

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE SENSORES DE MATERIAL
PARTICULADO PM_{2.5} E PM₁₀ EM MONITORES
AUTOMÁTICOS DE QUALIDADE DO AR**

MARTIN DE OLIVEIRA KOTSIS

PROF. DR. JOÃO BASSO MARQUES
Orientador

Cuiabá, MT
Junho de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE SENSORES DE MATERIAL
PARTICULADO PM_{2.5} E PM₁₀ EM MONITORES
AUTOMÁTICOS DE QUALIDADE DO AR**

MARTIN DE OLIVEIRA KOTSIS

*Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Física Ambiental
da Universidade Federal de Mato
Grosso, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Física
Ambiental.*

PROF. DR. JOÃO BASSO MARQUES

Orientador

Cuiabá, MT

Junho de 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

K87a Kotsis, Martin de Oliveira.
Avaliação de sensores de material particulado PM2.5 e PM10 em monitores automáticos de qualidade do ar [recurso eletrônico] / Martin de Oliveira Kotsis. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 57 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Professor. Dr. João Basso Marques.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2023.
Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.
Inclui bibliografia.

1. LASER. 2. Poluição do ar. 3. Sensores óticos. I. Marques, Professor. Dr. João Basso, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO DE SENSORES DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 E PM10 EM MONITORES AUTOMÁTICOS DE QUALIDADE DO AR

AUTOR: MESTRANDO MARTIN DE OLIVEIRA KOTSIS

Dissertação defendida e aprovada em **26 de JUNHO de 2023**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. JOÃO BASSO MARQUES (Presidente Banca / **ORIENTADOR**)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

2. Prof. Dr. PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

3. Prof. Dr. LÚCIO GONÇALVES BARBOSA DE OLIVEIRA (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO - CAMPUS SINOP

CUIABÁ, 26/06/2023.



Documento assinado eletronicamente por **MARCELO SACARDI BIUDES**, **Coordenador(a) de Programas de Pós-Graduação em Física Ambiental - IF/UFMT**, em 28/06/2023, às 09:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO HENRIQUE ZANELLA DE ARRUDA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 28/06/2023, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUCIO GONCALVES BARBOSA DE OLIVEIRA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 29/06/2023, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOÃO BASSO MARQUES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 30/06/2023, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5913599** e o código CRC **FBD9174F**.

Referência: Processo nº 23108.046047/2023-11

SEI nº 5913599

DEDICATÓRIA

À Deus, e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. João Basso Marques, por me orientar, compartilhar os seus conhecimentos e experiências, que foram essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico;

Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira “Paraná” (in memoriam), pela cordialidade, por acreditar em meu potencial, e pelas oportunidades de crescimento no mestrado acadêmico.

Ao Prof. Dr. Jesús Franco Bueno pela confiança e incentivo, através de seus bons conselhos, ao desenvolvimento contínuo na educação, e na vida;

A todos os integrantes do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela convivência, virtual ou real, nesses tempos de pandemia, de forma altruísta e coesa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro concedido durante toda pesquisa, processo nº 133232/2020-4.

À minha querida esposa Telma, por estar ao meu lado em todos os momentos, acreditando em mim e, por muitas vezes abdicando da minha companhia, por apoiar meus propósitos.

Aos meus pais, Lázara e Zoltan (in memoriam), e demais familiares, por tudo o que me ensinaram e representam para mim;

Aos amigos de toda a caminhada.

EPÍGRAFE

“Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente
de qualquer jeito.”

Martin Luther King Jr.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	IV
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE QUADROS	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMÁTICA	13
1.2. JUSTIFICATIVA	15
1.2.1. <i>Objetivos</i>	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 PADRÕES DE QUALIDADE DO AR	18
2.2 ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR	19
2.3.1 <i>Cálculo do Índice de Qualidade do Ar</i>	21
2.4 REDES DE MONITORAMENTO DO AR	21
2.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	23
2.6 AEROSSÓIS E MATERIAIS PARTICULADOS	26
2.7 GRAVIMETRIA	28
2.8 SENSORES ÓTICOS LASER	29
2.9 MICROCONTROLADOR	31
2.10 ESPALHAMENTO ÓTICO	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1 ÁREA DE ESTUDO	32
3.3 MONITOR DE MATERIAL PARTICULADO	32
3.4 PLACA DE DESENVOLVIMENTO ESP32	34
3.5 SENSOR “PMS7003”	36
3.7 SENSOR “SPS30”	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5. CONCLUSÕES	49
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Número de pontos com monitoramento da qualidade do ar sob gestão de órgãos públicos, no Brasil. FONTE: (IEMA, 2022).	22
FIGURA 2- Monitor de qualidade do ar externo / PurpleAir PA-II.	24
FIGURA 3- Representação dos monitores PurpleAir na América do Sul.	25
FIGURA 4- Representação dos monitores PurpleAir na América do Norte.	26
FIGURA 5- Comparação do tamanho do material particulado com fio de cabelo e argila.....	27
FIGURA 6- Diagrama de amostragem de partícula PM2.5 por gravimetria.	28
FIGURA 7- Diagrama de operação do monitor ótico, comunicando com dispositivos em tempo real.....	33
FIGURA 8- Diagrama de blocos funcionais do microcontrolador ESP32.	35
FIGURA 9- Placa ESP DEVKIT DOIT.....	36
FIGURA 10- Sensor PMS7003.....	37
FIGURA 11- Diagrama de bloco funcional do sensor.....	37
FIGURA 12- Sensor SPS30.	39
FIGURA 13- Tela de seleção de dados no ThingSpeak.....	40
FIGURA 14- Visualização de dados em gráficos no ThingSpeak.	40
FIGURA 15- Concentração de PM2.5 dos sensores 1, 2, 3 e 4, com medições realizadas a cada 15 segundos em 01/02/2023.....	42
FIGURA 16- Correlação entre REF e S2.	43
FIGURA 17- Correlação entre REF e S3.....	43
FIGURA 18 - Correlação entre REF e S4.....	43
FIGURA 18 - Sensores REF, e S2, S3 e S4 calibrados.	44
FIGURA 19 - Calibração dos sensores, entre 11:40 e 18:15.	45
FIGURA 20 - Ampliação do gráfico de calibração.....	45
FIGURA 21- Concentração de PM10 nos quatro sensores testados.	46
FIGURA 22 - Correlação entre REF e SENSOR 2.	47
FIGURA 23- Correlação entre REF e SENSOR 3.....	47
FIGURA 24- Correlação entre REF e SENSOR 4.....	47
FIGURA 25- Sensores calibrados para PM10.	48

FIGURA 26- Sensores calibrados em PM10.	48
FIGURA 27- Gráfico dos sensores calibrados para PM10, ampliado.	49

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- Padrões de qualidade do ar.....	19
QUADRO 2- Estrutura do índice de qualidade do ar.....	20
QUADRO 3- Efeitos da poluição do ar, conforme o IQAr.....	20

LISTA DE SÍMBOLOS

MP – Material particulado

OMS – Organização Mundial da Saúde

PM_{2.5} – Material particulado com diâmetro aerodinâmico de 2,5 microns.

PM₁₀ – Material particulado com diâmetro aerodinâmico de 10 microns.

LASER- Amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

WHO - World Health Organization.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

PRONAR - Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar.

IQAr - Índice de Qualidade do Ar.

EPA - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

RESUMO

A poluição do ar atinge todo o planeta, principalmente os países em desenvolvimento, em ritmo acentuado, em grande parte, causados pela ação humana. Os poluentes, são quