões (CONAMA, 1989). Segundo a OMS (WHO, 2000) o monitoramento da qualidade do ar:

- i. Permite identificar ameaças aos ecossistemas naturais;
- ii. Contribui para o desenvolvimento de políticas e o estabelecimento de prioridades para ações de gestão;
- iii. Presta-se ao desenvolvimento, calibração e validação de outras ferramentas, tais como modelos e sistemas de informação geográfica;
- iv. Leva à estimativa de tendências e identificação de problemas futuros, e avaliações de progressos na gestão ou nas metas de controle;
- v. Facilita a identificação da contribuição das fontes; permite compor bancos de dados para fins de planejamento do tráfego e usos do solo;
- vi. Aplica-se ao desenvolvimento de políticas e definição de prioridades para a ação pública, dentre outros. (BRASIL, 2014b, p.3-4)

Em um primeiro diagnóstico feito em 2018, 25 anos após a implementação do PRONAR, os resultados mostraram que “[...] importantes áreas do território nacional ainda não são cobertas pelo monitoramento da qualidade do ar, e que existem assimetrias estruturais significativas entre as redes instaladas [...]” (BRASIL, 2014). Além disso, o mesmo documento destaca que há um quadro de poluição atmosférica preocupante quando comparado o histórico de medições aos padrões vigentes até aquele ano ou aos recomendados internacionalmente, apesar da existência dos padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 2014; CONAMA, 1990).

O monitoramento da qualidade do ar é atribuição dos estados, conforme consta no artigo 5º da Resolução CONAMA nº 03/1990, no entanto isso não exclui a responsabilidade dos demais entes federativos (BRASIL, 2014; CONAMA, 1990). Numa esfera estadual, o 1º diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil mostrou a heterogeneidade das redes de monitoramento existentes até

o ano de 2014, que se mantém até hoje, visto que nem todas as estações monitoram todos os poluentes cujo limite é previsto nos padrões de qualidade do ar e que até mesmo os monitorados apresentam descontinuidade, com interrupções nas redes como um todo e em estações específicas. Dentre as causas para explicar essa descontinuidade e a baixa cobertura do monitoramento estão o baixo número de técnicos envolvidos e a falta de recursos para a aquisição de equipamentos e para a manutenção das redes (BRASIL, 2014). Ressalta-se, nesse sentido, que o investimento envolvido na criação de estações e redes de monitoramento não é limitado à compra de equipamentos mas também à contratação de mão de obra especializada, manutenção, construção de abrigos no local de monitoramento e análises de laboratório, dentre outros recursos que podem ser necessários.

O levantamento feito no ano de 2014 mostrou também que a representatividade das medidas não garante que as informações obtidas sejam suficientes para um diagnóstico e que, dentre os poluentes regulados, o  $MP_{10}$ ,  $MP_{2,5}$ , PTS, fumaça e  $O_3$  tiveram maior ocorrência de concentrações acima dos padrões vigentes no Brasil, dos internacionais e dos recomendados pela OMS (BRASIL, 2014). Além disso, dentre os 26 estados e o Distrito Federal, foram identificadas apenas 12 unidades federativas – Bahia, Distrito Federal, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, São Paulo e Sergipe – nas quais havia alguma atividade de monitoramento com a disponibilização de dados sobre a qualidade do ar.

Dados recentes mostram que a região metropolitana de Curitiba conta com 12 estações de monitoramento, sendo 8 automáticas e 4 manuais, porém nem todas as estações monitoram todos os poluentes (IAP, 2020a). Em relação à disponibilização dos dados e à divulgação da informação sobre a qualidade do ar na cidade de Curitiba, o Instituto Ambiental do Paraná informa que a divulgação dos dados obtidos vem sendo realizada através de relatórios anuais e boletins mensais mas uma consulta feita em junho de 2020 mostra que o relatório mais recente é do ano de 2013 e que os boletins mensais mais recentes são de dezembro de 2016 (IAP, 2020b). Já a cidade de Joinville, em Santa Catarina, não possui estações de monitoramento e ainda estuda a implantação das estações no Estado, sendo que a justificativa do diretor do Instituto do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (IMA), Fábio Castagna, é o investimento necessário para a instalação de algumas unidades (AMORIM, 2020).

Em 2018, a resolução COMANA Nº 491 além dos novos padrões de qualidade no ar estabeleceu, em seu artigo 8º, a elaboração de um guia técnico contendo os métodos de referência adotados e os critérios para utilização de métodos equivalentes, da localização dos amostradores e da representatividade temporal dos dados e sistematização do cálculo do índice de qualidade do ar, em conjunto com os órgãos ambientais, estaduais e distrital (CONAMA, 2018). Tal documento, publicado ao final do ano de 2019, visa “[..]estabelecer as diretrizes e orientar a atuação dos órgãos ambientais em relação às ações de monitoramento da qualidade do ar.”(MMA, 2020, p.11) e também atender à resolução CONAMA 491/2018. Esse guia teve como base as experiências e os documentos dos órgãos ambientais brasileiros e a legislação ambiental vigente nos Estados Unidos<sup>1</sup> e reforça o objetivo de melhoria da qualidade do ar em nível nacional (MMA, 2020).

Como objetivos de uma rede de monitoramento são colocados:

- i. Verificar o grau de exposição da população aos poluentes atmosféricos, considerando critérios de saúde pública; e
- ii. Acompanhar tendências de médio e longo prazo para verificar a eficácia dos programas de controle, avaliando a necessidade de aprimoramentos. (MMA, 2020, p.15)

O guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar recomenda que a frequência de amostragem dos monitores contínuos deve ser de médias horárias consecutivas e, para amostradores manuais de material particulado, de no mínimo uma amostra de 24 horas a cada 6 dias, para que seja garantida a representatividade dos dados, e também define o tempo mínimo de amostragem para cada tipo de média (QUADRO 1).

A representatividade espacial das estações é abordada no guia técnico de forma de modo a deixar claro que dentro de uma rede de avaliação da qualidade do ar podem existir objetivos diferentes e que a alocação dos monitores deve ser feita em escala, conforme o seu objetivo. Alguns dos objetivos apresentados no documento são: o monitoramento de concentrações mais altas, dos efeitos gerais à população, do impacto de fontes fixas e das concentrações de fundo (MMA, 2020). Portanto, apesar de não fazer menção ou tratar sobre o uso de sensores de baixo

---

1 Code of Federal Regulations. Title 40, Part 50 – National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards e Part 58 – Ambient Air Quality Surveillance.

custo, o guia técnico aponta objetivos que podem servir de base para a criação de outra escala para sua implementação em redes de monitoramento.

QUADRO 1 - TEMPO MÍNIMO DE AMOSTRAGEM PARA QUE OS DADOS SEJAM CONSIDERADOS REPRESENTATIVOS.

<b>Tipo de média</b>	<b>Critério de validação</b>
Média horária	$\frac{3}{4}$ das medidas válidas na hora
Média diária	$\frac{2}{3}$ das médias horárias válidas no dia
Média mensal	$\frac{2}{3}$ das médias diárias válidas no mês
Média anual	$\frac{1}{2}$ das médias diárias válidas obtidas em cada quadrimestre (jan-abr; mai-ago; e set-dez)

FONTE: MMA (2020).

## 2.2 MÉTODOS DE REFERÊNCIA E MÉTODOS EQUIVALENTES PARA O MONITORAMENTO DE MATERIAL PARTICULADO

A padronização dos equipamentos a serem utilizados no monitoramento visa a garantia do seu desempenho e da qualidade dos dados obtidos. No Brasil, os métodos de referência são baseados na literatura internacional, sobretudo na legislação ambiental dos Estados Unidos, incluindo a recomendação de uso dos equipamentos certificados por essa agência. Para a medição de material particulado, são recomendados os equipamentos que empregam o método gravimétrico e que, apesar de ser considerada a forma mais precisa de monitoramento, apresenta algumas desvantagens como: a necessidade de pesagem dos filtros e sua análise em laboratório, levando a um custo operacional mais alto do que o de métodos automatizados e o fornecimento de dados apenas como média diária, impossibilitando a identificação de picos e variações dos níveis de poluição ao longo do dia (MMA, 2020).

O método de referência para a medição da concentração de partículas com um diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10  $\mu\text{m}$  consiste na utilização de um amostrador que separa as frações de tamanho do material particulado, dentro da faixa do  $\text{MP}_{10}$ , pelo princípio inercial. Dessa forma, cada fração de tamanho é coletada em um filtro separado, que é pesado antes e depois da amostragem, que dura um período de 24 horas, para a determinação do ganho de massa devido ao

material particulado coletado. Trata-se de um método não destrutivo, ou seja, que permite a realização de análises físicas e químicas do filtro coletado (MMA, 2020).

Para a medição da concentração de partículas finas, com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5  $\mu\text{m}$ , utiliza-se um amostrador de ar conhecido como impactador no qual o ar é coletado a uma vazão volumétrica constante e o material particulado suspenso na faixa do  $\text{MP}_{2,5}$  é retido por separação inercial para coleta em um filtro de politetrafluoretileno (PTFE). Cada filtro é pesado antes e depois do período de amostragem, que é de 24 horas, para determinar a massa devido ao material coletado e pode ser submetido a análises físicas ou químicas. (MMA, 2020)

O método equivalente é definido como um método de medição diferente do método de referência para a medição de um poluente atmosférico específico para o qual a equivalência foi demonstrada (EC WORKING GROUP, 2010). Na Europa existe um procedimento para a demonstração da equivalência, trazendo as condições e testes necessários, as exigências para laboratórios e a operação indicada para o método equivalente. Com isso, denomina-se como método candidato o método de medição proposto como alternativa a um método de referência relevante para o qual a equivalência deverá ser demonstrada (EC WORKING GROUP, 2010).

Destaca-se ainda que a utilização dos métodos equivalentes pode partir de iniciativa de uma *National Competent Authority* (NCA), que é o órgão designado por um Estado-Membro da União Europeia como responsável pela aprovação de todo o sistema de medição (métodos, equipamentos e laboratórios), ou de laboratórios regionais e nacionais que efetuem medições da qualidade do ar, considerando as diretrizes vigentes. No caso dos laboratórios, deve-se notificar a utilização do método equivalente à sua NCA e proceder uma avaliação preliminar. Sendo a avaliação feita numa sequência de testes, ela pode ser interrompida em qualquer estágio caso a incerteza do método falhe em cumprir os critérios de incerteza definidos. Se isso acontecer, a avaliação pode ser finalizada para que um relatório de resultados seja enviado à NCA. Este relatório é importante para servir de base para a redução das fontes de incertezas em testes futuros, garantindo novos testes adequados que teriam sua incerteza resultante novamente comparada com a incerteza dos critérios. Já quando o programa de teste é concluído, seus resultados e avaliações também devem ser comunicados à NCA que decidirá sobre a aceitação

ou rejeição do método equivalente. Em caso de aceitação, deve ser apresentado um relatório de avaliação com conclusões para revisão à Comunidade Europeia, que poderá exigir a consulta a um comitê de peritos sobre o pedido de equivalência de método (EC WORKING GROUP, 2010).

Em relação às características que devem constar no método, para o material particulado, ficam estabelecidos, entre outros critérios específicos:

- Um mínimo de 4 comparações num mínimo de dois locais, que devem ser efetuadas preferencialmente em estações ou condições climáticas distintas;
- O uso de dois equipamentos ou instrumentos de referência;
- Que a média de todos os resultados obtidos deve ser calculada durante um período de 24 horas. Em cada comparação, um mínimo de 40 pares de dados diários válidos (um par de dados que represente pelo menos um resultado do método de referência e um do método do candidato no mesmo período de 24 horas) (EC WORKING GROUP, 2010).

No Brasil, não há um processo de certificação de equipamentos de monitoramento da qualidade do ar e os métodos equivalentes são definidos como:

[...] aqueles que demonstram ter um desempenho equivalente aos instrumentos de referência certificados, atendendo a critérios estabelecidos por agências com atuação reconhecida sobre o tema, como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA), TÜV (Alemanha) e Monitoring Certification Scheme (MCERTS) (Reino Unido), ou outra autoridade certificadora com o mesmo grau de exigência na certificação de equipamentos. (MMA, 2020, p.32)

Para o caso específico do Material Particulado ( $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ ), os testes comparativos para aceitação do método equivalente devem ser feitos com medições concomitantes entre os equipamentos de referência e equivalentes, observando-se as três seguintes características mínimas, que devem constar em um laudo técnico (ou certificado) emitido por uma instituição de referência:

- Obtenção de 40 amostras paralelas de 24 horas, cobrindo uma faixa de no mínimo  $5 \mu\text{g.m}^{-3}$  a  $75 \mu\text{g.m}^{-3}$  para  $MP_{2,5}$  e faixa de  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  a  $175 \mu\text{g.m}^{-3}$  para  $MP_{10}$ ;
- Os dados das medições paralelas devem ser analisados estatisticamente; e
- Os critérios estatísticos devem ser justificados. (MMA, 2020, p.35)

Percebe-se que, apesar de ser fundamentado em documentos internacionais e semelhante a eles em algumas recomendações, o Guia Técnico para Monitoramento da Qualidade do Ar ainda não é suficiente para o estabelecimento de uma metodologia assertiva no Brasil que vise comparar equipamentos de referência com outras metodologias, tais como sensores de baixo custo, visto que os critérios estatísticos não são especificados nem detalhados. Além disso, é notável que a participação dos estados poderia contribuir para o avanço da avaliação de métodos equivalentes, assim como ocorre com as competências atribuídas às NCA's na Europa.

A metodologia usada nos Estados Unidos em muito se assemelha à da Europa, porém a EPA tem se empenhado em tratar especificamente sobre o uso de sensores de baixo custo para medições e avaliação da qualidade do ar, trazendo informações importantes sobre seu uso, seleção e avaliação. Nesse sentido, o "*Air Sensor Guidebook*" é um documento detalhado, com critérios estatísticos para aceitação dos dados obtidos, e que portanto será a principal fonte de fundamentação teórica para a análise dos dados deste trabalho e terá suas definições e parâmetros explicados na seção seguinte.

## 2.3 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Os conceitos e definições a seguir dizem respeito a parâmetros utilizados na literatura para avaliar o desempenho de sensores de baixo custo em relação a equipamentos de referência e equivalentes, sobretudo conforme os indicadores de qualidade (*Data Quality Indicators – DQI*) estabelecidos pela EPA.

### 2.3.1 Inter variabilidade

A inter variabilidade diz respeito ao quão próximas estão as medidas de um conjunto de sensores em triplicata, considerando todos os sensores do mesmo tipo e modelo. Esse parâmetro pode ser avaliado a partir de outros tais como a média, alcance e desvio padrão. A equação 1 traz o cálculo da inter variabilidade, expressa em porcentagem, para um conjunto de três sensores na qual se utiliza a média mais alta das concentrações médias dos três sensores, a mais baixa e a média das concentrações médias dos três sensores (LIU et al., 2019; POLIDORI et al., 2016).

$$\text{Intervariabilidade}(\%) = \frac{\text{maior média} - \text{menor média}}{\text{média das concentrações}} \quad (1)$$

Em uma avaliação de sensores de baixo custo para qualidade do ar, Polidori et al. (2016) analisaram parâmetros como acurácia, precisão, limite de detecção, coeficiente de correlação linear ( $R^2$ ), dentre outros, sendo a inter variabilidade considerada a primeira etapa de avaliação. Segundo o documento sobre Configuração de Laboratório e Protocolo de Testes do AQ-SPEC (*Air Quality Sensor Performance Evaluation Center*), se a inter variabilidade for inferior a 20% as medições dos três sensores devem ser calculadas como média e usadas para calcular todos os outros parâmetros de avaliação sugeridos. Caso contrário, se as medidas dos sensores variarem significativamente um do outro, sendo a inter variabilidade maior que 20%, as concentrações medidas pelos sensores devem ser tratadas separadamente para a estimativa dos parâmetros de avaliação (POLIDORI et al., 2016).

### 2.3.2 Completude/Integridade dos Dados

A completude dos dados refere-se à quantidade de dados obtidos em um monitoramento em relação ao total esperado e pode ser expressa em termos de porcentagem, conforme a equação 2. Essa quantidade pode ser definida conforme o monitoramento, considerando diferentes intervalos como meses, dias, horas, minutos ou segundos. Quanto maior for a completude de dados, mais representativa será a média ou amostra. Normalmente, fatores como perdas de energia, problemas de transmissão de dados e a necessidade de reparos ou calibrações gera perda de dados, diminuindo sua completude final (WILLIAMS et al., 2014).

$$\text{Completude}(\%) = \frac{\text{quantidade de dados obtida}}{\text{quantidade de dados esperada}} \times 100 \quad (2)$$

Para o monitoramento regulamentado, a EPA define uma completude de dados de no mínimo 75% enquanto a União Europeia estabelece um valor de 90% tanto para o monitoramento regulamentado quanto para o suplementar (EUROPEAN COMMISSION, 2008; WILLIAMS et al., 2014). A diferença principal desses valores é que a Comissão Europeia prevê a remoção de dados anômalos (ou *outliers*),

podendo ser removidos até 2,5% dados, desde que haja justificativa técnica para a remoção que o número de pares de dados finais válidos para a comparação seja  $\geq 40$ . O método recomendado para a remoção dos *outliers* é o Teste de Grubb (EC WORKING GROUP, 2010).

### 2.3.3 Correlação

O gráfico da correlação é a principal maneira para se comparar dados de um sensor e de outro equipamento através da plotagem desses dados que gera uma linha ou curva. A curva obtida é representada por uma equação que descreve o comportamento do sensor em relação ao equipamento de referência (nos eixos horizontal, x, e vertical, y) cujo coeficiente m mostra quão similar ou distinto está esse comportamento. Essa curva pode ser positiva ou negativa e quanto mais próximo o valor do coeficiente estiver de 1, melhor será a resposta do sensor em relação ao equipamento de referência, enquanto um valor de m mais distante de 1 indica uma resposta acima ou abaixo da medida pelo equipamento de referência (WILLIAMS et al., 2014).

Outra indicação da correlação pode ser obtida através do cálculo do coeficiente de correlação linear, chamado r. O valor de r indica a força da relação linear entre as duas variáveis e varia de -1 a +1, podendo ainda ser expresso em porcentagem. Quanto mais próximo da unidade, maior é a qualidade da associação linear e o sinal indica se é uma relação de aumento (sinal positivo) ou diminuição (sinal negativo) das variáveis (MARTINS, 2005). Para uma amostra de duas variáveis (X, Y) do tipo  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots (x_n, y_n)$ , o coeficiente de correlação de *Pearson* é dado pela equação 3, onde:

$$S_{xy} = \sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n} \quad S_{xx} = \sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \quad S_{yy} = \sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}$$

$$r_{xy} = r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}} \quad (3)$$

Ressalta-se que essa correlação não explica o efeito de uma variável sobre a outra, seja ele direto ou indireto, podendo ambas variáveis sofrerem a influência de outras que alterem a correlação entre elas e que além do coeficiente de correlação

de Pearson, existem outros coeficientes como o coeficiente V de Cramer, coeficiente de Spearman, coeficiente de Kendall, dentre outros, calculados através de testes de hipótese ou teste Qui-quadrado, para variáveis nominais e ordinais (MARTINS, 2005).

#### 2.3.4 Coeficiente de determinação $R^2$

Dada uma reta de regressão linear ajustada por meio do método de mínimos quadrados (do tipo  $y = mx + b$ ), o coeficiente de determinação pode ser calculado através da equação 5 (MARTINS, 2005), sendo que:

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{b(S_{xy})}{S_{yy}} \quad (5)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é um valor entre 0 e 1 que expressa a proporção da variação total que é explicada pela reta de regressão, ou seja, é um indicador da qualidade do ajuste (WILLIAMS et al., 2014). Quanto mais próximo da unidade, maior é o ajuste entre o sensor e o equipamento de referência (BADURA et al., 2018a).

#### 2.3.5 Viés

O viés um erro sistemático entre os valores medidos e os reais, podendo variar sempre para um valor maior ou menor que o real (ou de referência) (WILLIAMS et al., 2014). Uma forma simples de obter o viés é através do coeficiente b da equação da reta que relaciona os valores medidos pelo sensor e pelo equipamento de referência, sendo do tipo  $y=ax + b$ . Em relação à comparação de um sensor e um equipamento de referência, pode-se dizer que quanto mais próximo de zero for o coeficiente b, menor será o viés, enquanto um valor maior que zero indica uma superestimação ou subestimação da concentração indicada no equipamento de referência.

O erro de viés normalmente é causado por características próprias do sensor, problemas no método de monitoramento ou erros de operação que se repetem constantemente (WILLIAMS et al., 2014). Portanto, é possível corrigi-lo através de calibrações do sensor e de correções ou alterações nos métodos e procedimentos operacionais. As formas de se estimar o viés são variadas sendo uma delas a descrita na equação 6 onde  $B$  é o viés,  $C$  é a média das medições e  $C_R$  é a concentração medida pelo equipamento de referência, podendo ainda ser obtido em porcentagem (WILLIAMS et al., 2014; BADURA et al., 2018b).

$$B = \left( \frac{C}{C_R} \right) - 1 \quad (6)$$

Sendo assim, o viés é calculado para avaliar se o sensor ou um conjunto de sensores superestima ou subestima os dados do equipamento de referência. É possível calcular os erros de viés considerados temporários, a partir do intervalo de medição, e então calcular a média dos erros de viés temporários durante todo o período de monitoramento para obter o viés final (BADURA et al., 2018b).

### 2.3.6 Precisão e acurácia

A precisão é uma medida que indica quão próximos os valores medidos estão entre si, considerando um equipamento operando por diversas vezes sob as mesmas condições, ou vários equipamentos (de um mesmo modelo) efetuando medidas simultâneas num mesmo local (WILLIAMS et al., 2014). Pode ser expressa em termos de desvio padrão (obtida através da raiz quadrada da variância), que por sua vez é a média do quadrado das diferenças dos dados medidos, ou estimada através de outros cálculos estatísticos que utilizam uma variação do desvio padrão, como a equação (7), na qual  $P$  é a precisão,  $C_s$  é o desvio padrão das medições e  $C_m$  é a média das medições a uma dada concentração (WILLIAMS et al., 2014).

$$P = \frac{C_s}{C_m} \quad (7)$$

O coeficiente de variação (CV) é usado para avaliar a precisão utilizando a média e o desvio padrão das medições, de maneira análoga à equação 7. Nesse

sentido, sensores com baixos valores de CV possuem uma alta reprodutibilidade, sendo um valor abaixo de 10% considerado aceitável nos testes com sensores de baixo custo (BADURA et al., 2018a; SOUSAN et al., 2016). A precisão de um instrumento pode ser aumentada através do agrupamento de dados, pois a tendência nesse caso é que os erros aleatórios sejam cancelados gerando um resultado mais preciso e representativo porém com menos pontos individuais, ou pela utilização de vários equipamentos operando e considerando o valor obtido como a média dos valores medidos para um mesmo tempo e local (WILLIAMS et al., 2014).

Existe ainda a medida definida como acurácia, que muitas vezes é confundida com a precisão ou com o viés, e que na verdade inclui tanto o erro sistemático (viés) quanto o erro aleatório (precisão) (WILLIAMS et al., 2014). Portanto, a diminuição desses erros associados contribui para a melhora da acurácia, que pode ser calculada como a diferença entre a média de um grupo de dados e o valor real. A equação 8 é usada para calcular a acurácia em termos de porcentagem, onde  $X$  é a concentração média medida pelos sensores durante um monitoramento e  $R$  é a concentração medida pelo equipamento de referência durante o mesmo período.

$$A(\%) = 100 - \frac{|X - R|}{R} \times 100 \quad (8)$$

Quanto maior o valor obtido em porcentagem, maior a acurácia do sensor sendo que uma acurácia de 100% significa que as medições do sensor e do equipamento de referência foram iguais. Através da equação 8 é possível concluir que nos casos em que o sensor superestima as medições do equipamento de referência em mais de 100% a acurácia é representada por um valor negativo (BADURA et al., 2018a; POLIDORI et al., 2016). Considerando o viés e precisão de um instrumento, a sua acurácia pode ser melhorada com o aumento do número de dados, de maneira semelhante a que ocorre com a precisão, contanto que o instrumento não possua enviesamento (WILLIAMS et al., 2014).

### 2.3.7 Erro médio e Raiz do erro quadrático médio

Existem dois tipos de erros, o erro de polarização média (*Mean Bias Error* – MBE) e o erro absoluto médio (*Mean Absolute Error* – MAE), também usados para comparar as concentrações obtidas por um sensor e um equipamento de referência (FEENSTRA et al., 2019). Esses erros são calculados de forma semelhante, como mostrado nas equações 9 e 10, nas quais  $X_i$  é a média das medições do sensor de baixo custo,  $X_t$  é a média das medições do equipamento de referência e  $n$  é o número de dados obtidos durante o período de monitoramento utilizado para calcular as médias anteriores (FEENSTRA et al., 2019; HUANG, C. J.; KUO, P. H. A, 2018; QIN, X. et al, 2019). O Erro de polarização média, assim como o erro de viés descrito na seção 2.3.5, indica a tendência do sensor a subestimar ou superestimar as concentrações de material particulado em relação ao equipamento de referência (FEENSTRA et al., 2019).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_t) \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(X_i - X_t)| \quad (10)$$

Através da equação 9 é possível perceber que no cálculo do erro de polarização média, os valores superestimados anularão os valores subestimados. Por conta disso, considera-se o erro médio absoluto uma métrica mais adequada para o cálculo do erro entre o sensor e o equipamento de referência. A raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square Error* – RMSE) é um parâmetro adicional usado para avaliar os erros de medição, calculada conforme a equação 11. Por ter os erros elevados ao quadrado antes de obter a média, a raiz do erro quadrático médio aumenta consideravelmente com o surgimento de erros de medições. Isto é, os dados considerados anômalos ou *outliers* exercem um fator maior no cálculo da raiz do erro quadrático médio, tornando o valor final maior (FEENSTRA et al., 2019).

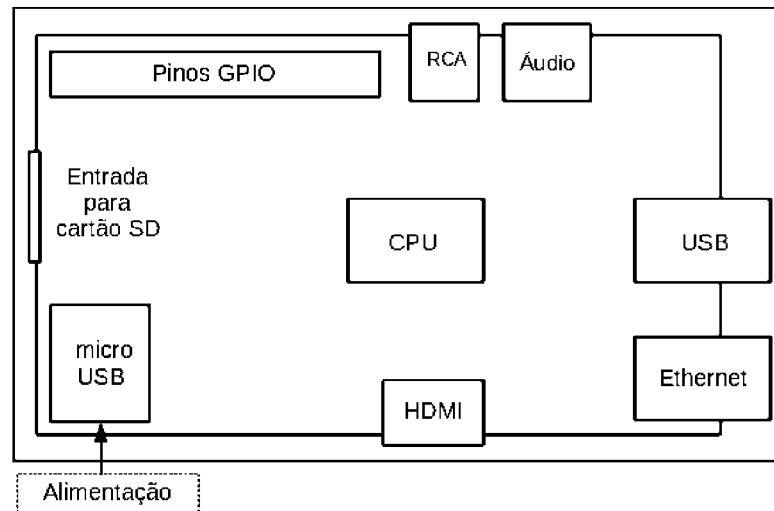
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_t)^2}{n}} \quad (11)$$

## 2.4 PLATAFORMA E SENSOR DE BAIXO CUSTO

### 2.4.1 Raspberry Pi

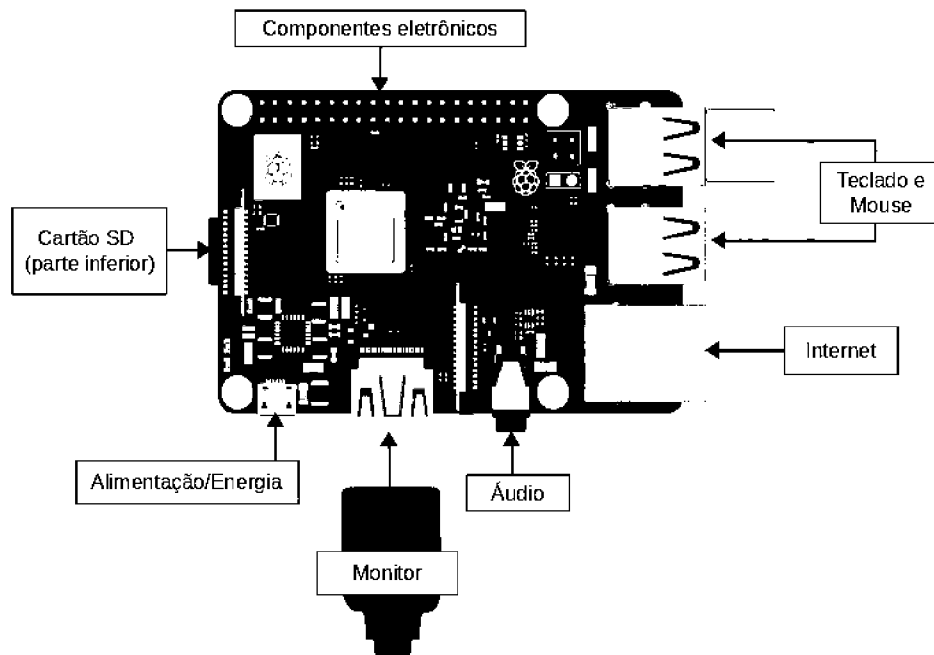
O *Raspberry Pi* é um computador de baixo custo do tamanho de um cartão de crédito criado por um grupo de cientistas da área da computação da Universidade de Cambridge (Reino Unido), liderados por Eben Upton, que a partir de 2006 se dedicaram a desenvolver um micro computador de caráter educativo, voltado para entusiastas da informática, estudantes e até mesmo crianças, com o objetivo principal de ajudar a fornecer competências aos futuros profissionais e estudantes da área da ciência computacional (DENNIS, 2013; HALFACREE; UPTON, 2012).

As primeiras versões disponíveis para compra, no ano de 2012, tinham custo entre 25 e 35 dólares e já executavam uma versão do sistema operacional Linux (DE OLIVEIRA, 2017; DENNIS, 2013). O micro computador conta com um processador da família ARM de 64 bits capaz de operar com um fornecimento de energia de 5V e 1A, portas USB (*Universal Serial Bus*) para que seja possível conectar o teclado, mouse e outros acessórios, porta RCA para uso em televisões, entrada analógica de áudio para caixas de som ou fones de ouvido, porta HDMI (*High Definition Multimedia Interface*) para conexão em monitores e televisões, fornecendo áudio e imagem, porta Ethernet que permite a comunicação com outros dispositivos e com a Internet, pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*) para a conexão de equipamentos eletrônicos, armazenamento SDRAM de 256 ou 512 MB, entrada para cartão SD (*Secure Digital*) no qual é instalado o sistema operacional e que atua como disco rígido, entre outras interfaces como processador gráfico (DE OLIVEIRA, 2017; DENNIS, 2013; UPTON; HALFACREE, 2012). A Figura 2 mostra alguns dos componentes descritos que compõem o microcomputador. A versão mais recente dentre as 8 lançadas é a *Raspberry Pi 4* que conta com fornecimento de energia através do cabo USB-C e duas portas micro HDMI, além de opções de RAM de 2GB, 4GB ou 8GB e está disponível ao preço oficial de 35 U\$ (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2020a).

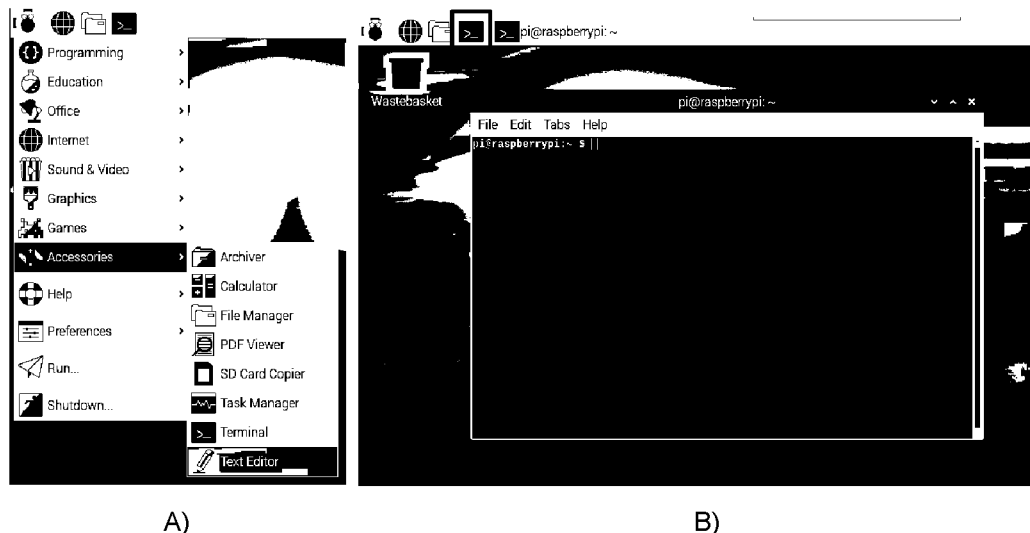
FIGURA 2 - PRINCIPAIS COMPONENTES DO *RASPBERRY PI*.

FONTE: Adaptado de Dennis (2013).

O sistema operacional mais comumente utilizado no *Raspberry Pi* é o Linux, por se tratar de um sistema de código aberto, com download gratuito e que permite alterações, no entanto é possível utilizar outros sistemas operacionais como o Windows (KUMAR; JASUJA, 2017; UPTON; HALFACREE, 2012). No site da fundação é disponibilizada a distribuição *Raspbian*, recomendada oficialmente, além das instruções detalhadas e de fácil compreensão da instalação e configuração (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2020b; RICHARDSON; WALLACE, 2012). A instalação do sistema operacional é feita no cartão SD e, para iniciá-lo é preciso conectar o *Raspberry Pi* a um monitor, teclado, mouse e, finalmente, à energia. Também é possível utilizar a saída de áudio e conexão de internet via cabo, já os sensores e outros dispositivos eletrônicos são conectados nas portas GPIO, como indicado na Figura 3. Ao conectar a fonte de energia, o sistema é automaticamente iniciado e os *leds* indicadores se acendem, logo é possível acessar então a interface do Desktop que é similar à de outras distribuições Linux, com gerenciador de arquivos, terminal de comando, editor de texto, entre outros, como mostra a Figura 4 (RICHARDSON; WALLACE, 2012; UPTON; HALFACREE, 2012). Além disso, o *Raspberry Pi* possui Wi-Fi integrado e conexão Bluetooth através da instalação do pacote *PyBluez*. Assim, além da possibilidade de programação em diversas linguagens, é possível usar interfaces gráficas, API's (*Application Programming Interface*), protocolos de rede, servidores de bancos de dados e outras diferentes aplicações (BINSY; SAMPATH, 2019; DE OLIVEIRA, 2017).

FIGURA 3 - CONEXÕES PARA O USO DO *RASPBERRY PI*.

FONTE: Adaptado de Raspberry Pi Foundation (2020b).

FIGURA 4 - INTERFACE *DESKTOP* MOSTRANDO A) OS ACESSÓRIOS INSTALADOS NA *RASPIAN* E B) O TERMINAL/PROMPT DE COMANDO.

FONTE: Raspberry Pi Foundation (2020c).

Muitos projetos de estudo de sensores de baixo custo e aplicações de monitoramento remoto utilizam o *Raspberry Pi* e outras plataformas como o Arduino, sendo que o custo do Arduino e de outras placas de processamento são, em geral,

menores que o do *Raspberry Pi*, tornando o projeto mais barato e garantindo as mesmas vantagens do uso de linguagem de código aberto e baixo consumo de energia. No entanto, além das facilidades de comunicação via Internet e Bluetooth, não necessitando da compra de módulos adicionais, o poder de processamento do *Raspberry Pi* é maior que o dos microcontroladores (DE OLIVEIRA, 2017). Além disso, é possível utilizar o Arduino em conjunto com o *Raspberry Pi*, já que é possível conectá-lo e rodar sua IDE<sup>2</sup> no sistema operacional do *Raspberry*, aumentando a capacidade de componentes e possibilitando o uso das portas analógicas (presentes apenas no Arduino) (DENNIS, 2013).

Caya et al. (2017) utilizou um *Raspberry Pi* e um microcontrolador Gizduino para aquisição de dados de sensor de gás (CO) e de material particulado efetuando o envio de e-mail automáticos de alerta contendo os dados das concentrações medidas. Kumar e Jasuja (2017) propuseram um sistema para monitoramento da qualidade do ar utilizando sensores de gases (CO e CO<sub>2</sub>), material particulado, temperatura e pressão conectados a um Arduino Uno em interface com um *Raspberry Pi*, disponibilizando os dados obtidos num aplicativo que pode ser acessado pelo computador ou celular. Pu'ad et al. (2018) utilizou dois Arduino's modelo Uno e um *Raspberry Pi* para a conexão e aquisição de dados de sensores de gases (CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>) e de material particulado (MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub>), tendo energia sido fornecida através de um carregador externo do tipo *power bank*. Esses trabalhos mostram a aplicabilidade do *Raspberry Pi* em situações que demandam capacidade de armazenamento das informações obtidas, conexão com a internet e com outros dispositivos, além de evidenciarem a possibilidade e vantagem de uso em conjunto com outras plataformas como o Arduino.

Além de ser um microcomputador, o *Raspberry Pi* é um projeto e uma comunidade, com fóruns online para discussão e resolução de problemas que conta com mais de 60 mil membros, competições e eventos de robótica e programação voltados para crianças (como o "*Coollest Projects*" e o "*Astro Pi*") um blog oficial com assuntos de informática, robótica e programação em geral, cursos online gratuitos e projetos dos mais diversos assuntos e níveis de dificuldade, com destaque para o "*Build your own weather station*", que em 2016 enviou quase 100 estações meteorológicas Oracle personalizadas para escolas ao redor do mundo, permitindo

---

2 A IDE do Arduino é o ambiente que facilita a escrita e o upload de códigos e pode ser usado com qualquer versão de placa Arduino (ARDUINO, 2020).

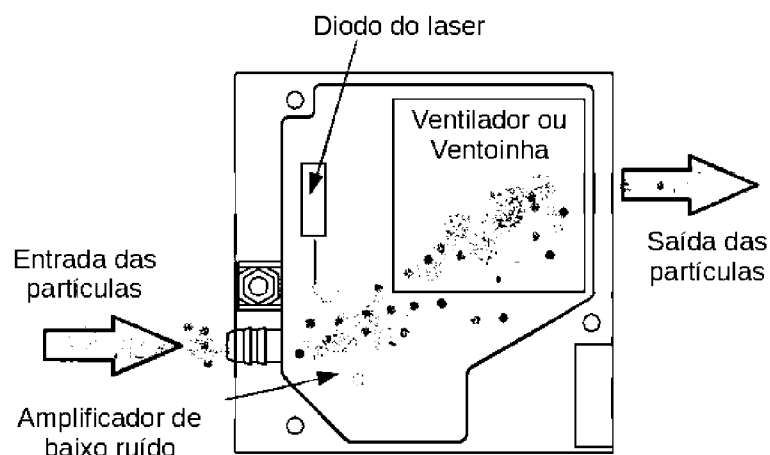
aos estudantes a obtenção de dados meteorológicos usando uma variedade de sensores (HALFACREE; UPTON, 2012; RASPBERRY PI FOUNDATION, 2020d, 2020e). Todos esses recursos disponibilizados pela fundação evidenciam seu caráter educacional e seu incentivo à programação, trazendo ainda mais vantagens para o uso da sua plataforma.

#### 2.4.2 Sensor óptico de material particulado modelo SDS011

De maneira geral, os sensores ópticos consistem numa fonte de luz que age sobre as partículas que passam por uma câmara de detecção e absorvem parte dessa luz, sendo transformada em outros tipos de energia, como o calor (GHALEBANI, 2020). A parte do feixe de luz que não foi absorvida é irradiada em diferentes direções (dispersamento), podendo então ser somadas as parcelas da dispersão e da absorção (WELKER, 2012). É através desse princípio de funcionamento que os sensores ópticos fazem a contagem de partículas, determinando a sua concentração em massa (GHALEBANI, 2020).

O sensor óptico SDS011 é desenvolvido pela *Inovafit*, uma *spin-off* da Universidade de Jinan (Shangong, China), que usa o princípio de dispersão por laser para obter a concentração de partículas entre  $0,3\ \mu\text{m}$  e  $10\ \mu\text{m}$  no ar, englobando portanto partículas classificadas como  $\text{MP}_{10}$  e  $\text{MP}_{2,5}$  (WORLD AIR QUALITY INDEX PROJECT, 2008). Um esquema do seu funcionamento, considerando seus principais componentes internos é apresentado na figura 5.

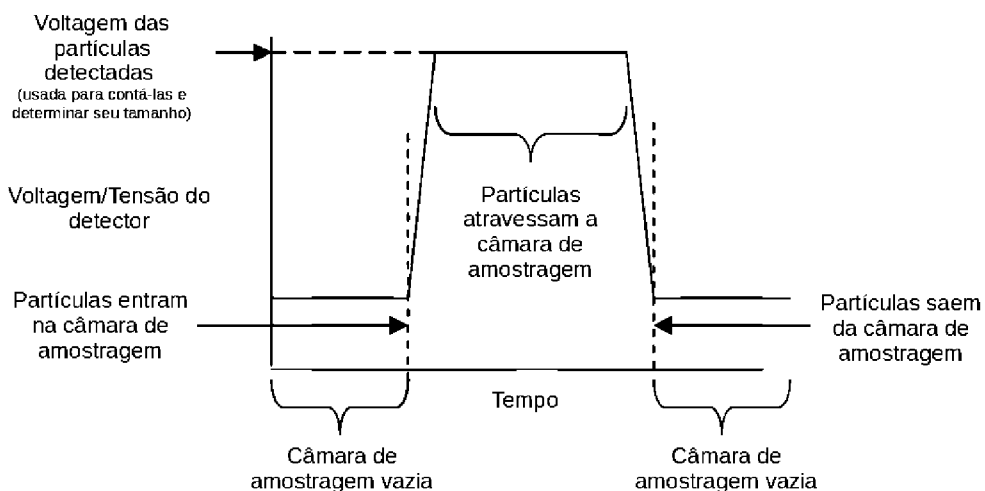
FIGURA 5 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DO SENSOR SDS011.



FONTE: Traduzido de Genikomsakis et al. (2018).

A dispersão da luz é induzida quando as partículas atravessam a área de detecção e a luz dispersa é transformada em sinais elétricos que são amplificados e processados. O número e diâmetro das partículas é obtido através da relação da forma e do comprimento de onda do sinal com o diâmetro das partículas, como exemplificado na figura 6 (NOVA FITNESS CO, 2015). Além de seu baixo custo e baixo consumo de energia, esse sensor mostrou boa adaptabilidade em diferentes locais e condições climáticas (TAGLE et al., 2020), o que indica seu potencial uso para implantação de redes de monitoramento com diversos pontos dentro de uma cidade ou país.

FIGURA 6 - RESPOSTA DO DETECTOR QUANDO UMA PARTÍCULA PASSA PELA CÂMARA DE AMOSTRAGEM DE UM SENSOR ÓPTICO.



FONTE: Adaptado de Welker (2012).

Ao considerar características como a capacidade de amostragem em tempo real, necessidade de diluição do fluxo de gás, limite de detecção, gama de tamanhos de partículas e precisão do equipamento, Amaral et al. (2015) descobriu que dentre os instrumentos para a análise de material particulado – considerando equipamentos baseados nos princípios gravimétrico, óptico e de microbalança – os baseados no princípio da dispersão da luz (dispositivos ópticos) têm a mais alta precisão de todos, com exceção apenas do equipamento de microbalança (TEOM). Numa análise de  $PM_{2,5}$  com quatro sensores de baixo custo em relação ao equipamento de referência TEOM, o SDS011 foi o que obteve melhores resultados em termos de precisão e correlação linear com o equipamento (BADURA et al., 2018b). Em

relação aos equipamentos BAM 1020, TEOM 1400 e Partisol 2000i o estudo de Tagle et al. (2020), considerando  $PM_{2,5}$  e  $PM_{10}$  em diferentes médias temporais (horária e diária), mostrou melhores correlações do sensor SDS011 com o Partisol na análise diária de  $PM_{2,5}$  e melhores correlações do sensor com o BAM na análise de  $PM_{2,5}$  do que com o TEOM na análise de  $PM_{10}$ , considerando médias horárias. Liu et al. (2019) analisou o sensor SDS011 em relação ao TEOM utilizando triplicatas e, conforme os aspectos de interesse no estudo, os três sensores apresentaram resultados semelhantes, com elevada correlação e alta linearidade em relação aos resultados do equipamento de referência. Além disso, a inter variabilidade calculada no estudo de Liu et al. (2019) para as triplicatas do sensor SDS011 foi de 9,64% e a acurácia calculada para cada um dos sensores em relação ao equipamento de referência foi de 98,16%, 86,82% e 80,76%, resultando em uma acurácia média final de 88,58%. A tabela 3 mostra o resumo dos resultados dos principais parâmetros estatísticos calculados nos estudos anteriormente citados.

TABELA 3 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS OBTIDOS EM OUTROS ESTUDOS.

<b>Autores e ano</b>	<b>R<sup>2</sup> (MP<sub>10</sub>)</b>	<b>R<sup>2</sup> (MP<sub>2,5</sub>)</b>	<b>r Pearson</b>	<b>CV (%)</b>	<b>Viés (%)</b>	<b>MAE (µg.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>RMSE ou nRMSE</b>
TAGLE et al. (2020)	0,24 – 0,56	0,47 – 0,86	–	–	–	5,50 – 13,70	10 – 37 % (MP <sub>10</sub> ) 9 – 24 % (MP <sub>2,5</sub> )
BADURA et al. (2018a)	–	0,79 – 0,90	–	6,53	–	–	–
BADURA et al. (2018b)	–	0,59 – 0,78	0,80 – 0,88	6,99	61 – 80	–	–
LIU et al. (2019)	–	0,55 – 0,71	–			2,97 – 3,84	4,21 – 5,45 µg.m <sup>-3</sup>

FONTE: O autor (2020).

Alguns estudos mencionam variações observadas nos resultados de sensores ópticos de baixo custo e os fatores que podem influenciar esses resultados,

sobretudo a influência de parâmetros meteorológicos. O estudo de Tagle et al. (2020) mostrou que a performance do SDS011 é melhor para médias diárias do que para médias horárias, com menor erro de viés, e que o sensor tende a superestimar os resultados quando a umidade relativa ultrapassa 75% e a subestimá-los quando a umidade relativa é menor do que 50%. Já Liu et al., (2019) determinou que valores de umidade relativa acima de 80% afetam negativamente a leitura do sensor, sendo que o ajuste feito considerando a influência da temperatura e da umidade contribuiu para a melhora da correlação, aumentando os valores de  $R^2$ . Badura et al. (2018a) também encontrou resultados melhores para as médias diárias do que para médias de 1 hora e de 15 minutos, sendo que em todos os casos o coeficiente de determinação ficou entre 0,8 e 0,9. Além disso, no mesmo estudo o valor de  $R^2$  foi maior (entre 0,73 e 0,86) para concentrações de  $MP_{2,5}$  maiores que  $60 \mu\text{g.m}^{-3}$  e menor para concentrações menores ou iguais a  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$  e entre  $20 \mu\text{g.m}^{-3}$  e  $60 \mu\text{g.m}^{-3}$  (entre 0,45 e 0,50).

Além das avaliações em relação aos parâmetros meteorológicos, observa-se que a variação do fluxo de ar da ventoinha que compõe o SDS011 e os orifícios de entrada e saída de ar, sobretudo quando são utilizados compartimentos para proteção do sensor, podem influenciar sua acurácia e precisão (GHALEBANI, 2020; WARDOYO et al., 2020). Os testes de laboratório detalhados de Budde et al. (2018) reportam ainda que a acurácia do sensor SDS011 é melhor para partículas com diâmetro entre 0,3 e  $1 \mu\text{m}$ , o que pode explicar as correlações maiores encontradas para  $MP_{2,5}$  do que para  $MP_{10}$ . Esse comportamento pode ainda ser explicado pelo próprio princípio de funcionamento dos sensores ópticos: as partículas menores que o comprimento de onda do feixe de luz dispersam uma intensidade de luz diretamente proporcional à quarta potência do seu diâmetro de partícula, enquanto as partículas maiores dispersam uma intensidade de luz correspondente ao quadrado do seu diâmetro. Portanto, o que ocorre nesse tipo de dispositivo é que, apesar de detectar partículas grandes eles não conseguem reportá-las pois o detector fica saturado (WELKER, 2012).

Outras limitações do sensor são a ausência de um sistema de secagem do ar, que aumenta a influência da umidade, a sua dificuldade na detecção de *black carbon*<sup>3</sup>, característica dos sensores baseados na dispersão de luz pois essas

---

3 O *black carbon* é uma porção significativa do material particulado, sendo a fração que absorve a radiação solar, caracterizado pelo seu aspecto de fuligem formado através da combustão incompleta de combustíveis fósseis, biocombustíveis e biomassa (EPA, 2012)

partículas tendem a absorver a luz do diodo, a incerteza quanto à maneira que o processamento interno estima o tamanho das partículas e a sua impossibilidade de análise da composição química (BUDDE et al., 2018; MIGOS et al., 2019; TAGLE et al., 2020). Apesar dessas limitações e levando em conta suas vantagens, evidencia-se que o sensor SDS011 possui amplo potencial de aplicabilidade e têm sido usado em projetos de monitoramento da qualidade do ar, com destaque para o projeto *Luftdaten*, elaborado em Stuttgart (Alemanha), que promove a disponibilização de dados da qualidade do ar em toda a Europa e em outros locais do mundo como os Estados Unidos, Tailândia, Dubai, República Dominicana e Chile (OK LAB STUTTGART, 2020).

#### 2.4.3 Potencialidades e relevância do uso de sensores de baixo custo para monitoramento do material particulado

Sendo os sensores de baixo custo uma tecnologia que ainda está em desenvolvimento, existe pouca informação sobre a qualidade dos dados que eles produzem. Assim como os métodos de referência exigem cuidados quanto à sua forma de utilização, calibração e condições de amostragem, é importante avaliar as características e condições de uso de um sensor. Williams et al. (2014) recomenda, em um documento da EPA, uma série de observações a serem feitas antes de se escolher um sensor para compra, algumas delas estão listadas e explicadas a seguir.

- **Definir o poluente a ser medido:** Tendo em vista a extensa gama de sensores disponíveis, para diferentes poluentes, parte-se do objetivo do projeto e das possíveis fontes do local para escolher o poluente de interesse. Se a região de interesse for próxima de vias com grande tráfego de automóveis ou de estradas, por exemplo, poderiam ser escolhidos sensores para medição de NO<sub>2</sub> ou MP, já em locais onde há indústrias de óleo e gás, os principais poluentes de interesse seriam os compostos orgânicos voláteis, que incluem o benzeno;

- **Considerar a faixa e o limite de detecção:** Após definir o poluente é importante observar que muitos deles estão presentes no ar em concentrações baixas e o que vai determinar se o sensor é indicado será o seu limite de detecção (normalmente fornecido pelo fabricante), que é a menor concentração detectável de um poluente no ambiente. Os limites de detecção sugeridos são de 5 µg.m<sup>-3</sup> para o

MP<sub>2,5</sub> e de 10 µg.m<sup>-3</sup> para o MP<sub>10</sub>, já as faixas de detecção – levando em conta as concentrações esperadas no ambiente nos Estados Unidos – são de 0-40 µg.m<sup>-3</sup> para o MP<sub>2,5</sub> e de 0-100 µg.m<sup>-3</sup> para o MP<sub>10</sub>. Ressalta-se que os valores de faixa de detecção podem ser maiores ou menores dependendo da existência de fontes nas proximidades;

- **Verificar a calibração:** A calibração é processo de ajuste e checagem das medições de um instrumento através de um valor de referência, garantindo que os dados obtidos são acurados, e é de extrema importância visto que a performance do sensor pode mudar com o tempo de uso. Alguns sensores são calibrados pelo fabricante e contém a informação da durabilidade dessa calibração sendo que, de modo geral, o manual do fabricante fornece instruções sobre como efetuar a calibração do sensor;

- **Entender o tempo de resposta:** Uma grande vantagem dos sensores de baixo custo é o tempo de resposta baixo, permitindo o monitoramento em tempo real. No entanto, essa característica é mais indicada para observar as rápidas oscilações na concentração dos poluentes, enquanto para uma resposta mais lenta pode ser útil para o monitoramento de poluentes cuja variação esperada é gradual. Para monitoramento fixo ou estacionário um tempo de resposta de 1 minuto é suficientemente desejado para um sensor. Por fim, o tempo de leitura pode ser ajustado nos sensores que possuem tempo de resposta baixo, permitindo o ajuste conforme a aplicação;

- **Verificar a durabilidade, qualidade e proteção:** A durabilidade e a qualidade dos materiais que compõem o sensor é importante pois, dependendo da sua utilização, ele pode sacudido, sofrer quedas e ser atingido por outros objetos, trazendo danos ao seu funcionamento. Além disso, ao manter o sensor em um ambiente externo ele estará suscetível à poeira, calor, vento, chuvas e variações de temperatura, entre outras condições adversas, por isso o material utilizado para envolver seus componentes deve ser adequado para protegê-los. Nesse sentido, ao longo da utilização do sensor é importante considerar o *drift*, que é uma mudança gradual na característica das respostas do sensor e que pode levar a um desvio no valor das concentrações. Uma forma de reduzir essa mudança é realizar a calibração ou recalibração do sensor com frequência, após observar sua tendência de comportamento e as possíveis derivações ocorridas com o tempo.

- **Considerar as condições de uso:** Há sensores que são mais simples de instalar e configurar do que outros, voltados desde projetos para crianças até usuários com conhecimento de programação mais avançado, devendo as informações fornecidas para seu uso ser acessíveis e indicadas ao público que irá utilizá-los. É importante também avaliar o fornecimento de energia, duração da bateria, a forma como os dados são processados, armazenados e transmitidos, verificando conforme as disponibilidades do local de monitoramento como, por exemplo, a facilidade de pontos de energia para instalação do sensor e acesso à internet.

Tendo escolhido o sensor de forma apropriada, a melhor maneira de avaliar sua qualidade é colocando-o próximo ou junto a um equipamento de referência, coletando dados de ambos. Dessa forma, com dados obtidos sob as mesmas condições atmosféricas e meteorológicas, é possível comparar quão precisos são os sensores de baixo custo em relação aos métodos oficiais (EPA, 2020a). Essa comparação é feita através de parâmetros estatísticos, como os definidos na seção 2.3, e os resultados obtidos determinam se o sensor é ou não indicado para a aplicação desejada. A EPA define cinco áreas de aplicação baseadas na performance do sensor a partir dos resultados obtidos em análise e comparação, são elas (WILLIAMS et al., 2014):

I. **Educação e Informação:** Refere-se ao uso do sensor como ferramenta educacional para aulas de ciência, matemática, informática e engenharia, permitindo aos alunos monitorar e compreender as questões relativas à qualidade do ar e como fonte de informação e conscientização da população em geral, podendo ser utilizado para comparar a qualidade do ar em ambientes externos e internos, nos locais de trabalho, em casa, ou nas escolas. Nessa área de aplicação os sensores são usados em comparações relativas e não para a medição de valores absolutos, nas quais o principal intuito é promover a ciência e tecnologia em diferentes níveis.

II. **Identificação e caracterização de *Hotspot's*:** É a identificação de possíveis fontes de emissão através do monitoramento de uma fonte suspeita, usando sensores fixos ou móveis. Um exemplo seria a instalação de uma rede de sensores ao redor de uma indústria ou próxima a uma rodovia para monitorar as variações da concentração ao longo do tempo. De modo geral, os sensores estariam sujeitos a concentrações altas por estarem próximos à fonte de emissão.

**III. Complemento da rede de monitoramento (ou rede de monitoramento suplementar):** Colocação de sensores dentro de uma área de monitoramento regulamentar (estatal ou local) existente para preencher os locais nos quais não há estações de monitoramento. Os sensores podem ser colocados em áreas entre os equipamentos oficiais, seja em pontos fixos ou plataformas móveis e serviriam para identificar possíveis fontes de poluição e para melhorar o fornecimento de informações da qualidade do ar em diferentes locais.

**IV. Monitoramento da exposição pessoal:** Aplicação de monitoramento da qualidade do ar a qual um indivíduo está exposto, sobretudo quando há alguma condição clínica agravante, para identificar os locais críticos durante suas atividades do dia a dia e avaliar o impacto potencial sobre sua saúde.

**V. Monitoramento regulamentar:** É o monitoramento que determina se a concentração de poluentes de uma área está dentro dos padrões de qualidade do ar. Esse controle é feito por agências e órgãos ambientais que possuem requisitos para a regulamentação dos equipamentos e instrumentos utilizados no monitoramento. Até o presente momento nenhum sensor de baixo custo foi aprovado para uso nesse tipo de aplicação.

Considerando essas aplicações, a EPA sugere ainda objetivos de performance para cada uma delas, levando em conta os parâmetros de viés, precisão e completude de dados (Tabela 4). Esses parâmetros podem ser calculados para uma série de dados de uma comparação entre um sensor e um equipamento de referência utilizando a ferramenta *Macro Analysis Tool* (MAT), disponível de forma gratuita para download no site da agência. Trata-se de uma ferramenta baseada no Excel que gera o gráfico da série temporal da variação das medições ao longo do tempo, o gráfico da correlação e a equação da regressão linear para a determinação da precisão, viés e ajuste dos dados (EPA, 2020d). Apesar das vantagens que essa ferramenta oferece, ainda há algumas limitações como a necessidade de ajustar os dados de forma manual ao formato de entrada da planilha, necessidade de indicação dos dados anômalos e a impossibilidade de uso para intervalos que variam.

TABELA 4 - SUGESTÕES DE OBJETIVOS DE PERFORMANCE PARA DIFERENTES APLICAÇÕES DO USO DE SENSORES EM COMPARAÇÃO COM EQUIPAMENTOS DE REFERÊNCIA.

Nível	Área de aplicação	Poluentes	Erros de precisão e viés	Completeness de dados	Fundamentação/Justificativa
I	Educação e Informação	Todos	< 50%	≥ 50%	O mais importante é demonstração de que o poluente existe em alguma vasta gama de concentrações, por isso o erro não é relevante.
II	Identificação e caracterização de <i>Hotspot's</i>	Todos	< 30%	≥ 75%	É necessária uma maior qualidade dos dados para garantir não só que o poluente de interesse existe no ar, mas também que está numa concentração próxima do seu verdadeiro valor.
III	Monitoramento suplementar	Poluentes Tóxicos no Ar (incluindo COV's)	< 20%	≥ 80%	Os dados devem ter qualidade suficiente para garantir que a informação adicional seja útil e não torne a qualidade do ar menos compreensível.
IV	Exposição Pessoal	Todos	< 30%	≥ 80%	Os erros de precisão e viés sugeridos são os presentes na literatura científica em diversas circunstâncias. Taxas de erro superiores a estas tornam difícil compreender como, quando e por que as exposições pessoais ocorreram, tendo em vista que muitos fatores podem influenciar a exposição pessoal a poluentes atmosféricos.
V	Monitoramento Regulamentar	O <sub>3</sub> CO e CO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> MP <sub>2,5</sub> e MP <sub>10</sub>	< 7% < 10% < 15% < 10%	≥ 75%	São necessárias medições precisas para garantir a obtenção de dados de alta qualidade que cumpram os requisitos regulamentares.

FONTE: Williams et al. (2014).

Destaca-se que no Brasil, assim como nos Estados Unidos, ainda não há uma regulamentação quanto ao monitoramento suplementar (WILLIAMS et al., 2014). No entanto, a Europa regulamentou esse tipo de monitoramento em 2008 através das chamadas medidas indicativas, que fornecem informações sobre a variabilidade espacial das concentrações de poluentes, complementando as estações regulamentadas (EUROPEAN COMMISSION, 2008). Os requisitos de performance

para esse tipo de monitoramento são menos rigorosos, variam conforme o poluente e são indicados pela incerteza máxima aceitável, sem divisão entre erros de precisão e viés.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para avaliar o uso do sensor de baixo custo SDS011 para monitoramento da concentração de material particulado, sendo apresentados os equipamentos utilizados para comparação do sensor, a descrição dos locais onde foram realizadas as medições e as condições e especificidades de cada monitoramento.

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO E COLOCAÇÃO DOS SENSORES

Para a comparação e compreensão dos dados com sensores em relação aos dados dos equipamentos de referência é necessário determinar a localização e colocação ideal dos sensores. A colocação refere-se ao processo de manter operando um equipamento de referência ou que possua alguma certificação de uso e um outro equipamento não certificado, tais como os sensores de baixo custo, ao mesmo tempo e no mesmo local, numa análise em campo, durante o período de avaliação definido (EPA, 2020e). Portanto, para avaliar o conjunto de dados obtidos, a EPA disponibiliza um Guia de Instruções com as etapas necessárias para uma colocação bem-sucedida (EPA, 2018), além de um relatório de avaliação de sensores de material particulado de baixo custo (EPA, 2014), que serviram como base para este estudo.

Primeiramente, é recomendado o planejamento da avaliação do sensor, definindo o número de sensores a serem utilizados (pois a utilização de mais de um sensor possibilita a identificação de falhas e variações de leitura, permitindo melhor avaliação de sua acurácia), bem como a verificação dos outros recursos necessários para a sua instalação, como energia elétrica, conexão com a internet, *software* para transmissão de dados, computadores, entre outros (EPA, 2018). Considerando então as recomendações para essa etapa, foi verificada a existência e disponibilidade de energia elétrica em cada ponto de monitoramento e a necessidade de utilização de extensões e outros cabos adicionais para a conexão do sensor SDS011. Além disso, os dados foram preferencialmente transmitidos para o um armazenamento em nuvem via Wi-Fi e o computador utilizado foi o *Raspberry Pi*, com o uso dos códigos de aquisição e transmissão de dados desenvolvidos durante este estudo. Ainda na etapa do planejamento da avaliação, seguiu-se a recomendação de testar todo o

sistema conectado antes de instalar no local definido, a fim de identificar potenciais problemas de funcionamento ou de conexão.

A segunda etapa consiste na realização das medições e para isso é necessário definir o posicionamento dos sensores no local e em relação ao equipamento de referência, a frequência de aquisição de dados, além de considerar outros fatores que podem afetar os resultados, tais como temperatura e umidade extrema e a variação que alguns poluentes podem ter em relação às estações do ano, e de verificar se há possíveis interferências durante as medições como o bloqueio ou entupimento das entradas de ar dos sensores, problemas de fornecimento de energia, a segurança das conexões e de toda a parte elétrica, entre outros (EPA, 2018). Procurou-se então instalar os sensores e o *Raspberry Pi* em locais protegidos, colocando abrigos e fixações que fossem necessárias, mantendo sua entrada de ar longe de estruturas ou objetos que pudessem bloqueá-la e a uma altura próxima à da entrada de ar do equipamento de referência. A frequência de aquisição dos dados foi definida de forma a ser sempre menor que a do equipamento de referência, permitindo o ajuste posterior de seus dados em diferentes médias. Além disso, buscou-se obter dados de temperatura e umidade locais para a análise da influência desses parâmetros na leitura do sensor SDS011.

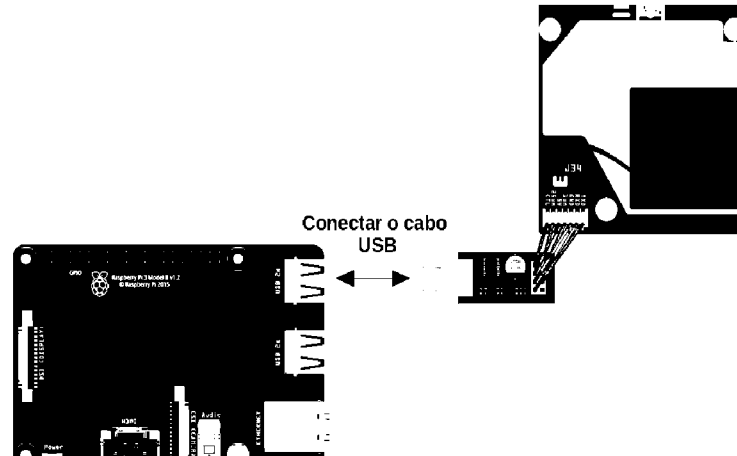
As demais etapas da colocação são feitas após a instalação dos sensores e ao início do monitoramento e dizem respeito à revisão e recuperação de dados, avaliando os padrões esperados, possíveis interferências e existência de *outliers*, à comparação dos dados obtidos através do sensor de baixo custo e do equipamento de referência, avaliando parâmetros como a completude dos dados, a correlação, a precisão e o viés, e ao uso do sensor de baixo custo considerando os resultados obtidos e seus ajustes (EPA, 2018).

### 3.2 CONEXÃO DOS SENSORES E CONFIGURAÇÃO DO RASPBERRY PI

O sensor de material particulado SDS011 é conectado ao *Raspberry Pi* a qualquer uma de suas portas USB, e a partir do momento que é feita a conexão é possível identificar a porta através do terminal de comando para que ela seja indicada no código de leitura do sensor. Em alguns casos foi necessário utilizar também um ou mais cabos extensores de USB para aumentar o comprimento entre o SDS011 e o *Raspberry Pi*. De modo geral a conexão do sensor fica como

mostrado na figura 7, sendo que as modificações ou substituições feitas no decorrer deste estudo serão apresentadas nas seções que tratam sobre cada monitoramento em específico.

FIGURA 7 - CONEXÃO DO SENSORES AO RASPBERRY PI.



FONTE: O autor (2020).

Para sua utilização, em cada local de monitoramento o *Raspberry Pi* conta com um cartão de memória e uma fonte de alimentação. A instalação do sistema *Raspbian* é feita antes da conexão dos sensores e as configurações iniciais dos códigos de transmissão e aquisição de dados, que serão descritos na seção 3.2, são feitas em seguida. Ao se instalar o conjunto (*Raspberry Pi* + SDS011) no local de monitoramento, é feita a configuração da internet disponível via Wi-Fi ou cabo. Ressalta-se que apesar de as configurações dos códigos terem sido feitas anteriormente a colocação do sensor nos pontos de monitoramento, foi possível acessar o *Raspberry Pi* em cada ponto, seja para conferência ou modificação de quaisquer um dos códigos, utilizando um monitor de computador, mouse e teclado conectados ao microcomputador.

### 3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS

Neste trabalho, os códigos para a aquisição e transmissão de dados foram desenvolvidos em linguagem *Python*. O código do sensor de material particulado efetua a leitura da porta serial a cada 5 segundos e gera dois arquivos de texto (.txt):

um para armazenar as concentrações de  $MP_{2,5}$  e outro de para as concentrações de  $MP_{10}$ . A leitura do sensor também pode ser vista no terminal de comando do *Raspberry Pi* durante o período de monitoramento. Todos os arquivos foram configurados através do código para armazenar o horário e data de cada leitura e são precedidos de um cabeçalho contendo essas informações. A figura 8 mostra um exemplo de arquivo de texto gerado para a leitura da concentração de  $MP_{2,5}$  a partir do sensor SDS011.

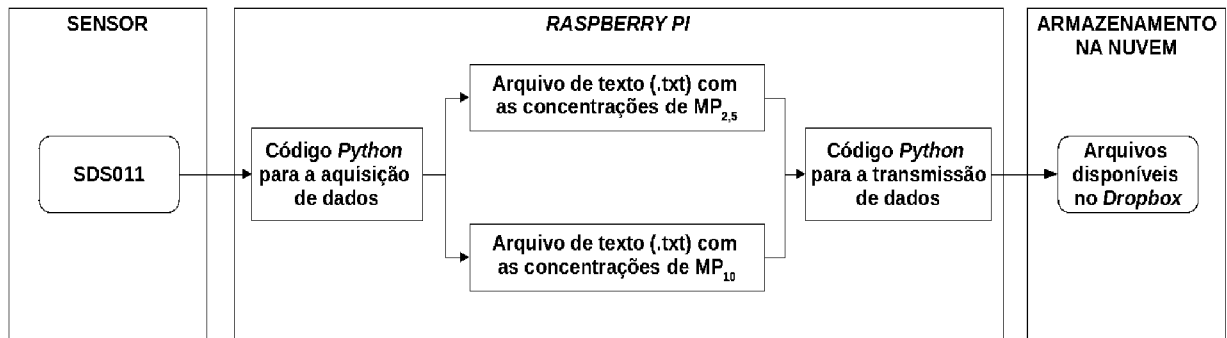
FIGURA 8 - EXEMPLO DE ARQUIVO DE TEXTO GERADO PARA DADOS DO SENSOR SDS011.

```
ano-mes-dia horario | nome | concentracao | unidade
2020-02-07 08:04:51 | PM2.5 | 4.10 | µg/m^3
2020-02-07 08:04:56 | PM2.5 | 4.10 | µg/m^3
2020-02-07 08:05:00 | PM2.5 | 4.00 | µg/m^3
```

FONTE: O autor (2020).

Os arquivos ficam armazenados na memória interna da placa e são enviados para o armazenamento em nuvem através da instalação do pacote *Dropbox* para *python*. Tendo o *Raspberry Pi* sido conectado à rede de internet disponível no ponto de monitoramento, é feita a sincronização do sistema de armazenamento do *Dropbox* através da sua Interface de Programação de Aplicação (API), possibilitando o acesso remoto e download dos dados. Dessa forma, é criada uma pasta para cada ponto (ou estação) usando uma mesma conta do *Dropbox*, centralizando todos os dados e facilitando o seu acesso e download. Assim, para cada pasta correspondente a um ponto de monitoramento, são criadas outras pastas que armazenam os arquivos de texto gerados durante o período de leitura, considerando cada dia e a cada hora de monitoramento. Ressalta-se que todo o sistema de aquisição e armazenamento de dados na memória interna do *Raspberry Pi* e no *Dropbox* foi configurado para iniciar automaticamente ao ligar o microcomputador, evitando assim que o sistema pare de funcionar por completo caso haja quedas de energia. A figura 9 mostra o fluxograma da sequência de aquisição e armazenamento dos dados. Ressalta-se que mesmo nos monitoramentos em que não havia a análise da concentração de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$  através dos equipamentos de referência foi mantido o código para leitura de ambas concentrações pelo SDS011, a fim de permitir a avaliação posterior se há relação entre o aumento ou diminuição dessas concentrações.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRANSMISSÃO DE DADOS.



FONTE: O autor (2020).

### 3.4 ANÁLISE DA INTER VARIABILIDADE DO SENSOR SDS011

A fim de analisar a inter variabilidade do sensor SDS011, foi feito um teste inicial em ambiente fechado utilizando todos os sensores disponíveis para ser usados nos monitoramentos propostos neste trabalho. Foram então utilizados sete sensores, numerados e identificados conforme seus respectivos números de série (Tabela 5), sendo um sensor novo, ainda lacrado, quatro sensores novos que já haviam sido testados e dois sensores que já haviam sido utilizados em monitoramentos ou testes anteriores e portanto tinham mais tempo de uso e possibilidade de falhas.

TABELA 5 - IDENTIFICAÇÃO DOS SENSORES CONFORME NÚMERO DE SÉRIE.

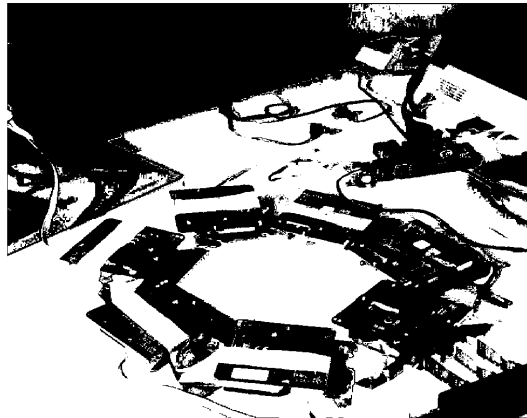
Identificação	Nº de série
Sensor 1	5001-CA89
Sensor 2	5002-9345
Sensor 3	5002-91F5
Sensor 4	5003-127C
Sensor 5	5002-98F5
Sensor 6	5003-471C
Sensor 7	5002-9806

FONTE: O Autor (2021).

Os sensores foram dispostos em um arranjo circular, de modo que as entradas de ar estivessem direcionadas para um mesmo ponto (Figura 10), evitando

assim oscilações causadas por grande diferença de fluxo de ar, sendo mantidos em funcionamento por um período de quatro dias. Após finalizado o período de teste, calculou-se a média das concentrações medidas para dar prosseguimento ao cálculo da inter variabilidade, considerando as concentrações de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ .

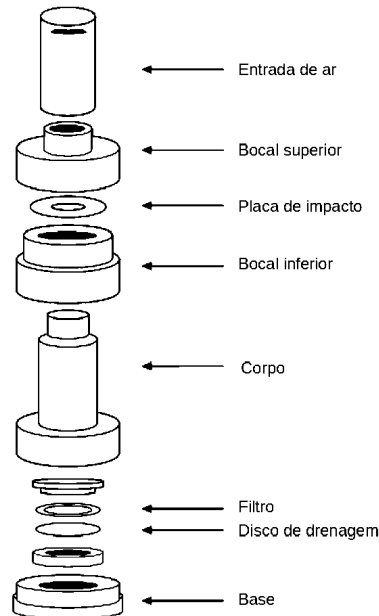
FIGURA 10 - DISPOSIÇÃO DOS SENSORES TESTADOS.



FONTE: O Autor (2021).

### 3.5 COMPARAÇÃO SDS011 E IMPACTADOR HARVARD

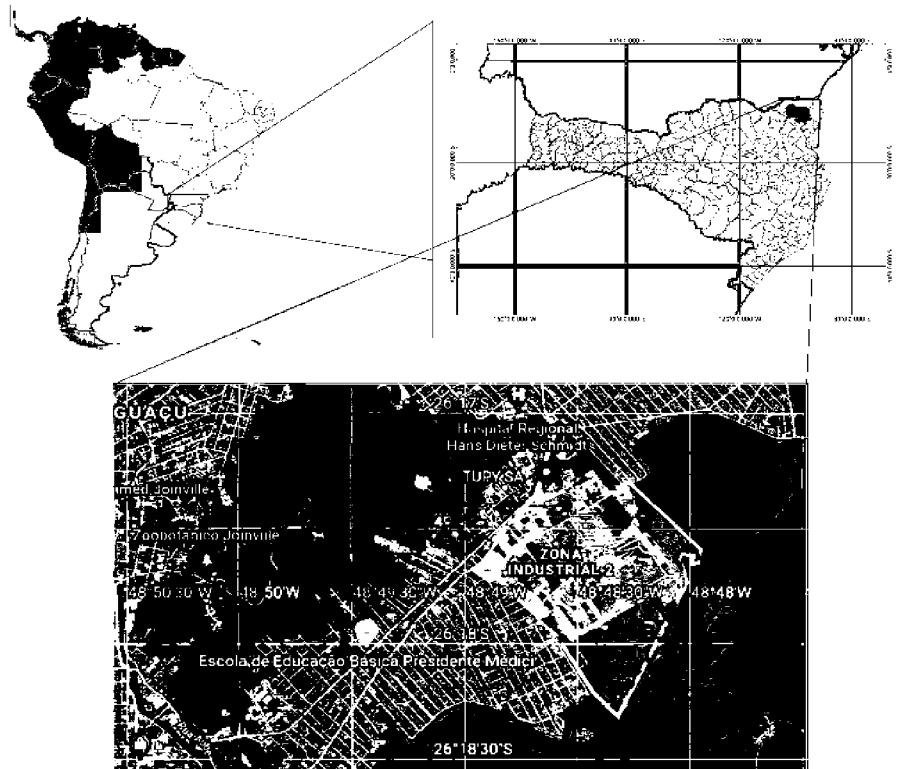
A primeira comparação a ter início neste estudo foi a do sensor SDS011 em relação ao impactador Harvard (Figura 11), realizada na cidade de Joinville. Este impactador é considerado um amostrador de baixo volume, está de acordo com o método de referência recomendado pela EPA para a determinação da concentração de  $MP_{2,5}$  e em conformidade com o descrito no Guia Técnico para Monitoramento da Qualidade do Ar, que segue a mesma recomendação (EPA, 2020f; MMA, 2020). Este equipamento, desenvolvido pela Escola de Saúde Pública de Harvard, possui uma bomba de vácuo que permite a configuração da vazão volumétrica de entrada para a amostragem de  $MP_{2,5}$  e seu princípio de funcionamento se baseia na impactação inercial das partículas que entram pela parte superior do equipamento e são depositadas no filtro de polycarbonato no fundo do impactador (NISHIDA, 2017).

FIGURA 11 - DIAGRAMA DO IMPACTADOR *HARVARD*.

FONTE: Adaptado de Sarnat; Demokritou; Koutrakis (2003).

O Impactador *Harvard* estava instalado numa escola na cidade de Joinville (SC), em uma região com tráfego intenso de veículos e dentro da região de uma indústria cimenteira, denominada Zona Industrial Tupy. A Escola de Educação Básica Presidente Médici fica situada na Rua Prefeito Helmuth Fallgatter, 1449, Bairro Boa Vista e foi escolhida para instalação do sensor pois a medição de  $MP_{2,5}$  já vinha sendo feita no local pela aluna de Doutorado Jéssica Caroline dos Santos Silva, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná (UFPR). A Figura 12 mostra a localização da cidade dentro do estado delimitado na área do território nacional, a localização do ponto de monitoramento na cidade (destacado pelo ícone em amarelo) e a sua proximidade em relação à zona industrial (área destacada em amarelo).

FIGURA 12 - CIDADE DE JOINVILLE, LOCAL DE MONITORAMENTO E ZONA INDUSTRIAL.



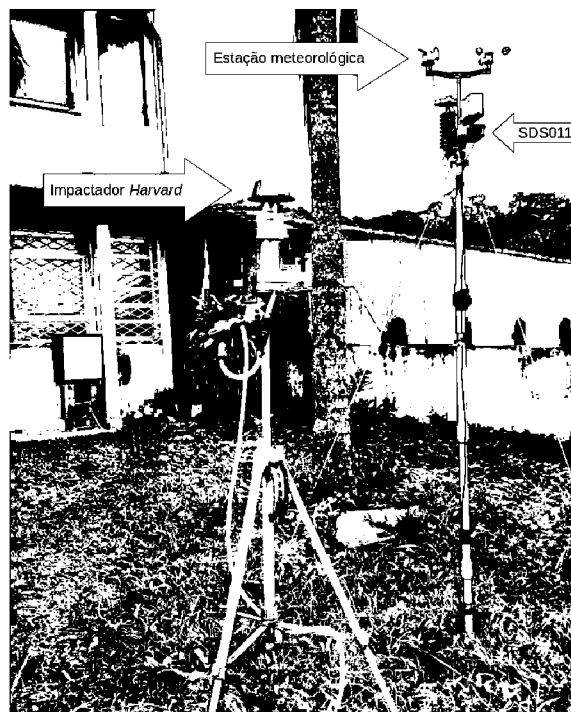
Sistema de Coordenadas Geográficas UTM Zone 22S e Datum WGS84 SIRGAS2000  
Bases Cartográficas IBGE 2017

FONTE: O autor (2020).

O cálculo das concentrações de  $MP_{2,5}$  obtidas após a pesagem dos filtros tem sido feito pela aluna Jéssica e os valores diários de concentração são disponibilizados, conforme o andamento da pesquisa, para uso neste estudo de comparação. O monitoramento teve início com a instalação do conjunto para aquisição e transmissão de dados no dia 16 de Setembro de 2019. Foi instalado, além do sensor SDS011, uma estação meteorológica, do fabricante MiSol, que mede temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, ponto de orvalho, rajadas de vento e taxa de precipitação, armazenando e exibindo estas informações num tablet que permite a seleção da frequência do registo de dados em minutos (1, 2, 5, 10 ou 15 minutos) e a subsequente exportação dos dados através de um software fornecido pelo fabricante. Essa estação foi fixada ao lado do Impactador Harvard e sua utilização visa a obtenção de dados meteorológicos locais para posterior análise da relação da temperatura e umidade com a concentração de material particulado. O sensor SDS011 foi então instalado ao lado do Impactador Harvard, dentro de uma caixa rígida de proteção com um orifício para entrada de ar, acoplado através da

caixa à haste da estação meteorológica que havia sido instalada anteriormente, mantendo uma altura próxima a da entrada de ar do Impactador (Figura 13). Já o *Raspberry Pi* demanda maior proteção em sua parte elétrica portanto foi instalado a cerca de 3 metros do sensor, utilizando cabos USB para conectá-lo, embaixo de uma marquise. Dessa forma, também se mantém a facilidade de acesso à placa caso seja necessário alterar algum código e configuração ou se for desejável salvar os arquivos em um armazenamento externo.

FIGURA 13 - IMPACTADOR HARVARD, ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E SENSOR SDS011 FIXADOS NO LOCAL DE MONITORAMENTO.

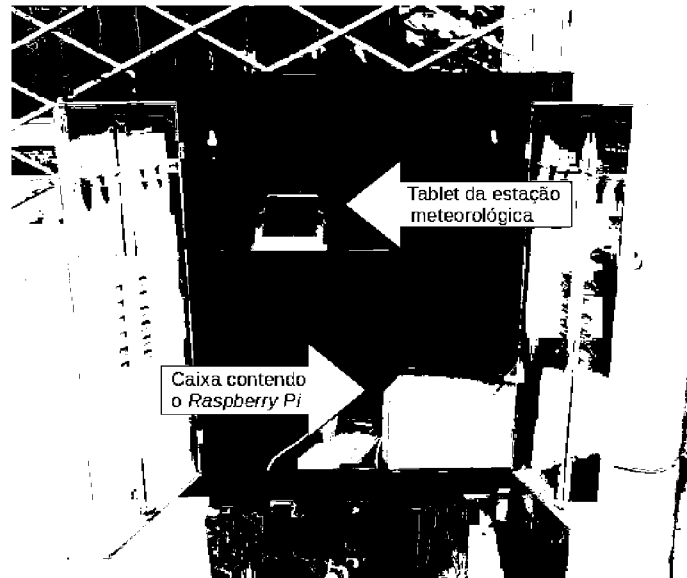


FONTE: O autor (2020).

O sensor SDS011 foi substituído no dia 20 de Novembro de 2019 devido a um problema possivelmente causado por chuvas e ventos fortes que atingiram o local durante a semana, o que fez com que a resposta do sensor atingisse o seu limite de detecção e não retornasse ao funcionamento normal. Portanto, o sensor saturado foi removido do local, substituído por um novo, e levado ao Campus Politécnico da UFPR para averiguação dos danos que as condições citadas pudessem ter causado. No dia 18 de Fevereiro de 2020 foi colocado um gabinete no local de monitoramento para abrigar o *Raspberry Pi*, que foi mantido em uma caixa de isopor conferindo maior isolamento do calor, o *tablet* da estação meteorológica e outros

componentes elétricos, como cabos e extensões, garantindo maior proteção (Figura 14).

FIGURA 14 - GABINETE QUE ABRIGA O TABLET DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E O RASPBERRY PI.



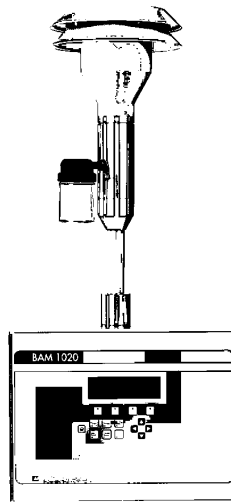
FONTE: O autor (2020).

Tendo sido esse o primeiro monitoramento deste estudo, foi também o que possibilitou o teste do sistema de aquisição e transmissão de dados e suas devidas melhorias. O local possuía internet disponível que cedida para utilização na pesquisa através da rede Wi-Fi ou cabo de rede, tendo sido utilizado cabo para conexão visto que o sinal na área externa era fraco. Em relação ao sistema descrito na seção 3.3, as principais diferenças são que antes a transmissão dos dados para o *Dropbox* era feita utilizando um código do tipo *shell*, desenvolvido durante a pesquisa, ao invés da interface API, que o sistema não estava configurado para iniciar automaticamente, portanto qualquer perda de energia tornaria necessário seu reestabelecimento por configuração manual e que as pastas eram criadas apenas por dia de monitoramento, ou seja, os arquivos de todas as 24 horas corridas eram armazenados em uma única pasta. As modificações foram feitas conforme observada a necessidade de alterações para melhor funcionamento do sistema e através das experiências e testes dos outros monitoramentos, que serão detalhados nas seções seguintes, chegando finalmente ao sistema explicado na seção 3.2.

### 3.6 COMPARAÇÃO SDS011 E BAM1020

O equipamento utilizado na mais recente comparação do sensor SDS011 deste trabalho é o BAM1020 (Figura 15). Ele funciona através do princípio de atenuação da radiação Beta ( $\beta$ ) fornecendo de forma contínua e automática, com ciclos de medição de 1 hora, os valores de concentração de partículas em suspensão no ar. O BAM 1020, fabricado pela Met One Instruments, além de ser considerado como método equivalente para medição de  $MP_{10}$ , foi o primeiro equipamento a receber essa classificação pela EPA para o monitoramento de  $MP_{2.5}$ . Além disso, também possui as mesmas classificações correspondentes pela União Europeia para a medição de  $MP_{10}$  e  $MP_{2.5}$  (MET ONE INSTRUMENTS INC., 2020).

FIGURA 15 - MONITOR DE ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO BETA MODELO BAM1020.



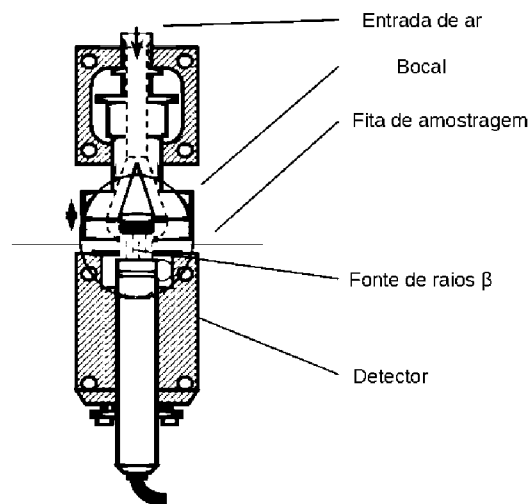
FONTE: Adaptado de Met One Instruments (2020).

O princípio da atenuação Beta consiste na contagem de partículas  $\beta$  que atravessam um meio (neste caso, uma fita de amostragem) a partir de uma fonte de Carbono 14 ( $^{14}C$ ) que emite um sinal que é detectado. No BAM1020 um pequeno elemento  $^{14}C$  emite uma fonte constante de raios  $\beta$  ao início de cada período de amostragem, numa fita feita de fibra de vidro. Os raios são detectados e contados inicialmente e então o bocal de amostragem do equipamento avança para o ponto inicial da fita. A partir de então, uma bomba de vácuo puxa uma quantidade constante e controlada do ar externo até a superfície da fita, carregando-a com

material particulado. Ao final da amostragem, o material particulado depositado na fita é posicionado entre a fonte de raios  $\beta$  e o detector, gerando assim uma atenuação no sinal dos raios  $\beta$ . A diferença entre esse sinal e o inicialmente detectado é utilizado para determinar a massa de material particulado depositado (MET ONE INSTRUMENTS INC., 2019a). A figura 16 mostra o detalhe do sistema de medição do monitor de atenuação Beta BAM1020.

A comparação do sensor SDS011 com o equipamento BAM1020 está sendo feita através de uma colaboração entre a UFPR e o Instituto Água e Terra (IAT), do Instituto Ambiental do Paraná (IAP), na cidade de Ponta Grossa (PR). O equipamento instalado na estação de Ponta Grossa mede as concentrações de PTS e  $MP_{10}$ .

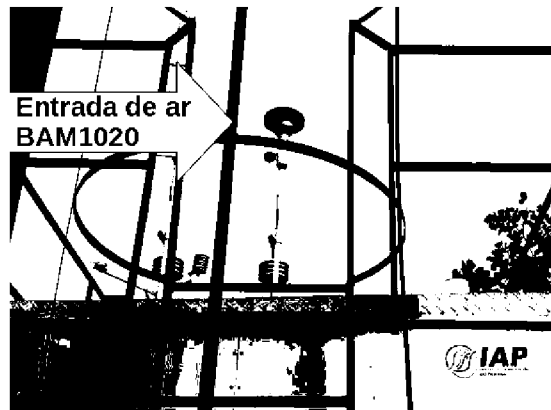
FIGURA 16 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DO BAM1020.



FONTE: Adaptado de New Solar Sky (2020)

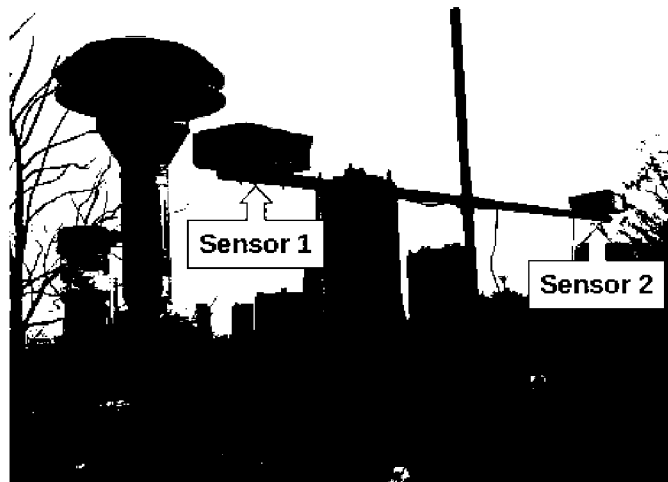
No dia 12 de Julho de 2020 foram instalados dois sensores SDS011, a fim de permitir a análise do comportamento do sensor considerando os dados medidos simultaneamente em duplicata. Os sensores foram fixados na parte superior do *container* que contém os equipamentos do IAT (Figura 17), mantendo um deles mais próximo à entrada de ar do BAM1020 e separando-os com o uso de uma haste (Figura 18), a fim de avaliar as diferenças de leitura dos sensores e do equipamento. Os sensores SDS011 foram conectados a um *Raspberry Pi*, que por sua vez foi mantido no interior do *container* da estação (Figura 19).

FIGURA 17 - ENTRADA DE AR DO EQUIPAMENTO NA PARTE SUPERIOR DO CONTAINER.



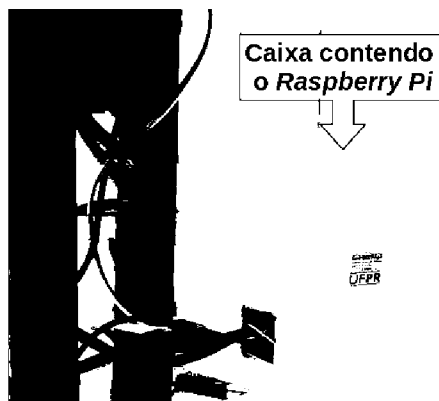
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 18 - POSIÇÃO DOS SENSORES EM RELAÇÃO À ENTRADA DE AR DO BAM1020.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 19 - RASPBERRY PI DENTRO DO CONTAINER DA ESTAÇÃO.



FONTE: O autor (2020).

Para a aquisição dos dados a única modificação feita foi a inclusão de mais um código para a leitura dos dados do novo sensor, alterado apenas na leitura da porta USB. Todo o sistema funciona como descrito seção 3.3 e como mais uma melhoria, o *Raspberry Pi* foi sincronizado ao software *Team Viewer*, permitindo sua conexão remota. Assim, além do acompanhamento dos dados armazenados no *Dropbox* em tempo real, é possível acessar remotamente o *Raspberry Pi* mantido na estação, visualizando sua interface (através de outro computador utilizando a identificação e a senha configurados previamente) e fazer alterações nos códigos.

### 3.7 COMPARAÇÃO SDS011 E TEOM

O equipamento TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance – TEOM) calcula a massa de partículas depositadas em um filtro através das alterações de frequência ocorridas por conta da vibração do elemento cônico. Sua entrada seletiva pode efetuar a amostragem de PTS, MP<sub>10</sub> ou MP<sub>2,5</sub> através de um processo contínuo. O ar ambiente é aspirado através de um filtro, a fluxo constante, que é pesado continuamente e que permite a obtenção das concentrações de massa de material particulado quase em tempo real, calculando ainda as médias de 1 hora, 8 horas, 12 horas e 24 horas (THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2007).

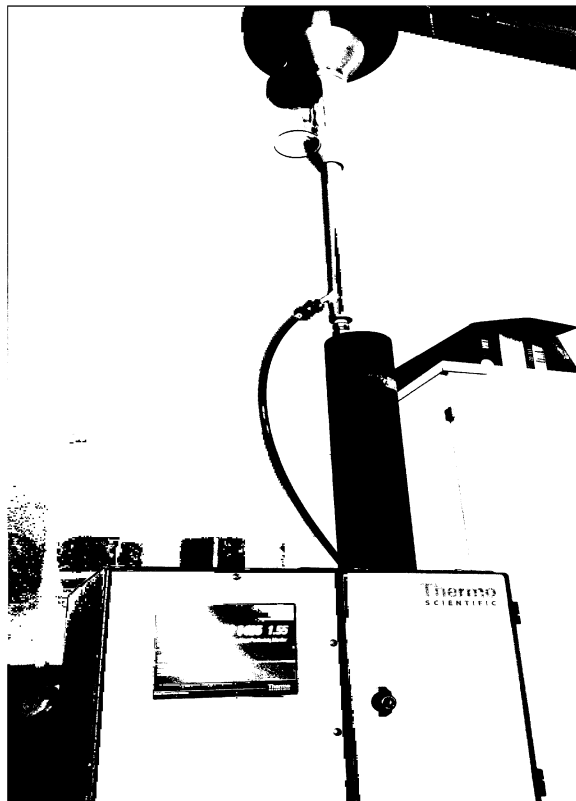
O ar é dividido de forma que parte é direcionado para a unidade analisadora e o restante é enviado para um exaustor. A unidade analisadora consiste em um cartucho de filtro de vidro revestido com teflon montado na ponta de um tubo de vidro afunilado. O tubo permanece fixo na base enquanto a ponta fica livre, vibrando em sua frequência natural. A vibração é detectada por um circuito eletrônico que a mantém em uma amplitude constante. À medida que as partículas que foram direcionadas para a unidade analisadora se acumulam no cartucho do filtro, a frequência natural de oscilação do tubo diminui. Assim, a taxa de massa é calculada a partir da relação que existe entre a mudança na frequência de oscilação do tubo e a massa do filtro. Por fim, essa taxa de massa é dividida pelo fluxo total na entrada de ar para obter da concentração de massa das partículas no ar (THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2007).

Este equipamento, em sua versão TEOM 1405, é considerado método equivalente pela EPA (EQPM-1090-079) para medição de MP<sub>10</sub>. Dentre as vantagens do TEOM estão sua operação contínua e a medição de massa direta que

diminui as incertezas quando comparada a outros tipos, tais como a atenuação beta e a dispersão de luz. Além disso, os dados medidos são facilmente transmitidos através de saídas analógicas, uma porta RS232 e uma porta USB, e seu armazenamento interno garante o armazenamento de uma grande quantidade de dados para visualização ou download posterior (THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2007, THERMO FISHER SCIENTIFIC, 2019).

O TEOM utilizado na pesquisa foi disponibilizado pela empresa EnvEx Engenharia e Consultoria e mantido no laboratório LEA-2, do campus Politécnico da UFPR (Figura 20), para a comparação com o SDS011 utilizando triplicatas. Os sensores foram fixados em uma altura próxima à da entrada de ar do equipamento (Figura 21), com a aquisição de dados feita diretamente através de um computador. Os dados do TEOM foram obtidos com frequência de 1 minuto e os dos sensores com frequência de 5 segundos, sendo mantidos em funcionamento durante o período de uma semana, 15 de Janeiro de 2021 a 21 de Janeiro de 2021.

FIGURA 20 - EQUIPAMENTO TEOM NO LABORATÓRIO DA UFPR.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 21 - POSICIONAMENTO DOS SENSORES EM RELAÇÃO À ENTRADA DE AR DO TEOM.



FONTE: O autor (2020).

Por se tratar de um amostrador contínuo e gravimétrico, há uma dinâmica de filtragem ocorrendo que é definida pelos processos que surgem enquanto as partículas são coletadas, tais como a interação com gases transportados pelo ar, por outras partículas na corrente de ar da amostra ou até mesmo pelo meio filtrante. Tais processos podem resultar em um fator de amostragem positivo ou negativo na concentração de massa de material particulado. Além disso, a precisão dos dados horários do TEOM é de cerca de  $\pm 1,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , o que faz com que possam ser registrados alguns pequenos valores negativos por hora (0 a  $-5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) quando a verdadeira concentração de massa é muito baixa (0 a  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (RAY; VAUGHN, 2009).

No geral, valores horários de concentração não devem ser inferiores a cerca de  $-10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  e a orientação é de que pequenos valores negativos de hora em hora devem ser considerados "sem contaminantes" e então reportados/relatados. Quando usados para calcular médias diárias, todos os valores horários (tanto positivos quanto negativos) devem ser calculados como média usando a mesma ponderação (em relação à pesagem/gramatura/porcentagem). No entanto, os valores negativos de concentração podem ser resultado de uma falha do equipamento, como uma perda temporária de energia elétrica, falha no controle de fluxo ou no sistema da bomba de vácuo, ou ainda a falha de um componente eletrônico. Geralmente, falhas de equipamento geram picos negativos relativamente altos nos dados de concentração de massa e a existência de dados instáveis (muitos picos positivos e negativos) também podem ser indicadores de um problema no instrumento (RAY; VAUGHN, 2009).

### 3.8 ANÁLISE DOS DADOS E COMPARAÇÃO

Para a análise dos dados obtidos nas medições descritas, foram desenvolvidos códigos em linguagem *Python* para cada monitoramento que são similares entre si, com modificações apenas em questão das particularidades de cada equipamento de referência, tais como intervalo de aquisição de dados e formato do arquivo de saída. A primeira etapa dos códigos envolve o cálculo das médias, efetuando a leitura dos arquivos gerados pelo sensor SDS011 e calculando as médias por minuto e então as médias necessárias para comparação com o equipamento de referência. As médias são ajustadas e calculadas conforme o intervalo de medição do equipamento, já que alguns deles como o Harvard fornece uma concentração diária (média de 24 horas) enquanto BAM1020 e o TEOM fornecem intervalos menores.

É feita, através do código, a leitura do arquivo de extensão .xls/xlsx com os dados das concentrações do equipamento de referência, obtidas após coleta e pesagem dos filtros ou após a transferência dos dados usando um software. Além disso, o código faz as modificações necessárias em termos de disposição dos dados e extensões dos arquivos. Ressalta-se que as médias são calculadas a partir da leitura da data e hora de início e término dos dados do equipamento com o qual a comparação está sendo realizada, para que sejam calculadas usando o mesmo intervalo e possibilite uma melhor análise.

O código desenvolvido é também usado para a plotagem dos dados brutos do sensor SDS011 e de suas médias diárias, para a plotagem das médias do equipamento de referência e do SDS011 conforme o intervalo considerado e para construção do gráfico que representa a correlação entre as respostas do sensor SDS011 e do equipamento, de acordo com o exposto na seção 2.3.3. Além disso, a partir do gráfico de correlação, é feito o ajuste linear pelo método de regressão simples, obtendo a equação da reta ajustada para o conjunto de dados e sua representação gráfica, possibilitando ainda o cálculo do coeficiente de correlação de *Pearson* e do coeficiente de determinação  $R^2$ .

A análise do viés, da precisão, acurácia, do erro médio e da raiz do erro quadrático médio, podem então ser feita através da equação da reta ajustada ou das fórmulas apresentadas nas seções 2.3.5, 2.3.6 e 2.3.7, que são calculadas através do mesmo código mencionado anteriormente. Julgou-se necessário calcular

também as diferenças percentuais da média das leituras do SDS011 em relação as médias do equipamento de referência, conforme a Equação 12 na qual  $D$  é a diferença percentual,  $C_R$  é a leitura do equipamento de referência e  $C_{SDS011}$  é a leitura do sensor SDS011, sendo que seu valor absoluto é o mesmo fornecido pela fórmula usada para calcular o viés (Equação 6) multiplicado por 100.

$$D(\%) = \frac{C_R - C_{SDS011}}{C_R} \times 100 \quad (12)$$

A última etapa do código foi desenvolvida para análise da completude dos dados a partir da equação 2 da seção 2.3.2, sendo necessário analisar a partir dos dados brutos do sensor SDS011. É feita a leitura do arquivo de dados, selecionando o formato de data e horário e organizando segundo as médias horárias. Verifica-se então se houve horas sem monitoramento, calculando a completude com base nas horas esperadas e nas horas obtidas após a verificação. O cálculo das horas monitoradas foi feito levando em conta apenas o número de dias (multiplicando as horas obtidas por 24), visto que as comparações têm sido feitas com equipamentos que fornecem a concentração diária. No entanto, esse código pode ser ajustado para a análise de completude considerando outros intervalos (meses, anos, minutos, etc).

Para a análise dos dados do BAM1020, acrescentou-se uma etapa contendo os dados de temperatura e umidade, visto que os mesmos foram fornecidos pelo IAT. Portanto, o código para comparação com o BAM1020 é utilizado também para plotar gráficos que relacionam a concentração de material particulado e as variações de temperatura e umidade durante o período de monitoramento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas comparações descritas no que diz respeito ao funcionamento do sistema de transmissão e aquisição de dados, as condições específicas de cada monitoramento e a comparação com o equipamento de referência. Foram analisados os dados brutos e as médias do sensor SDS011, as médias dos equipamentos de referência, bem como a correlação, o ajuste linear e os demais parâmetros estatísticos que relacionam os dados do sensor SDS011 aos do Impactador *Harvard*, BAM 1020 e TEOM.

### 4.1 CUSTO DO SISTEMA

A Tabela 6 mostra o preço de cada componente utilizado na montagem do sistema, com alguns adicionais que não foram usados em todos os monitoramentos e que aumentaram o custo final nos quais foram utilizados. Portanto, o custo final aproximado de cada sistema instalado nos pontos de monitoramento deste estudo foi de R\$ 605,83, chegando a um valor máximo de R\$ 865,83 para o caso do uso de três unidades do sensor no monitoramento.

TABELA 6 - CUSTO DOS COMPONENTES UTILIZADOS PARA MONTAGEM DO SISTEMA

Componente	Preço (R\$)
<i>Raspberry Pi</i> modelo 3B+	399,99
Sensor SDS011	130,00 <sup>1</sup>
Cabo extensor USB	16,50
<b>Custo final aproximado:</b>	<b>R\$ 605,83</b>

<sup>1</sup> Calculado com base no valor do dólar no dia 28 de julho de 2020.

FONTE: O Autor (2020).

### 4.2 ARQUIVOS GERADOS E CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

Os arquivos de texto com os valores de concentração foram gerados corretamente, sem sobrescrita, sendo que o tamanho dos arquivos com os dados brutos Material Particulado no período de uma hora não ultrapassou 35 kilobytes (kB). Ou seja, considerando um máximo de seis arquivos de texto gerados – o que seria referente ao monitoramento de MP<sub>10</sub> e MP<sub>2,5</sub> utilizando triplicatas –, para 24 horas de monitoramento, o tamanho da pasta na qual os arquivos foram

armazenados não ultrapassou o correspondente a 6 Megabyte (MB). Sendo assim, os arquivos e pastas gerados não ocupam muita memória de armazenamento e seria viável manter o sistema funcionando por mais tempo usando apenas o armazenamento interno, caso fosse necessário ou não houvesse acesso à internet. Já no caso do armazenamento em nuvem, os limites de bytes que as opções de contas gratuitas oferecem são suficientes para um monitoramento durante um período longo. No caso do *Dropbox*, há disponibilidade de 2 Gigabytes (GB) de armazenamento gratuito (o que corresponde a aproximadamente 2000 MB) garantindo aproximadamente 1 ano de armazenamento de dados no caso de cada monitoramento realizado nessa pesquisa, levando em conta o total de cerca 180 MB de dados esperado por mês e 2160 MB de dados esperado por ano.

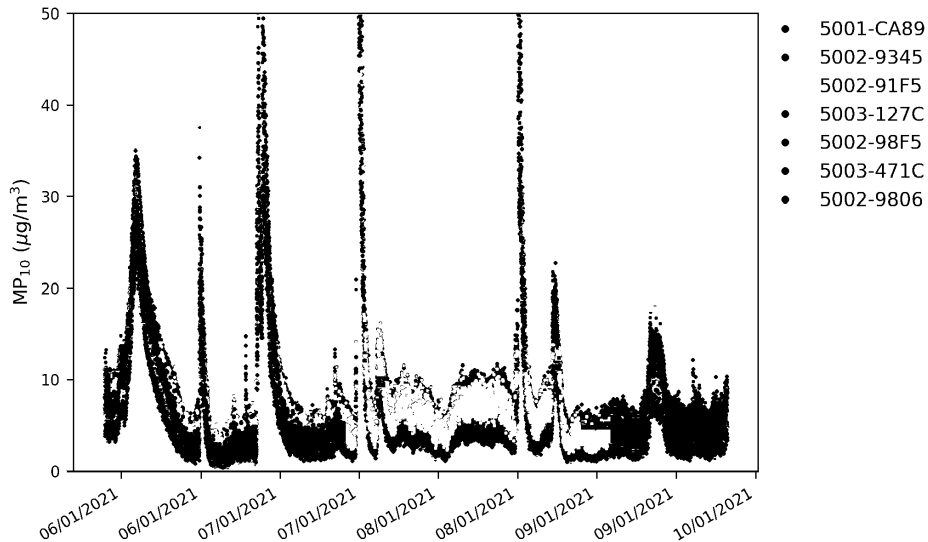
Ao executar o código que calcula as médias diárias e gera os gráficos, percebeu-se que alguns arquivos possuíam repetições do cabeçalho, o que se atribui à possíveis quedas de energia no local ou ao fato do *Raspberry Pi* ter sido ligado/religado repentinamente, fazendo com que os códigos comesçassem a ser executados e fossem abruptamente finalizados. Nesse caso, os cabeçalhos que constavam no meio dos arquivos foram removidos. Contudo, isso mostra que a configuração de inicialização automática do código de aquisição e transmissão dos dados funcionou corretamente e evitou perda de arquivos assim como a interrupção do monitoramento.

### 4.3 INTER VARIABILIDADE

Primeiramente, os gráficos apresentados nas figuras 22 e 23 resultantes do teste que visou avaliar a inter variabilidade do sensor SDS011 permitiram identificar um comportamento similar nas leituras de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , em relação aos picos observados nas imagens, atingindo um valor máximo de  $262,82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  na análise de  $MP_{10}$  e de  $71,88 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  na análise de  $MP_{2,5}$ . Julgou-se necessário diminuir a escala do eixo y para melhor visualização das curvas e picos. O comportamento observado nos gráficos e nos dados obtidos, permitiu confirmar que o processo de leitura ocorre de forma individual, porém simultânea, para os dados de  $MP_{10}$  e  $MP_{2,5}$ , de acordo com o descrito pelo fabricante ao apresentar as equações que fornecem o valor das concentrações a partir dos bytes obtidos na leitura serial baseada no

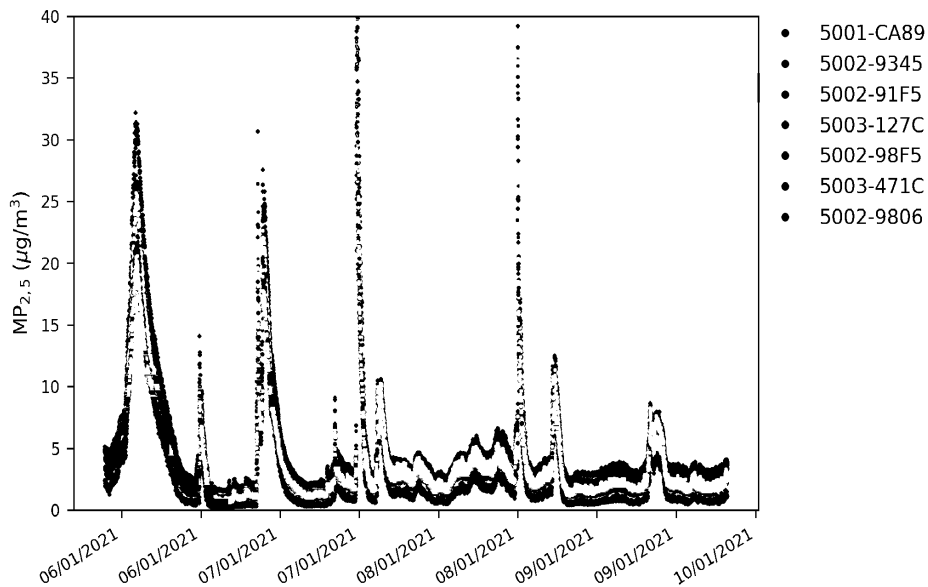
protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) presentes no Anexo I.

FIGURA 22 - DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{10}$  DOS SENSORES ANALISADOS.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 23 - DADOS DE CONCENTRAÇÃO DE  $MP_{2,5}$  DOS SENSORES ANALISADOS.



FONTE: O autor (2021).

O cálculo da inter variabilidade entre os sete sensores forneceu um valor de 55% na análise de  $MP_{10}$  e 57% na análise de  $MP_{2,5}$ , considerados altos para o uso de sensor. No entanto, ressalta-se que na literatura citada os testes utilizaram

apenas três unidades do sensor e foram feitos para condições constantes de concentração em laboratório e não para uma concentração variável. Portanto, optou-se por analisar os sensores separadamente, identificando os que tiveram leituras mais próximas entre si.

Dos sete sensores analisados, os numerados por 1, 2 e 4, conforme a descrição da tabela 5, obtiveram médias mais próxima em relação aos dados de  $MP_{2,5}$ , sendo elas iguais a  $4,98 \mu\text{g.m}^{-3}$ ,  $5,13 \mu\text{g.m}^{-3}$  e  $5,02 \mu\text{g.m}^{-3}$  respectivamente. Em relação às médias dos dados de  $MP_{10}$ , as mais próximas foram as do sensor 1, igual a  $9,73 \mu\text{g.m}^{-3}$ , do sensor 4, igual a  $9,62 \mu\text{g.m}^{-3}$ , e a do sensor 5, igual a  $9,71 \mu\text{g.m}^{-3}$ . Sendo assim, a inter variabilidade calculada na análise de  $MP_{2,5}$  foi igual a 2,97% e na análise de  $MP_{10}$  foi igual a 1,13%, ambas abaixo do valor máximo recomendado, sendo considerado esse o primeiro resultado positivo da análise do potencial de uso do sensor SDS011.

#### 4.4 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DE DADOS

Ao iniciar a análise dos dados de cada monitoramento, foram eventualmente detectados alguns picos de valores que excediam o limite de detecção do sensor – que é de  $999 \mu\text{g.m}^{-3}$  para o  $MP_{2,5}$  e  $1999 \mu\text{g.m}^{-3}$  para o  $MP_{10}$ . Portanto, para verificar possíveis erros que interfeririam no resultado da comparação, foi adicionado a cada código um “filtro” de dados cujo critério foi classificar os valores na faixa ou acima do limite de detecção do sensor como inconsistentes.

Como a frequência de leitura estipulada para o sensor SDS011 é pequena, de 5 segundos, a adoção desse critério não afeta de forma negativa a comparação, pois o conjunto de dados permanece grande o suficiente para que sejam calculadas as médias por minuto que depois podem ser ajustadas conforme o intervalo de interesse. Além da aplicação do filtro, a análise da consistência dos dados permitiu identificar dados faltantes ou sobrescritos, atribuídos à falhas de leituras ou problemas no sensor.

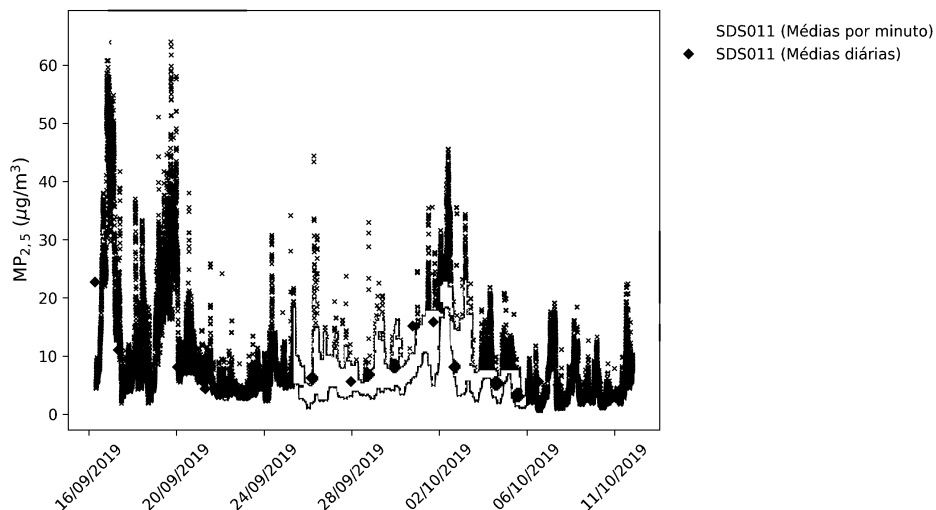
#### 4.5 COMPARAÇÃO SDS011 E IMPACTADOR HARVARD

A primeira análise dos resultados feita através do código descrito na seção 3.8 permitiu a avaliação inicial dos dados brutos do sensor SDS011 durante o

período de monitoramento. O período considerado foi o do início do monitoramento em Joinville até a data que se tinha o último registro das médias diárias calculadas do Impactador *Harvard*, para que a comparação dos resultados pudesse ser feita. A análise da consistência dos dados permitiu a identificação do intervalo no qual houve o problema com o sensor SDS011, atingindo o limite de detecção, seguido pelo intervalo no qual o monitoramento foi interrompido até que houvesse a substituição do sensor, retornando então ao funcionamento. Ressalta-se que o sensor saturado foi desmontado após ser removido do local e não foram constatados danos externos ou internos em sua estrutura, atribuindo-se o problema observado a possíveis danos em sua parte elétrica/eletrônica.

Tendo em vista que o comportamento do sensor observado a partir do dia 11 de Outubro de 2019 é considerado anômalo, foi plotado o gráfico com os dados ajustados por minuto e as médias diárias do SDS011 do início do monitoramento até essa data (Figura 24). Na figura 24 é possível perceber as oscilações das concentrações ao longo do dia e como a média se comporta em relação a essas oscilações, com a detecção de alguns picos pontuais.

FIGURA 24 - DADOS POR MINUTO E MÉDIAS DIÁRIAS DO SENSOR SDS11 DESCONSIDERANDO VALORES NO LIMITE DE DETECÇÃO DO SENSOR.

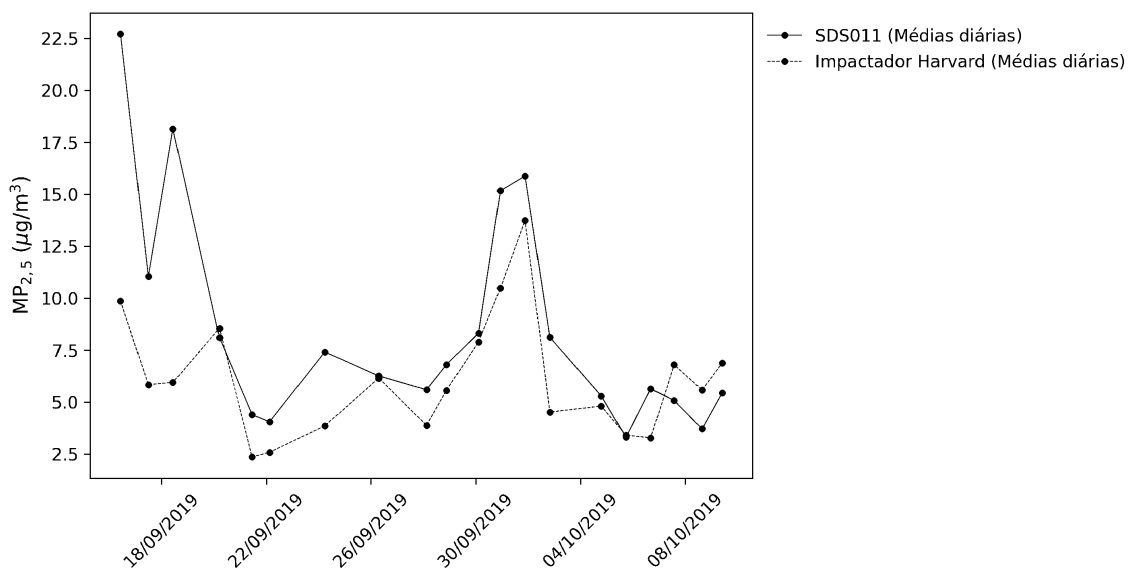


FONTE: O autor (2020).

Dando continuidade a comparação do sensor SDS011 em relação ao Impactador *Harvard*, a figura 25 mostra as médias do sensor e do equipamento. O gráfico permitiu identificar que, em geral, as médias do sensor foram superiores às

do equipamento, o que também é confirmado através do cálculo das diferenças percentuais visto que a maior parte dos valores obtidos foram negativos, evidenciando o valor superior medido pelo sensor. Ainda em relação às diferenças percentuais, elas variaram de 1,8% até 205,4%, resultando em uma diferença percentual média de 52%. Apesar de ser uma diferença grande, é importante ressaltar que dos 20 dados obtidos no período analisado, 8 tiveram uma diferença percentual menor que 25%, 4 tiveram uma diferença maior que 25 e menor que 50%, 2 uma diferença entre 50 e 75%, 4 uma diferença entre 75 e 100% e, por fim, 2 tiveram uma diferença maior do que 100%. Isso mostra que mais da metade dos dados forneceu uma diferença menor que 50% e o que tornou a diferença percentual média elevada foram os dados muito acima do valor de 100%. No entanto, espera-se que esses erros sejam reduzidos com a continuidade do monitoramento e da comparação, visto que a série de dados aumentará.

FIGURA 25 - MÉDIAS DIÁRIAS DO SDS011 E DO IMPACTADOR HARVARD DESCONSIDERANDO VALORES NO LIMITE DE DETECÇÃO DO SENSOR.

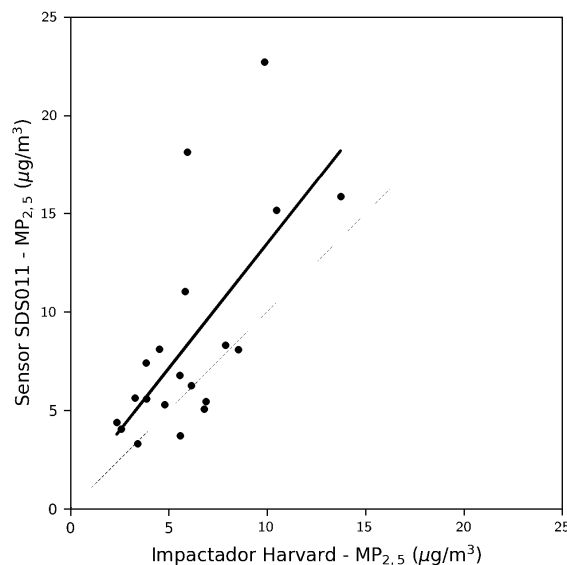


FONTE: O autor (2021).

Por fim, foi gerado o gráfico que mostra a correlação entre as respostas do sensor e do Impactador Harvard (Figura 26), no qual a linha pontilhada representa a melhor correlação possível e a reta verde é a que foi obtida por meio do ajuste linear. Esse ajuste forneceu uma reta com coeficiente  $m$  igual a 1,27 e  $b$  igual a 0,79 sendo sua equação:  $y = 1,27x + 0,79$ . O valor de  $b$  indica a existência de um erro de

viés, visto que é diferente zero, confirmando ainda o comportamento do sensor que tendeu a responder com valores de médias acima das do impactador Harvard. O mesmo pode ser afirmado a partir do valor do coeficiente  $m$ , que é maior que 1 e indica a superestimação dos resultados do sensor SDS011. A porcentagem de erros de viés, calculada conforme Badura et al. (2018b), foi igual a 43%. Foram também calculados o coeficiente de correlação de *Pearson*, fornecendo um valor de 0,68 e o coeficiente de  $R^2$  igual a 0,47. Esses valores indicam uma correlação positiva moderada que também pode ser observada na figura 26, considerando a reta ajustada e a linha pontilhada. Por ter sido utilizado apenas um sensor de baixo custo, não foi possível avaliar seu coeficiente de variação e precisão. Os erros obtidos foram de  $2,42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para o MBE,  $2,98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para o MAE e  $4,57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para o RMSE. Esses valores serão discutidos em mais detalhes e comparados com os dos demais monitoramentos propostos nesta pesquisa bem como com os de estudos publicados.

FIGURA 26 - CORRELAÇÃO E AJUSTE LINEAR DOS DADOS DO SDS011 E DO IMPACTADOR HARVARD.



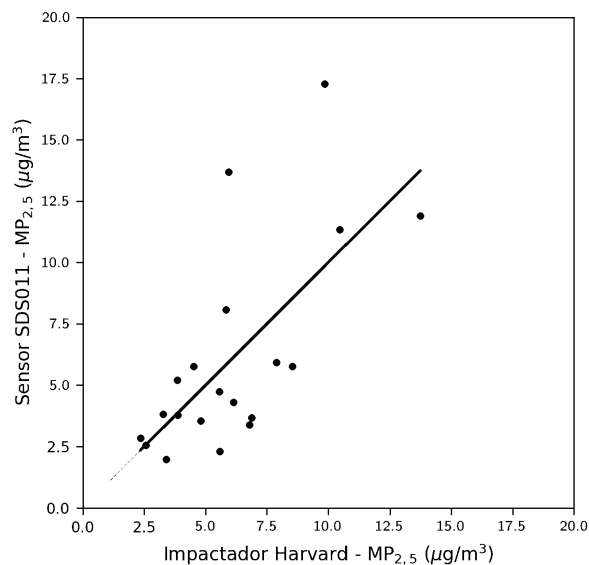
FONTE: O autor (2021).

A partir da reta obtida e dos coeficientes  $m$  e  $b$ , é possível encontrar o ajuste da concentração de material particulado. Esse ajuste é útil para a utilização do sensor sem o equipamento de referência posicionado no mesmo local, garantindo que os valores obtidos estão próximos do valor verdadeiro (de referência). Dessa

forma, usando os valores de coeficiente encontrados, a concentração ajustada será calculada conforme a equação 13. Sendo assim, os dados do sensor foram ajustados, gerando uma nova série de dados representada pelo gráfico da figura 27. Ressalta-se a importância de verificar o coeficiente  $R^2$  ao efetuar os ajustes, pois um valor muito baixo, indicando dados mais dispersos, pode invalidar o ajuste.

$$\text{Concentração ajustada} = \frac{\text{Concentração medida pelo sensor} - b}{m} \quad (13)$$

FIGURA 27 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO IMPACTADOR HARVARD E DOS DADOS AJUSTADOS DO SENSOR SDS011.



FONTE: O autor (2021).

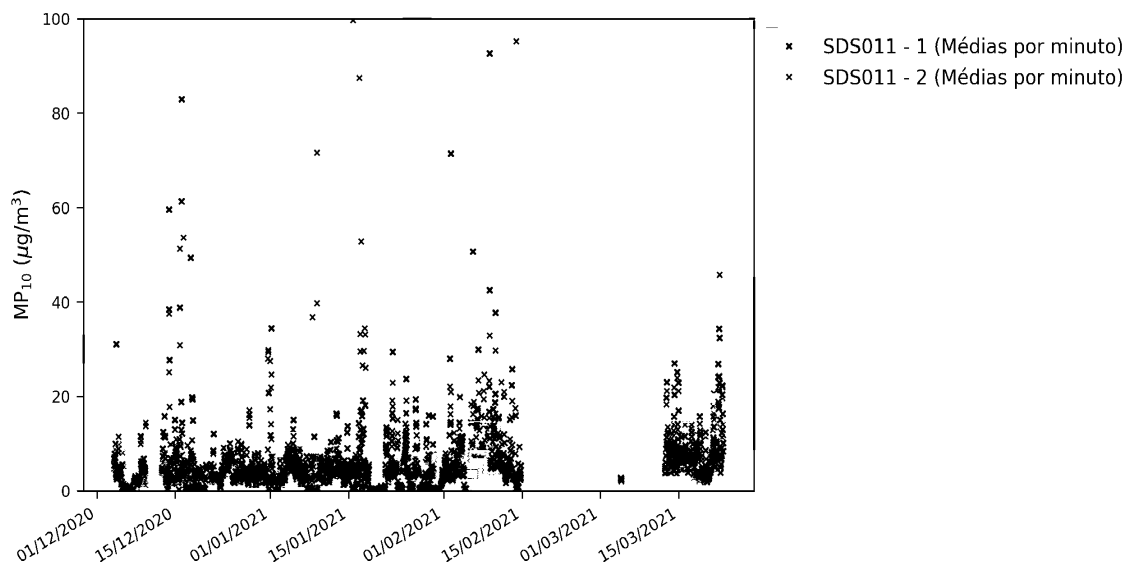
Foi feita também uma primeira análise da completude dos dados do sensor SDS011 que, para o período completo considerado neste estudo, foi de 74%. A análise do período de 20 dias, que foi considerado para a comparação do sensor em relação ao equipamento de referência, forneceu uma completude de 98%, o que evidencia que o comportamento anômalo do sensor após esse período gerou danos em sua parte elétrica/eletrônica, comprometendo também sua leitura ou registro. É importante considerar ainda que o Impactador *Harvard* não possui horários de início e término que totalizam 24 horas exatas, podendo variar para mais ou menos. As falhas podem ocorrer também no equipamento com o qual está sendo feita a comparação, tornando difícil determinar as horas obtidas efetivamente em relação

as horas esperadas. Por isso optou-se por analisar a completude apenas em relação aos dados esperados do sensor SDS011, tendo em vista ainda que o sensor permanece ligado em horários em que o equipamento de referência está desligado e que estariam portanto sendo considerados no cálculo da completude.

#### 4.6 COMPARAÇÃO SDS011 e BAM1020

A comparação com o BAM1020 foi a primeira realizada utilizando duplicata do sensor SDS011, permitindo a análise da sua precisão ao analisar as diferenças de leitura. Primeiramente, foi plotado o gráfico das médias por minuto calculadas para os dois sensores SDS011 (Figura 28). Identificou-se portanto que houve período de falhas de leitura, sendo mais viável selecionar o melhor intervalo para análise e comparação com os dados do BAM. Ressalta-se ainda que houveram 230 valores anômalos de médias por minuto, sendo necessário ajustar a escala dos gráficos para melhor visualização.

FIGURA 28 - MÉDIAS POR MINUTO DOS DADOS DOS SENSORES SDS011.

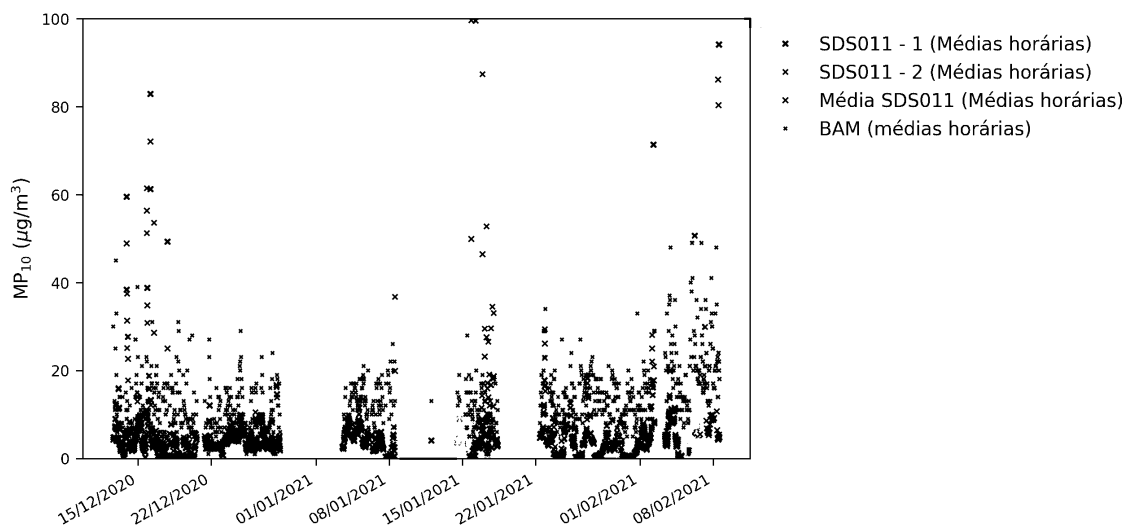


FONTE: O autor (2021).

O intervalo selecionado para comparação foi do dia 12 de dezembro de 2020 a 15 de fevereiro de 2021, o que corresponde a aproximadamente dois meses de monitoramento. Foram calculadas as médias horárias dos sensores, para que estivessem na mesma frequência dos dados fornecidos pelo equipamento BAM, e

também a média dos valores lidos por cada sensor nesse intervalo, gerando um valor único para a leitura do SDS011, visto que o resultado obtido na análise da intervariabilidade do sensor de baixo custo permite utilizar a média dos dados dos sensores para o prosseguimento da comparação com o equipamento de referência através do cálculo dos parâmetros estatísticos. As médias calculadas e os dados horários do equipamento BAM podem ser observados no gráfico da figura 29. Mesmo selecionando um intervalo sem falhas do sensor SDS011 os dados inicialmente utilizados para a plotagem desse gráfico mostraram que existiam intervalos horários nos quais não havia informação do equipamento de referência. Assim, foi necessário remover esses intervalos horários faltantes para dar prosseguimento aos cálculos e comparação e ajustar a escala do gráfico de 2000 para 100 no eixo y, excluindo os 110 valores considerados anômalos em relação as médias horárias dos sensores.

FIGURA 29 - MÉDIAS HORÁRIAS DO SDS011 E DO BAM1020 NO PERÍODO SELECIONADO.

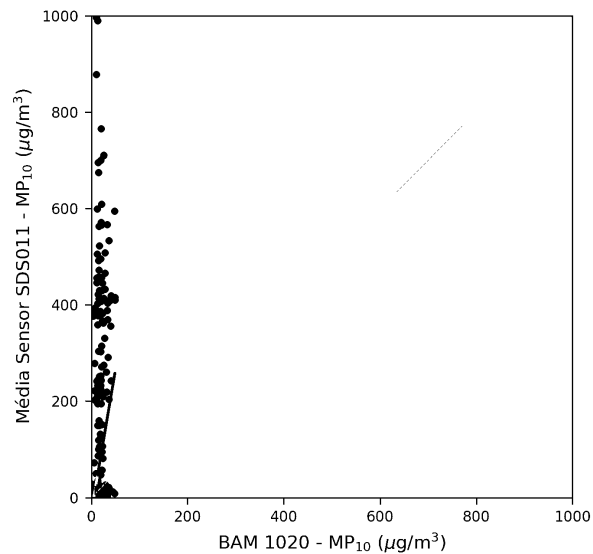


FONTE: O autor (2021).

A correlação encontrada na análise dos dados horários é considerada baixa (Figura 30), com valor de  $r$  igual a 0,32 e  $R^2$  igual a 0,10, indicando uma correlação desprezível. A equação da reta obtida foi  $y = 5,87x - 29,86$ , indicando a existência de altos erros de viés, cujo valor médio calculado foi igual a 214%, e a tendência do sensor SDS011 em superestimar as concentrações. Além dos erros de viés, foram calculados o MBE, MAS e RMSE, atingindo os valores de  $34,54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $49,02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  e  $135,38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectivamente. Ao verificar as diferenças percentuais e o

coeficiente de variação, que indica a precisão do sensor, entende-se que a média dos erros foram altas pois a leitura do sensor atingiu valores muito elevados, atingindo uma diferença percentual máxima de 98% e um coeficiente de variação máximo de 141%, o que contribui significativamente para o aumento das médias final. No entanto, houveram leituras muito similares, com um coeficiente de variação igual a 0,05%, levando a um valor médio de CV igual a 43%. Ao analisar as diferenças percentuais de cada sensor em relação ao BAM1020, foi constatado que o sensor posicionado mais próximo à entrada de ar do equipamento obteve diferenças menores enquanto o maior valor obtido, igual a 99%, é referente ao sensor localizado na extremidade mais externa da haste fixada no local, o que evidencia a sensibilidade do sensor e a importância de um posicionamento correto do sensor no local de monitoramento.

FIGURA 30 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO AS MÉDIAS HORÁRIAS.

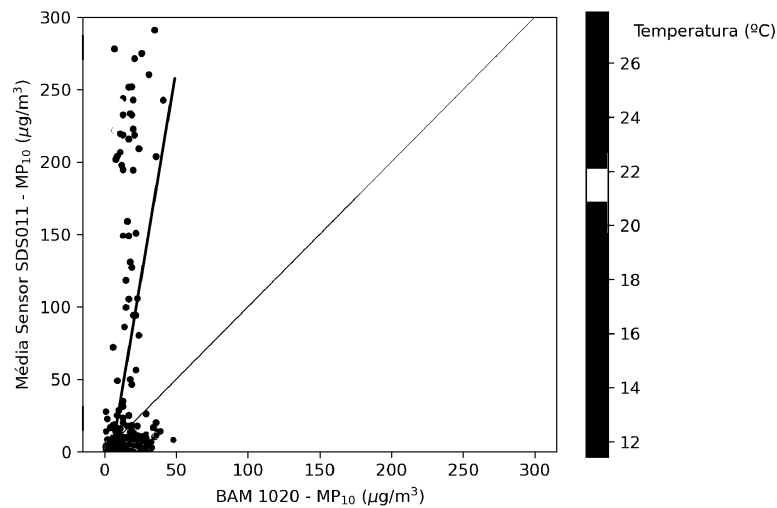


FONTE: O autor (2021).

No monitoramento realizado em Ponta Grossa, houve disponibilização dos dados locais de temperatura e umidade por parte do IAT, sendo assim, os gráficos das figuras 31 e 32, que mostram a correlação entre os dados do sensor de baixo custo e os do equipamento de referência, foram gerados considerando essas variáveis. Por conta dos valores elevados de concentração lidos pelo sensor SDS011 neste monitoramento, ajustou-se a escala dos gráficos para melhor verificação da distribuição dos dados.

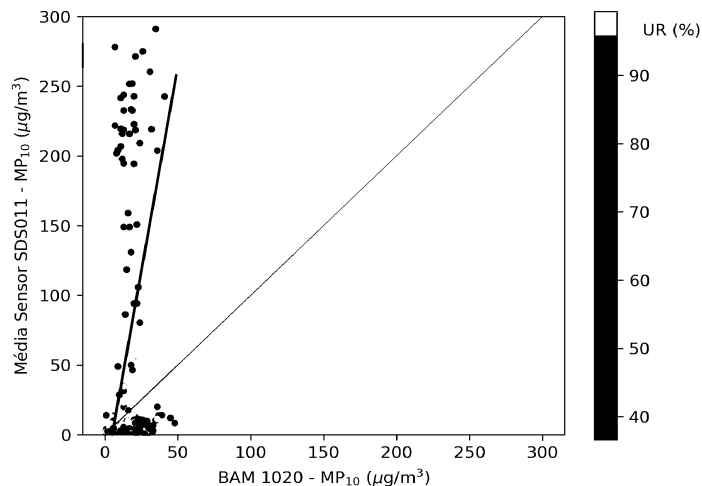
Foi possível perceber, ao unir os dados de temperatura e umidade ao gráfico da correlação entre as concentrações obtidas, que há alguns valores concentrados de temperaturas mais alta que leituras mais baixas no sensor SDS011 em relação à concentração medida pelo equipamento de referência. Analisando o gráfico que insere os valores de umidade local, percebe-se uma tendência do sensor em superestimar as concentrações de  $MP_{10}$  quando a umidade relativa é baixa, sendo portanto esse comportamento contrário ao observado nas concentrações de  $MP_{2,5}$  analisadas no estudo de Tagle et al. (2020).

FIGURA 31 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS HORÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A TEMPERATURA LOCAL.



FONTE: O autor (2021).

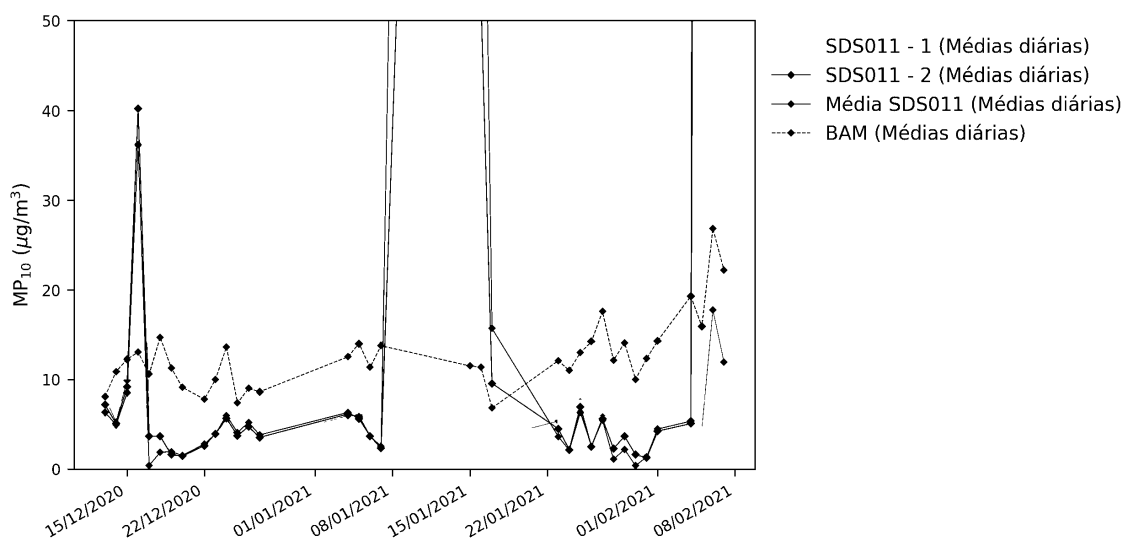
FIGURA 32 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS HORÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A UMIDADE LOCAL.



FONTE: O autor (2021).

De maneira análoga ao procedimento já descrito nesta seção, foram calculadas as médias diárias dos sensores e do BAM1020, a fim de verificar se o intervalo utilizado geraria diferenças significativas na correlação e nos erros obtidos anteriormente. Uma etapa foi acrescentada ao código neste caso, a fim de determinar se as médias horárias obtidas eram suficientes para o cálculo das médias diárias, visto que a mesma só é válida se for calculada com dois terços das médias horárias válidas. Sendo assim, considerando o total de 24 horas, verificou-se se havia um total de no mínimo 16 médias horárias em cada dia monitorado. A figura 33 mostra as médias diárias calculadas e teve sua escala ajustada de 700 para 50 no eixo y por conta de 5 médias de concentração elevadas.

FIGURA 33 - MÉDIAS DIÁRIAS VÁLIDAS DO SENSOR SDS011 E DO BAM1020.

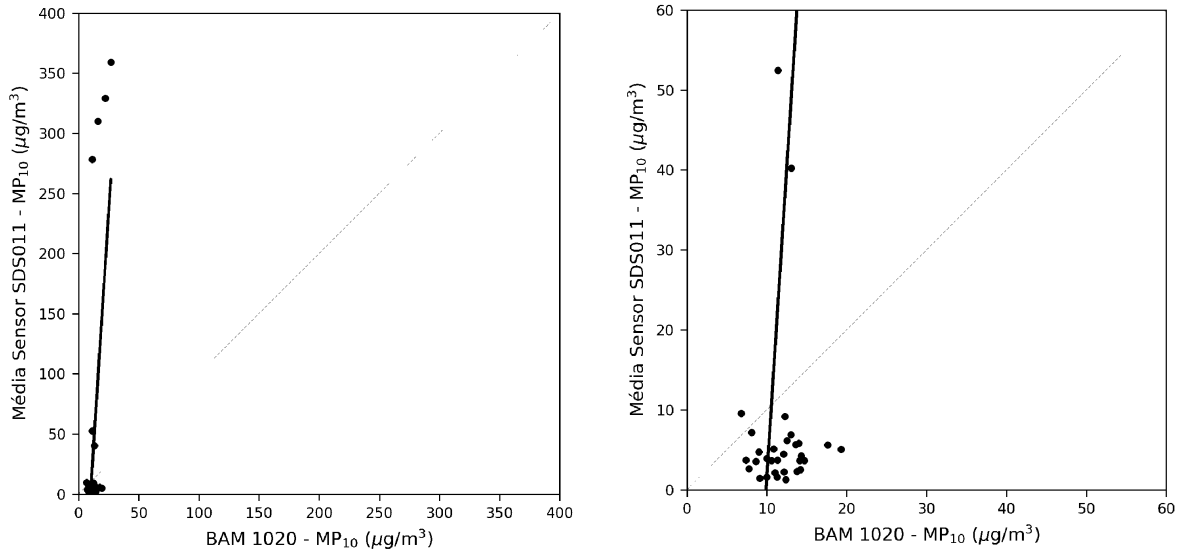


FONTE: O autor (2021).

Para as médias diárias, houve melhora na correlação (Figura 34), com valor de  $r$  igual a 0,62 e  $R^2$  igual a 0,38, porém a equação da reta obtida foi igual a  $y = 15,47x - 153,03$ , indicando novamente a existência de altos erros de viés, cujo valor médio calculado foi igual a 160%, e a tendência do sensor SDS011 em superestimar as concentrações. A figura 34 mostra ainda o ajuste da escala de 400 para 60, para melhor visualização, excluindo os 4 pontos com médias mais elevadas. Houve uma pequena diminuição nos demais erros calculados, sendo o MBE igual a  $30,00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , o MAE igual a  $42,64 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  e o RMSE igual a  $102,37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , bem como do coeficiente de variação que caiu para 41%.

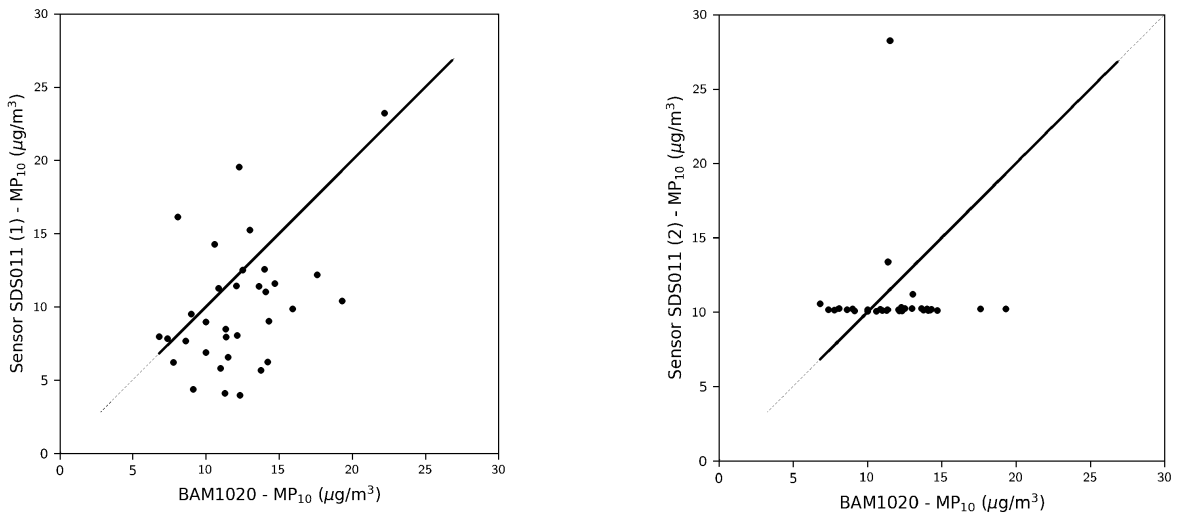
Foi feito o ajuste dos dados de concentração considerando as médias diárias pois o valor de  $R^2$  obtido foi maior para este caso. O ajuste deve ser feito para cada sensor avaliado, portanto o gráfico plotado (Figura 35) representa o ajuste para os dados medidos pelo sensor 1, localizado mais próximo à entrada de ar do equipamento, e pelo sensor 2, localizado na outra extremidade.

FIGURA 34 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DIÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO AS MÉDIAS DIÁRIAS SEM E COM AJUSTE DA ESCALA.



FONTE: O autor (2021).

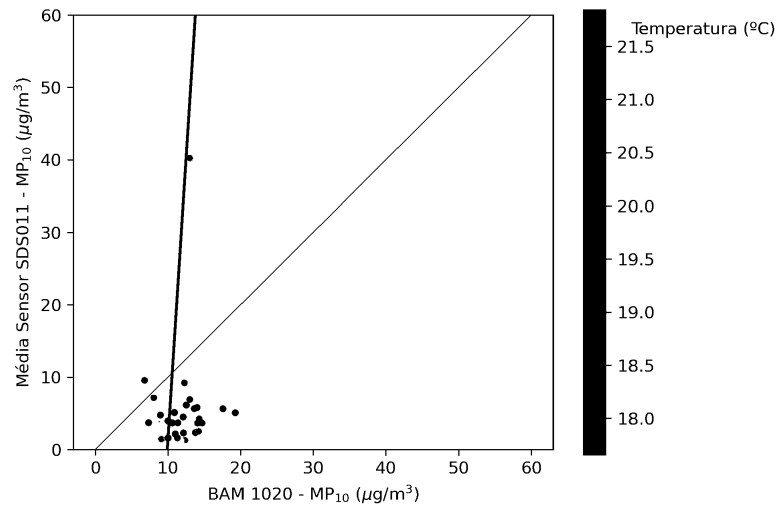
FIGURA 35 - CORRELAÇÕES DOS DADOS DIÁRIOS DO BAM1020 E DOS DADOS AJUSTADOS DOS SENSORES SDS011.



FONTE: O autor (2021).

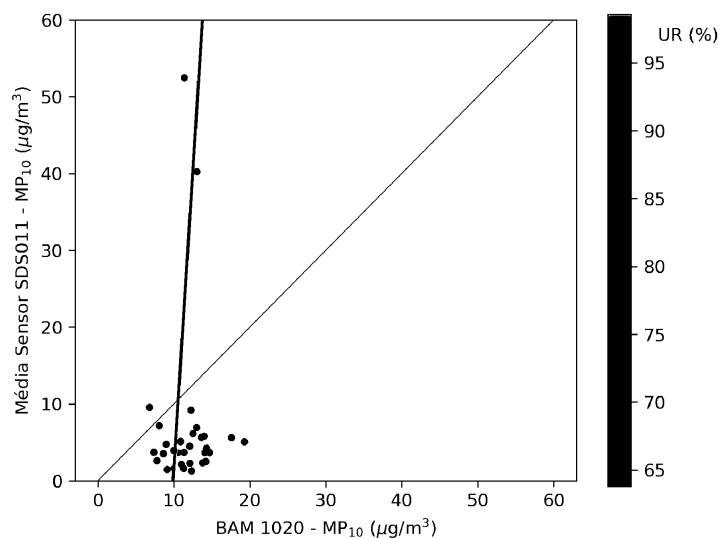
Os gráficos mostrados nas figuras 36 e 37 (com escala ajustada), que incluem os dados de temperatura e umidade de acordo com a média diária calculada, permitiram inferir que em temperaturas e umidade relativa mais baixas (abaixo de 20°C e 80%) foram obtidos os maiores valores do sensor SDS011, superestimando o equipamento de referência.

FIGURA 36 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS DIÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A TEMPERATURA LOCAL.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 37 - CORRELAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS DIÁRIOS DO SDS011 E DO BAM1020 CONSIDERANDO A UMIDADE LOCAL.



FONTE: O autor (2021).

Ressalta-se que para os dados diários a temperatura teve uma oscilação pequena, de menos de 10°C, durante todo o período considerado, o que torna mais difícil estabelecer uma relação direta entre a temperatura e as concentrações de material particulado. De modo semelhante, a umidade relativa não atingiu valores baixos, menores do que 50%. Portanto, espera-se que um monitoramento em período maior, abrangendo diferentes estações climáticas, permita analisar de maneira mais efetiva a relação entre a concentração de material particulado e as variáveis climáticas nas leituras do sensor SDS011, podendo dar sequência a uma correção das concentrações a partir desses dados e das medições do equipamento de referência.

Neste monitoramento, a completude de dados foi calculada a partir dos dados esperados do SDS011, visto que o BAM1020 reportou algumas médias horárias insuficientes. Considerando as médias horárias, a completude de dados calculada para o período completo de monitoramento foi de 59%. Esse valor foi o mais baixo encontrado em todos os outros testes e monitoramentos realizados com o sensor SDS011 e provavelmente está relacionado com perdas de energia ou outros problemas técnicos no local de monitoramento, visto que a equipe do IAT notificou e alertou todas as vezes em que havia a possibilidade de perdas de dados, observadas também no equipamento de referência, para que fosse feita a verificação do funcionamento do sensor. Considerando as médias diárias a completude foi igual a 55%, estando essa diminuição da completude relacionada à verificação das médias diárias válidas.

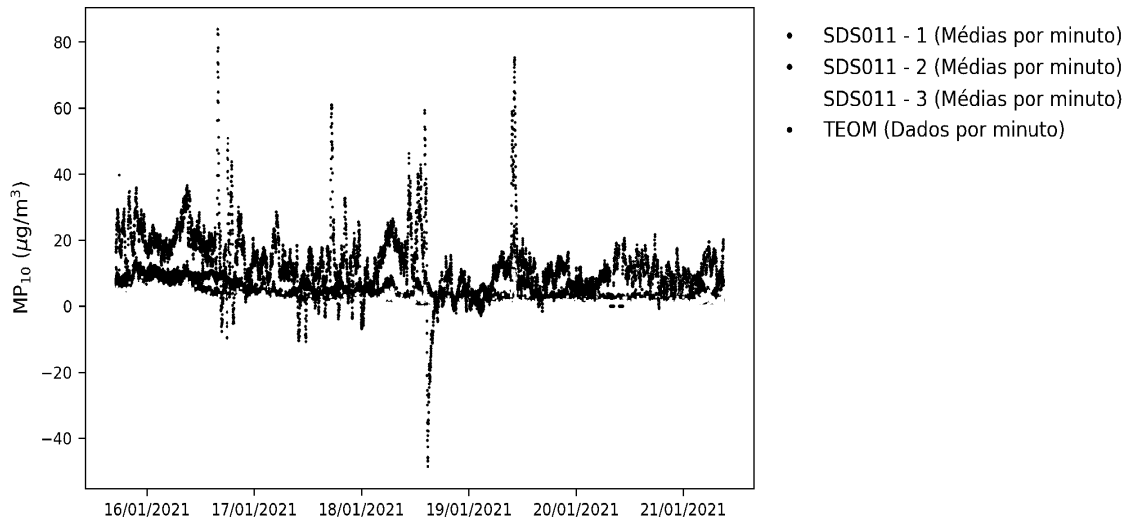
#### 4.7 COMPARAÇÃO SDS011 e TEOM

Esta comparação possibilitou uma análise em intervalos de medição distintos, visto que o equipamento fornece médias a cada minuto, além de ter sido feita utilizando triplicatas, o que torna o cálculo dos parâmetros estatísticos mais detalhado. Para a plotagem do gráfico da figura 38 foi necessário apenas calcular as médias por minuto dos sensores SDS011. No gráfico, verifica-se valores negativos reportados pelo TEOM, com dados de concentração variando de  $-48 \mu\text{g.m}^{-3}$  a  $84 \mu\text{g.m}^{-3}$ .

Ao remover os dados negativos e ajustar a escala no gráfico da figura 39, é possível visualizar as curvas com as concentrações medidas pelos sensores e pelo

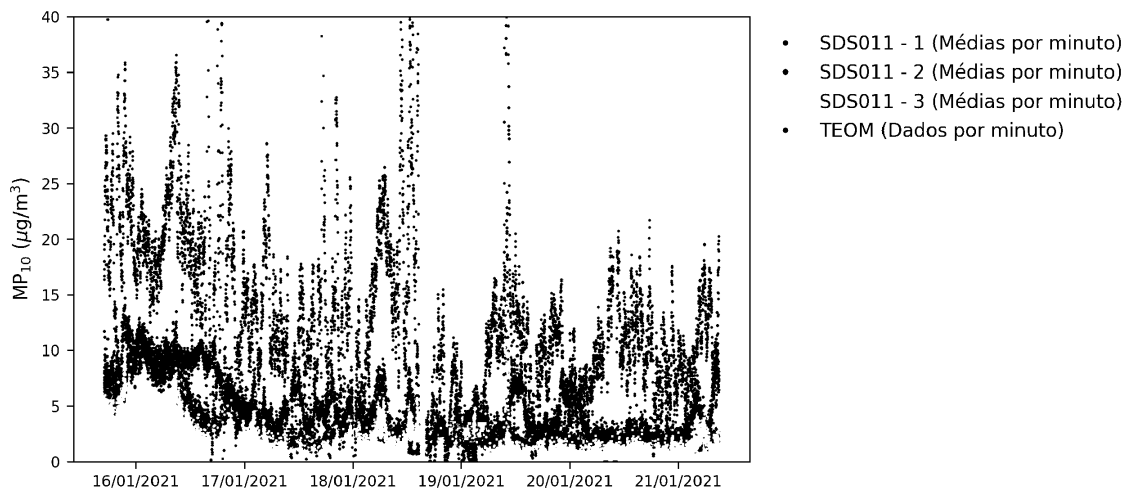
TEOM, identificando picos similares porém valores, em geral, mais baixos reportados pelo SDS011. Tendo em vista o funcionamento do TEOM detalhado na seção 3.7, a correlação e os cálculos dos parâmetros estatísticos foram feitos considerando os valores negativos reportados bem como a média dos sensores.

FIGURA 38 - MÉDIAS POR MINUTO DOS DADOS DOS SENSORES SDS011.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 39 - MÉDIAS POR MINUTO DO SDS011 E DO BAM1020 NO PERÍODO SELECIONADO.

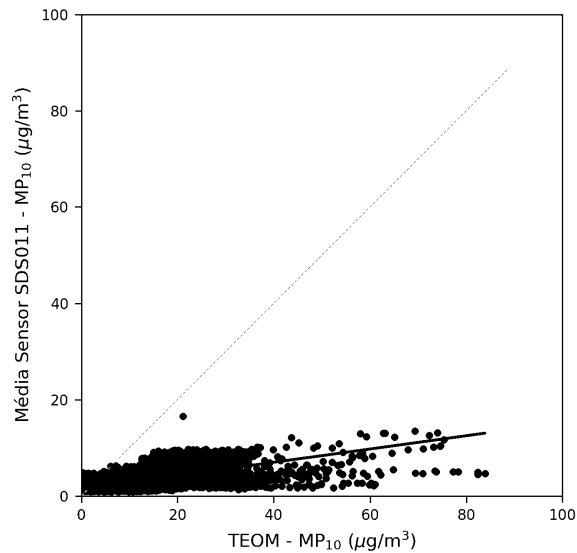


FONTE: O autor (2021).

A figura 40 mostra o gráfico da correlação entre as respostas do sensor e do TEOM para a concentração de  $MP_{10}$  e a reta obtida por meio do ajuste linear considerando os dados e média por minuto, cuja equação é:  $y = 0,14x + 1,47$ ,

portanto os coeficientes  $m$  e  $b$  são iguais a 0,14 e 1,47, respectivamente. Os coeficientes de correlação calculados foram iguais a 0,59 para o  $r$  e 0,35 para o  $R^2$ , indicando uma correlação fraca.

FIGURA 40 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS POR MINUTO.



FONTE: O autor (2021).

Por conta dos valores negativos muito altos, o coeficiente de variação forneceu valores de 1,57% até 150,26%, atingindo um valor médio de 58,45%, o que fez também com que os valores de viés fossem negativos, com valor mínimo de -96%. Os demais erros obtidos foram de  $-10,12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para o MBE,  $10,22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para o MAE e  $12,82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  para o RMSE. O mesmo procedimento foi feito para as médias horárias, médias de 6 horas, médias de 12 horas e médias diárias, sendo os gráficos mostrados nas figuras 41, 42, 43 e 44 os de correlação e a equação da reta e os demais parâmetros calculados mostrados na tabela 7.

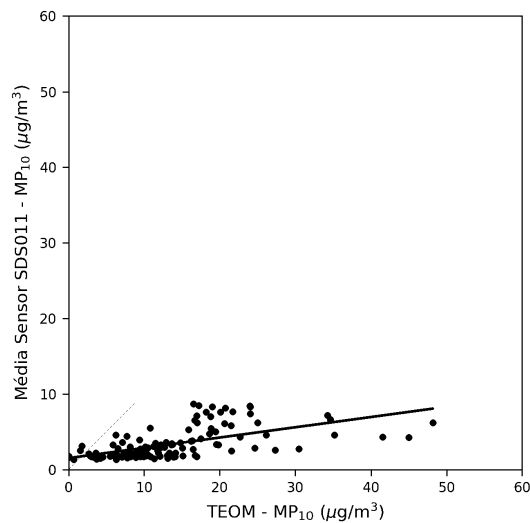
TABELA 7 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS CALCULADOS EM DIFERENTES INTERVALOS.

Intervalo	Equação da reta	$r$	Pearson	$R^2$	CV (%)	Viés (%)	MBE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MAE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RMSE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Médias horárias	$y=0,13x+1,51$	0,59	0,35	55	91	-10,06	10,15	12,61	
Médias de 6 horas	$y=0,089x+1,97$	0,39	0,15	55	75	-11,32	11,32	13,58	

Intervalo	Equação da reta	Pearson	R <sup>2</sup>	CV (%)	Viés (%)	MBE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MAE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RMSE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )
Médias de 12 horas	$y=0,20x+0,30$	0,46	0,21	52	77	-10,58	10,58	11,08
Médias diárias	$y=0,40x-1,65$	0,83	0,69	52	74	-8,78	8,78	9,01

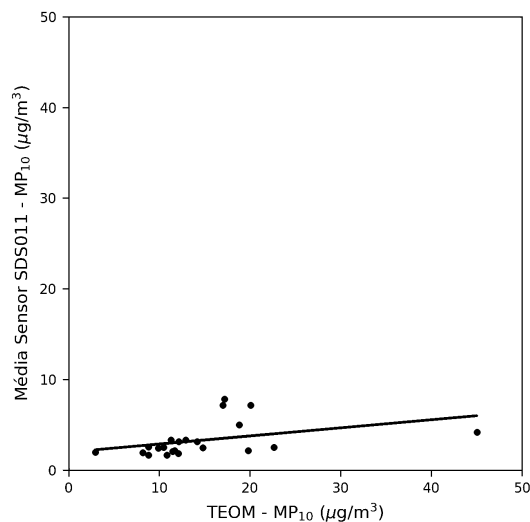
FONTE: O autor (2021).

FIGURA 41 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS HORÁRIAS.



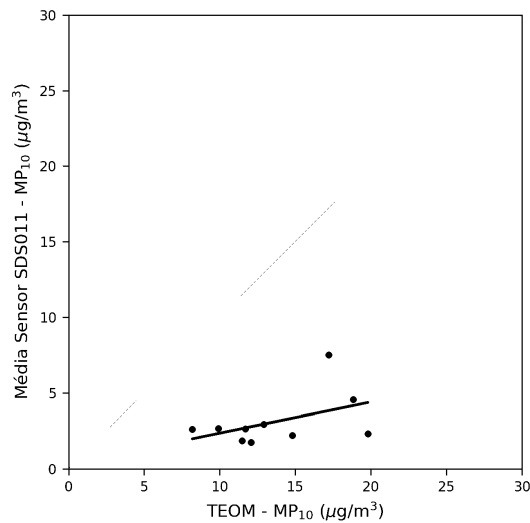
FONTE: O autor (2021).

FIGURA 42 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS DE 6 HORAS.



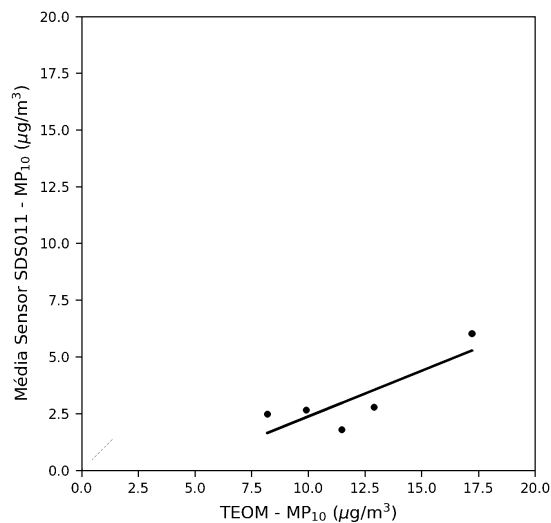
FONTE: O autor (2021).

FIGURA 43 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS A CADA 12 HORAS.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 44 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO SDS011 E DO TEOM CONSIDERANDO AS MÉDIAS DIÁRIAS.



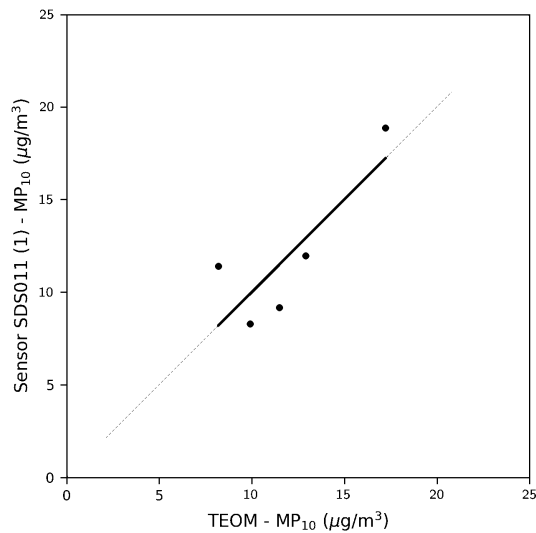
FONTE: O autor (2021).

Ao observar os gráficos de correlação e os dados da tabela, percebe-se que há uma diminuição nos erros calculados e uma variação nos valores de  $r$  e  $R^2$ , atingindo a melhor correlação, considerada forte, para os dados analisados em médias diárias. Houve também uma modificação na equação da reta, sobretudo no coeficiente  $b$ , que diminuiu para as médias de 12 horas até atingir um valor negativo para as médias diárias. Isso mostra que o agrupamento de dados contribuiu para o

aumento da correlação, sobretudo por conta dos valores negativos reportados pelo TEOM na frequência de aquisição de 1 minuto, que acabam sendo compensados ao longo do monitoramento, segundo o próprio princípio de funcionamento. Por fim, a completude de dados foi de 100% pois não houve dados faltantes em nenhum dos sensores analisados durante o monitoramento.

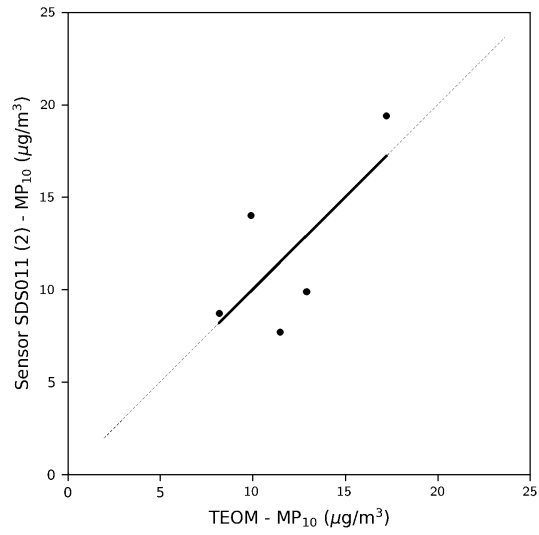
Assim como feito na comparação com o TEOM, o ajuste dos dados de concentração neste caso considerou as médias diárias por ter gerado o maior valor de  $R^2$ . As figuras 45, 46 e 47 mostram os gráficos das correlações após o ajuste para cada sensor utilizado no monitoramento.

FIGURA 45 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO TEOM E DOS DADOS AJUSTADOS DO PRIMEIRO SENSOR SDS011.



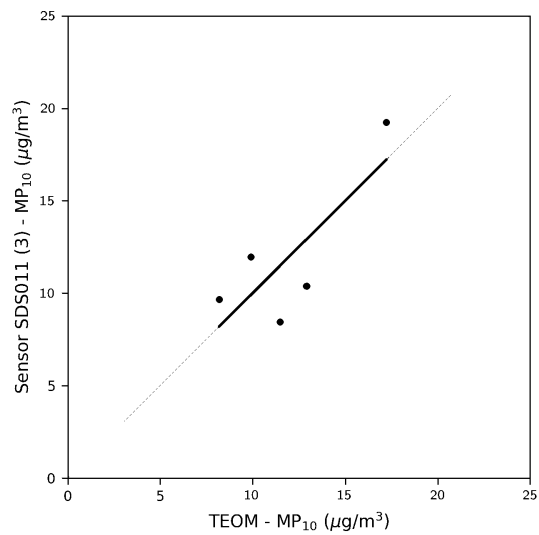
FONTE: O autor (2021).

FIGURA 46 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO TEOM E DOS DADOS AJUSTADOS DO SEGUNDO SENSOR SDS011.



FONTE: O autor (2021).

FIGURA 47 - CORRELAÇÃO DOS DADOS DO TEOM E DOS DADOS AJUSTADOS DO TERCEIRO SENSOR SDS011.



FONTE: O autor (2021).

## 5 CONCLUSÕES

O sistema implementado com o uso do *Raspberry Pi* representa uma alternativa barata e eficiente para o uso de sensores, sobretudo aplicado para a aquisição e transmissão de dados de sensores de baixo custo. Seu custo total é bem menor que o de equipamentos de referência ou de redes de monitoramento tradicionais, não excedendo o valor de R\$ 865,83, e com uma disponibilização de dados mais eficiente e rápida.

Na primeira análise do sensor SDS011, os valores de inter variabilidade foram menores que o valor de 9,64% calculado por Liu et al. (2019) e significativamente menores do que o máximo recomendado, permitindo dar sequência às comparações do sensor com equipamentos de referência e indicando seu potencial de uso.

O desempenho do sensor SDS011 em relação aos equipamentos utilizados apresentou grande variação, que pode estar relacionada às condições específicas de cada monitoramento, como o tipo de instalação, distância entre sensor e equipamento, frequência de leituras distintas, além de influências externas como a ação das intempéries. A tabela 8 mostra o resumo dos resultados obtidos, com os valores de  $r$ ,  $R^2$ , erros e completude de dados calculados.

TABELA 8 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS COMPARAÇÕES DO SDS011.

Identificação	$r$	$R^2$	Viés (%)	CV (%)	MBE ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	MAE ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	RMSE ( $\mu\text{g.m}^{-3}$ )	Completude de dados (%)	Correlação
<b>SDS011 x Impactador Harvard</b>									
Médias diárias									
MP <sub>2,5</sub>	0,68	0,47	43	-	2,42	2,98	4,57	98	Moderada
<b>SDS011 x BAM1020</b>									
Médias horárias									
MP <sub>10</sub>	0,32	0,10	214	43	34,53	49,02	135,38	59	Fraca
Médias diárias									
MP <sub>10</sub>	0,62	0,38	160	41	30	42,64	102,37	55	Moderada
<b>SDS011 x TEOM</b>									

Identificação	<i>r</i>	R <sup>2</sup>	Viés (%)	CV (%)	MBE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	MAE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	RMSE ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Completeness de dados (%)	Correlação
Médias por minuto									
MP <sub>10</sub>	0,59	0,35	-	58%	-10,12	10,22	12,82	100	Moderada
Médias horárias									
MP <sub>10</sub>	0,59	0,35	91	55	-10,06	10,15	12,61	100	Moderada
Médias de 6 horas									
MP <sub>10</sub>	0,39	0,15	75	55	-11,32	11,32	13,58	100	Fraca
Médias de 12 horas									
MP <sub>10</sub>	0,46	0,21	77	52	-10,58	10,58	11,08	100	Fraca
Médias diárias									
MP <sub>10</sub>	0,83	0,69	74	52	-8,78	8,78	9,01	100	Forte

Fonte: O autor (2021).

Em comparação aos outros estudos mencionados, encontrou-se valores de R<sup>2</sup> dentro do esperado, atingindo o valor máximo de 0,69. Apenas as correlações encontradas na análise das médias horárias da comparação com o BAM1020 e na média de 6 e 12 horas da comparação com o TEOM foram consideradas fracas e não houve correlações desprezíveis. Os resultados obtidos na comparação do sensor com o impactador *Harvard* sugerem seu uso na área de aplicação I, recomendada pela EPA, sendo essa a de educação e informação.

Dentre os critérios determinados nas áreas de aplicação, o mais crítico para o enquadramento do sensor foi o do erro de viés, com valor mais baixo encontrado igual a 43%, sendo ainda superior ao recomendado para quaisquer áreas de aplicação. No entanto, esse valor ainda foi menor que o do estudo de Badura et al. (2018b), que obteve valores entre 61% até 80%.

Os erros MAE, MBE e RMSE calculados foram altos, mesmo nos monitoramentos que tiveram uma correlação moderada ou forte, maiores que de todos os sensores avaliados no estudo de Feenstra et al. (2019). Portanto, ao rever os resultados e a regressão linear, isso indica que a maior causa de erro foram os

valores abruptos do sensor SDS011 que geraram diferenças percentuais muito grandes em relação aos valores medidos pelos equipamentos de referência.

Em geral, os valores de completude de dados obtidos, superiores a 80%, permitem enquadrar o uso do sensor nas áreas de aplicação II, III, IV e V recomendadas pela EPA, que são as de identificação e caracterização de *Hotspot's*, monitoramento suplementar, exposição pessoal e monitoramento regulamentar, respectivamente. O menor valor de completude encontrado, referente à comparação com o equipamento BAM1020 na cidade de Ponta Grossa, está acima de 50%, permitindo ainda enquadrar o uso do sensor na área de aplicação I.

Os dados de temperatura e umidade permitiram observar a distribuição das concentrações de  $MP_{10}$ , no entanto ainda não foram encontradas relações de dependência da resposta do sensor em relação a temperatura e umidade relativa locais. Sugere-se para trabalhos futuros, prosseguir com a comparação em campo durante um período maior a fim de utilizar o método proposto por Zheng et al. (2018) para efetuar os ajustes e correções da concentração de material particulado a partir da umidade relativa e temperatura.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, E. F. K. et al. Low Cost sensors calibration for monitoring air quality in the Federal District – Brazil. **Journal of environmental protection**, n. 02, p. 173, 2015.
- AMARAL, S. S. et al. An overview of particulate matter measurement instruments. **Atmosphere**, v. 6, n. 9, p. 1327–1345, 2015.
- AMORIM, L. **Qualidade do ar melhorou em Santa Catarina durante a quarentena, mostra Instituto.** Disponível em: <<https://ndmais.com.br/noticias/qualidade-do-ar-melhorou-em-santa-catarina-durante-a-quarentena-mostra-instituto/>>. Acesso em: 2 jul. 2020.
- ANDERSON, J. O.; THUNDIYIL, J. G.; STOLBACH, A. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. **Journal of Medical Toxicology**, v. 8, n. 2, p. 166–175, 2012.
- ARBEX, M. A. et al. A poluição do ar e o sistema respiratório. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 38, n. 5, p. 643–655, 2012.
- ARDUINO. **ARDUINO 1.8.13.** Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/main/software>>. Acesso em: 25 jun. 2020.
- RAY, A. E.; VAUGHN, D. L. Standard Operating Procedure for the Continuous Measurement of Particulate Matter Thermo Scientific TEOM ® 1405-DF Dichotomous Ambient Particulate Monitor with FDMS ® Federal Equivalent Method EQPM-0609-182 for PM 2.5. Thermo Scientific TEOM, 2009.
- BADURA, M. et al. Evaluation of low-cost sensors for ambient PM2.5 monitoring. **Journal of Sensors**, v. 2018, 2018a.
- BADURA, M. et al. Optical particulate matter sensors in PM2.5 measurements in atmospheric air. In: E3S WEB OF CONFERENCES. **Anais...EDP Sciences**, 2018b. p. 00006
- BANERJEE, I. et al. Advanced Air Quality Monitoring System Using Raspberry Pi. In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTO-ELECTRONICS AND APPLIED OPTICS (OPTRONIX). **Anais...IEEE**, 2019. p. 1-4.
- BARTH WAL, A.; ACHARYA, D. An Internet of Things System for Sensing, Analysis & Forecasting Urban Air Quality. In: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMPUTING AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES (CONECCT). **Anais... IEEE**, 2018, p. 1-6.
- BINSY, M. S.; SAMPATH, N. User Configurable and Portable Air Pollution Monitoring System for Smart Cities Using IoT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER NETWORKS AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES. **Anais... Springer**, Singapore, 2019. p. 345-359.

BLAKE, R.; POPE, F.; GATARI, M. Airborne particulate matter monitoring in Nairobi, Kenya using calibrated low cost sensors. In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE ABSTRACTS. **Anais**. 2018, p. 702.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana. **Trabalho apresentado no evento de sustentabilidade na geração e uso de energia, UNICAMP**, v. 18, 2002.

BRASIL. **1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2015/08/1-diagnostico-da-rede-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf>>. 2014

BRUNEKREEF, B.; HOLGATE, S. T. Air pollution and health. **The lancet**, v. 360, n. 9341, p. 1233–1242, 2002.

BUDDE, M. et al. Potential and limitations of the low-cost SDS011 particle sensor for monitoring urban air quality. **ProScience**, v. 5, p. 6–12, 2018.

CANÇADO, J. E. D. et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal brasileiro de pneumologia**, v. 32, p. 5–11, 2006.

CAYA, M. V. C. et al. Air pollution and particulate matter detector using Raspberry Pi with IoT based notification. In: 2017 IEEE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMANOID, NANOTECHNOLOGY, INFORMATION TECHNOLOGY, COMMUNICATION AND CONTROL, ENVIRONMENT AND MANAGEMENT (HNICEM). **Anais... IEEE**, 2017. p. 1-4.

CETESB. **Padrões de Qualidade do Ar**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 6 jul. 2020.

COHEN, A. J. et al. The Global Burden of Disease Due to Outdoor Air Pollution. **Journal of Toxicology and Environmental Health**, n. 13, p. 1301–1307, 2005.

CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 5, de 15 de junho de 1989**. Brasília, DF. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 1989.

CONAMA. Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 1990.

CONAMA. **Resolução CONAMA Nº 491 de 19 de novembro de 2018**. Brasília, DF. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2018.

DE MIRANDA, R. M. et al. Urban air pollution: a representative survey of PM 2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 1, p. 63–77, 2012.

DE OLIVEIRA, S. **Internet das coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI**. [s.l.] Novatec Editora, 2017.

DENNIS, A. K. **Raspberry Pi home automation with Arduino**. [s.l.] Packt Publishing Ltd, 2013.

EC WORKING GROUP. Guide to the demonstration of equivalence of ambient air monitoring methods. **EC Working Group on Guidance for the Demonstration of Equivalence**, 2010.

ELSYS. **Amplimax**, 2020. Disponível em: <[https://www.elsys.com.br/modem-4g-para-internet/p?idsku=178&gclid=EAlalQobChMIguqRm8LV6gIVxQeRCh1Ghw\\_dEAQYASABEgJwqfD\\_BwE](https://www.elsys.com.br/modem-4g-para-internet/p?idsku=178&gclid=EAlalQobChMIguqRm8LV6gIVxQeRCh1Ghw_dEAQYASABEgJwqfD_BwE)>

EPA. **Report to Congress on Black Carbon** Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>>.

EPA. **Evaluation of field-deployed low cost PM sensors** U. S. Environmental Protection Agency (EPA). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=297517](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=297517)>.

EPA. **How to Evaluate Low-Cost Sensors by Collocation with Federal Reference Method Monitors**, 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-research/instruction-guide-and-macro-analysis-tool-evaluating-low-cost-air-sensors-collocation>>

EPA. **Evaluation of Emerging Air Sensor Performance**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/evaluation-emerging-air-sensor-performance>>. Acesso em: 25 jun. 2020a.

EPA. **Village Green Project**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-research/village-green-project>>. Acesso em: 2 jul. 2020b.

EPA. **Particulate Matter (PM) Basics**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>>. Acesso em: 4 jul. 2020c.

EPA. **Air Sensor Collocation Macro Analysis Tool**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-collocation-macro-analysis-tool>>. Acesso em: 7 jul. 2020d.

EPA. **Air Sensor Collocation Instruction Guide**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-collocation-instruction-guide>>. Acesso em: 26 jun. 2020e.

EPA. **Code of Federal Regulations (CFR) Part 50**. 40 CFR Part 50. 2006

EUROPEAN COMMISSION. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. **Off J Eur Union**, v. 152, p. 1–44, 2008.

FEENSTRA, B. et al. Performance evaluation of twelve low-cost PM<sub>2.5</sub> sensors at an ambient air monitoring site. **Atmospheric Environment**, v. 216, n. September, p. 116946, 2019.

GENIKOMSAKIS, K. N. et al. Development and on-field testing of low-cost portable system for monitoring PM<sub>2.5</sub> concentrations. **Sensors**, v. 18, n. 4, p. 1056, 2018.

GHALEBANI, M. **Making sense of low cost sensors**. Air quality monitoring in Gothenburg Sweden. 2020.

HALFACREE, G.; UPTON, E. **Raspberry Pi user guide**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2012.

HUANG, C. J.; KUO, P. H. A deep cnn- lstm model for particulate matter (Pm<sub>2.5</sub>) forecasting in smart cities. *Sensors (Switzerland)*, v. 18, n. 7, 2018.

IAP. **Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1416.html>>. Acesso em: 29 jun. 2020a.

IAP. **Boletins da Qualidade do Ar da Região Metropolitana de Curitiba**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1076>>. Acesso em: 29 jun. 2020b.

JIAO, W. et al. Field assessment of the village green project: An autonomous community air quality monitoring system. **Environmental science & technology**, v. 49, n. 10, p. 6085–6092, 2015.

JOHNSTON, S. J. et al. City scale particulate matter monitoring using LoRaWAN based air quality IoT devices. **Sensors**, v. 19, n. 1, p. 209, 2019.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. **Environmental pollution**, v. 151, n. 2, p. 362–367, 2008.

KUMAR, S.; JASUJA, A. Air quality monitoring system based on IoT using Raspberry Pi. 2017 In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND AUTOMATION (ICCCA). **Anais... IEEE**, 2017. p. 1341-1346.

LEVY ZAMORA, M. et al. Field and laboratory evaluations of the low-cost plantower particulate matter sensor. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 2, p. 838–849, 2018.

LIRA, T. S. DE. **Modelagem e previsão da qualidade do ar na cidade de Uberlândia-MG**. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

- LIU, H.-Y. et al. Performance assessment of a low cost PM2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. **Atmosphere**, v. 10, n. 2, p. 41, 2019.
- LIU, T. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302). **Aosong Electronics Co., Ltd**, 2008.
- MACEDO, R. Y. N.; VARGAS-CUENTAS, N. I. **Low Cost Air Quality Measurement System Using Light Scattering Sensors**. 2018 IEEE Sciences and Humanities International Research Conference (SHIRCON). **Anais.2018**
- MARTINS, G. DE A. **Estatística geral e aplicada**. 3. ed. São Paulo, SP: Editora Atlas SA, 2005.
- MASSEN, F.; THOLL, R.; ZIMMER, M. A short study in fine particles measurement at meteolCD by inexpensive LLS sensors. 2018.
- MAXDETECT TECHNOLOGY CO. **Digital humidity and temperature sensor RHT03**, 2020.
- MET ONE INSTRUMENTS INC. **BAM 1020 Continuous Particulate Monitor** Grants Pass, EUA, 2019a. Disponível em: <<https://metone.com/wp-content/uploads/2019/10/BAM-1020-4.pdf>>
- MET ONE INSTRUMENTS INC. **E-BAM Portable Environmental Beta-Attenuation Mass Monitor**. Grants Pass, EUA, 2019b. Disponível em: <<https://metone.com/products/e-bam/>>
- MET ONE INSTRUMENTS INC. **BAM-1020 Continuous Particulate Monitor**. Disponível em: <<https://metone.com/products/bam-1020/>>. Acesso em: 16 jul. 2020.
- MIGOS, T. et al. **On the Evaluation of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Estimation**. 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST). **Anais.2019**
- MMA. **Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar**. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. – Brasília, DF: MMA, 2020. 136 p.: il. color. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/mma-guia-tecnico-qualidade-do-ar-pdf>>. Acesso em 20 abr. 2020.
- MONTEIRO, A. et al. How healthy will be the air quality in 2050? **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 11, n. 3, p. 353–362, 2018.
- NEW SOLAR SKY. **Monitor de material particulado contínuo BAM-1022**. Disponível em: <<http://www.newsolarsky.com/view.php?id=56>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

NISHIDA, R. B. **Análise do material particulado emitido na cidade de Ponta Grossa**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

NOVA FITNESS CO. **Laser PM2.5 Sensor specification**. Disponível em: <<https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-%0ADATASHEET.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

OK LAB STUTTGART. **Luftdaten**. Disponível em: <<https://luftdaten.info/>>. Acesso em: 8 jul. 2020.

OMS. **Air pollution**. Disponível em: <[https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1)>. Acesso em: 2 jul. 2020.

PARMAR, J. et al. IoT Based Weather Intelligence. In: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART CITY AND EMERGING TECHNOLOGY (ICSCET). **Anais...** IEEE, 2018. p. 1-4.

POLIDORI, A.; PAPAPOSTOULOU, V.; ZHANG, H. Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors. South Coast Air Quality. South Coast Air Quality Management District: Diamondbar, CA, USA, Ago. 2016. Disponível em: <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-lab-testing-protocol6087afefc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2021.

PU'AD, M. F. M. et al. Development of Air Quality Measurement System using Raspberry Pi. In: 2018 IEEE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART INSTRUMENTATION, MEASUREMENT AND APPLICATION (ICSIMA). **Anais...** IEEE, 2018. p. 1-4.

QIN, X. et al. The evaluation and optimization of calibration methods for low-cost particulate matter sensors: Inter-comparison between fixed and mobile methods. *Science of the Total Environment*, v. 715, p. 136791, 2020.

RANE, M. S.; NAIK, A. R.; VACHHANI, K. Real-time AQI Monitoring System: An Economical Approach Using Wireless Sensor Network. In: 2018 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION AND NETWORKING TECHNOLOGIES (ICCCNT). **Anais...** IEEE, 2018. p. 1-6.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi 4**. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>>. Acesso em: 7 jul. 2020a.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Setting up your Raspberry Pi**. Disponível em: <<https://projects.raspberrypi.org/en/projects/raspberry-pi-setting-up/3>>. Acesso em: 7 jul. 2020b.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Using your Raspberry Pi**. Disponível em: <<https://projects.raspberrypi.org/en/projects/raspberry-pi-using/8>>. Acesso em: 7 jul. 2020c.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Teach, Learn and Make with Raspberry Pi**. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>. Acesso em: 7 jul. 2020d.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Build your own weather station**. Disponível em: <<https://projects.raspberrypi.org/en/projects/build-your-own-weather-station>>. Acesso em: 7 jul. 2020e.

RICHARDSON, M.; WALLACE, S. **Getting started with raspberry PI**. [s.l.] "O'Reilly Media, Inc.", 2012.

SANTANA, E. et al. **Padrões de qualidade do ar: Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.

SARNAT, J. A.; DEMOKRITOU, P.; KOUTRAKIS, P. Measurement of fine, coarse and ultrafine particles. **Annali dell'Istituto Superiore di Sanita**, v. 39, n. 3, p. 351–355, 2003.

SHARANYA, S; JOHN, S. Comfort Sensor Using Fuzzy Logic and Arduino. In: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND APPLICATIONS. **Anais...** Singapura: Springer, 2017.

SICILIANO, B. et al. The Updated Brazilian National Air Quality Standards: A Critical Review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 31, n. 3, p. 523–535, 2020.

SINHA, N.; PUJITHA, K. E.; ALEX, J. S. R. Xively based sensing and monitoring system for IoT. In: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION AND INFORMATICS (ICCCI). **Anais...** IEEE, 2015. p. 1-6.

SIVARAMAN, V. et al. HazeWatch: A participatory sensor system for monitoring air pollution in Sydney. 38th ANNUAL IEEE CONFERENCE ON LOCAL COMPUTER NETWORKS-WORKSHOPS. **Anais...** IEEE, 2013. p. 56-64.

SOUZA, A. F. E. DE. **Caracterização de material particulado atmosférico na cidade de Limeira – SP**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia, 2015.

SOUSAN, S. et al. **Inter-comparison of low-cost sensors for measuring the mass concentration of occupational aerosols**. *Aerosol Science and Technology*, v. 50, n. 5, p. 462–473, 2016.

SUNROM TECHNOLOGIES. **DHT11 - Humidity and temperature sensor**. Disponível em: <[www.sunrom.com/p-1141.html](http://www.sunrom.com/p-1141.html)>. Acesso em: 8 jul. 2020.

TAGLE, M. et al. Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile. **Environmental monitoring and assessment**, v. 192, n. 3, p. 171, 2020.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. **Manual Teom**® 1405. p. 190, 2007.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. **TEOM 1405 Ambient Particulate Monitor**: Continuous measurement of ambient particulate concentrations, 2019.

UPTON, E.; HALFACREE, G. **Meet the Raspberry Pi**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2012.

VAHLSING, C.; SMITH, K. R. Global review of national ambient air quality standards for PM 10 and SO<sub>2</sub> (24 h). **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 5, n. 4, p. 393–399, 2012.

WARDOYO, A. Y. P. et al. Optimization of PM<sub>2.5</sub> Measurement System Using NOVA SDS011 Sensor. In: JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES. **Anais...** IOP Publishing, 2020. p. 012053.

WELKER, R. W. Size analysis and identification of particles. In: **Developments in Surface Contamination and Cleaning**. Elsevier, 2012. p. 179–213.

WHO. **Air guidelines for Europa (second edition)**. Copenhagen, World Health Organization Regional Publications, 2000.

WHO. **Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide**. [s.l.] World Health Organization, 2006.

WILLIAMS, R. et al. **Air Sensor Guidebook EPA/600/R-14/159**. EPA, 2014. Disponível em: <[https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?dirEntryId=277996&simpleSearch=1&searchAll=air+sensor+guidebook](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=277996&simpleSearch=1&searchAll=air+sensor+guidebook)>

WORLD AIR QUALITY INDEX PROJECT. **The SDS011 Air Quality Sensor experiment: Real-time Air Quality readings from the SDS011**. Disponível em: <<https://aqicn.org/sensor/sds011/pt/>>. Acesso em: 26 mar. 2020.

YOUDALE, N. Haze watch: Database server and mobile applications for measuring and evaluating air pollution exposure. **Electrical Engineering and Telecommunication School, University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, Technical report**, 2010.

ZHENG, T. et al. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high-and low-concentration environments. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 11, n. 8, p. 4823–4846, 2018.

## APÊNDICE 1 – CÓDIGO PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS DO SENSOR SDS011

```

1  #!/usr/bin/python
2  # -*- coding: UTF-8 -*-
3  import serial, time, struct, array
4  import datetime
5  import os
6  import time
7  import sys
8  import os.path
9  from os import path
10 import Adafruit_DHT
11
12 def coletaAM2302():
13     humidity, temperature = Adafruit_DHT.read_retry(Adafruit_DHT.AM2302,4)
14     if humidity is not None and temperature is not None:
15         return (temperature, humidity)
16
17 data = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d")
18 hora = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H")
19 hora_atual = hora
20
21 if path.exists("/home/pi/Lactea/Dados/") != True:
22     myCmd = 'mkdir /home/pi/Lactea/Dados/'
23     os.system(myCmd)
24
25 if path.exists( /home/pi/Lactea/Dados/" + str(data)) != True:
26     myCmd = 'mkdir /home/pi/Lactea/Dados/' + str(data)
27     os.system(myCmd)
28
29 if path.exists( /home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) + '/' + str(hora)) != True:
30
31     myCmd = 'mkdir /home/pi/Lactea/Dados/' + str(data) + '/' + str(hora)
32     os.system(myCmd)
33
34     write_to_file_path = "/home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) +      + str(hora) + 2
35     + '/medicoes-SDS011-PM25.txt';
36     output_file = open(write_to_file_path, "a");
37     output_file.close()
38
39     write_to_file_path2 = "/home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) + / + str(hora) 2
40     + '/medicoes-SDS011-PM10.txt';
41     output_file2 = open(write_to_file_path2, "a");
42     output_file2.close()
43
44     write_to_file_path3 = "/home/pi/Lactea/Dados/' + str(data) + / + str(hora) 2
45     + '/medicoes-AM2302.txt";
46     output_file3 = open(write_to_file_path3, "a");
47     output_file3.close()
48
49 # line = 'Resultados do sensor SDS011 NOVA PM'
50 line = 'ano-mes-dia horario | nome | concentracao | unidade'
51 print(line)
52 output_file = open(write_to_file_path, "a")
53 output_file.write(line)
54 output_file.write('\n')
55 output_file.close()
56 output_file2 = open(write_to_file_path2, "a")
57 output_file2.write(line)
58 output_file2.write( \n')
59 output_file2.close()
60 # line2 = 'Resultados do sensor AM2302'
61 line2 = 'ano-mes-dia horario | Temperatura(oC) | Umidade(%)'

```

```

59     output_file3 = open(write_to_file_path3, "a")
60     output_file3.write(line2)
61     output_file3.write('\n')
62     output_file3.close()
63
64     ser = serial.Serial()
65     ser.port = "/dev/ttyUSB0" # Set this to your serial port
66     ser.baudrate = 9600
67     ser.open()
68     ser.flushInput()
69
70     byte, lastbyte = "\x00", "\x00"
71     cnt = 0
72
73     #serial_port = '/dev/ttyACM0'; # Linux
74     #baud_rate = 9600; #In arduino, Serial.begin(baud_rate)
75     #ser2 = serial.Serial(serial_port, baud_rate)
76     umidade = None
77     temperatura = None
78
79     i = 0
80     while hora == hora_atual:
81
82         #myCmd = 'sudo python /home/pi/Lactea/updown_Lactea.py --yes'
83         #os.system(myCmd)
84
85         # Escrever em arquivo as leituras do sensor AM2302
86
87         temperatura, umidade = coletaAM2302()
88         conectado direto ao Raspberry
89         #print(temp, umid)
90
91         #line = ser2.readline();
92         conectado no Arduino e USB conectada no Raspberry
93         #line = line.decode("utf-8") #ser.readline returns a binary, convert to string
94         horario = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
95         #dados = line.split()
96
97         #if dados[0] == 'Humidity:' and len(dados)== 2:
98         #    umidade = dados[1][:-1]
99         #if dados[0] == 'Temperature:' and len(dados)== 2:
100        #    temperatura = dados[1][:-2]
101
102        if umidade is not None and temperatura is not None:
103            horario = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
104            temp = float(temperatura)
105            umid = float(umidade)
106            temp = round(temp,2)
107            umid = round(umid,2)
108            print(temp, umid)
109            line3 = '|'+str(temp)+'|'+str(umid)
110            #print(line3)
111            write_to_file_path3 = "/home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) + '/' +
112            str(hora) + "/medicoes-AM2302.txt";
113            output_file3 = open(write_to_file_path3, "a")
114            output_file3.write(horario + line3)
115            output_file3.write('\n')
116            output_file3.close()
117
118        lastbyte = byte
119        byte = ser.read(size=1)

```

```

117 # We got a valid packet header
118 if lastbyte == b'\xaa' and byte == b'\xc0':          ##### DESCOMENTAR
119 #if byte == "\x00":                                  ##### COMENTAR
120     sentence = ser.read(size=8) # Read 8 more bytes  ##### DESCOMENTAR
121     readings = struct.unpack('<hhxccc',sentence)     ##### DESCOMENTAR
122     #hora2 = datetime.datetime.now().strftime("%S")  ##### COMENTAR
123     pm_25 = readings[0]/10.0                          ##### DESCOMENTAR
124     pm_10 = readings[1]/10.0                          ##### DESCOMENTAR
125     # ignoring the checksum and message tail
126     #time.sleep(1)                                    ##### COMENTAR
127
128     if (cnt == 0):
129         line = ' | PM2.5 | {0:.2f} | µg/m^3'.format(pm_25)
130         line2 = ' | PM10 | {0:.2f} | µg/m^3'.format(pm_10)
131         horario = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
132         print(horario + line)
133         print(horario + line2)
134         write_to_file_path = "/home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) + '/' +      2
135         str(hora) + '/medicoes-SDS011-PM25.txt";
136         output_file = open(write_to_file_path, "a")
137         output_file.write(horario + line)
138         output_file.write('\n')
139         output_file.close()
140         write_to_file_path2 = "/home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) + '/' +      2
141         str(hora) + "/medicoes-SDS011-PM10.txt";
142         output_file2 = open(write_to_file_path2, "a")
143         output_file2.write(horario + line2)
144         output_file2.write('\n')
145         output_file2.close()
146     cnt += 1
147     if (cnt == 5):
148         cnt = 0
149
150 hora = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H")
151 data = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d")
152
153 if path.exists('/home/pi/Lactea/Dados/' + str(data)) != True:
154     myCmd = 'mkdir /home/pi/Lactea/Dados/' + str(data)
155     os.system(myCmd)
156
157 if hora != hora_atual:
158     hora = datetime.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H")
159     hora_atual = hora
160     myCmd = 'mkdir /home/pi/Lactea/Dados/' + str(data) + '/' + str(hora)
161     os.system(myCmd)
162     write_to_file_path = '/home/pi/Lactea/Dados/' + str(data) + '/' +      2
163     str(hora) + '/medicoes-SDS011-PM25.txt";
164     write_to_file_path2 = "/home/pi/Lactea/Dados/" + str(data) + '/' +      2
165     str(hora) + '/medicoes-SDS011-PM10.txt";
166     write_to_file_path3 = '/home/pi/Lactea/Dados/' + str(data) + '/' +      2
167     str(hora) + '/medicoes-AM2302.txt";
168
169 # line = 'Resultados do sensor SDS011 NOVA PM'
170 line = 'ano-mes-dia horario | nome | concentracao | unidade'
171 print(line)
172 output_file = open(write_to_file_path, "a")
173 output_file.write(line)
174 output_file.write('\n')
175 output_file.close()
176 output_file2 = open(write_to_file_path2, "a")
177 outout file2.write(line)

```

## APÊNDICE 2 – CÓDIGO PARA A TRANSMISSÃO DOS ARQUIVOS GERADOS NA AQUISIÇÃO DOS DADOS

```
1  #!/usr/bin/python
2  # -*- coding: UTF-8 -*-
3  import serial, time, struct, array
4  import datetime
5  import os
6  import time
7  import sys
8  import os.path
9  from os import path
10
11 while True:
12
13     myCmd = 'sudo python /home/pi/Lactea/updown_Lactea.py --yes'
14     os.system(myCmd)
15     time.sleep(30)
16
```

## ANEXO I – PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO UART

 Nova Fitness Co., Ltd.

SDS011 sensor

### The UART communication protocol

Bit rate : 9600

Data bit : 8

Parity bit: NO

Stop bit : 1

Data Packet frequency: 1Hz

The number of bytes	Name	Content
0	Message header	AA
1	Commander No.	C0
2	DATA 1	PM2.5 Low byte
3	DATA 2	PM2.5 High byte
4	DATA 3	PM10 Low byte
5	DATA 4	PM10 High byte
6	DATA 5	ID byte 1
7	DATA 6	ID byte 2
8	Check-sum	Check-sum
9	Message tail	AB

Check-sum: Check-sum=DATA1+DATA2+...+DATA6

PM2.5 value:  $PM2.5 (\mu g / m^3) = ((PM2.5 \text{ High byte} * 256) + PM2.5 \text{ low byte}) / 10$

PM10 value:  $PM10 (\mu g / m^3) = ((PM10 \text{ high byte} * 256) + PM10 \text{ low byte}) / 10$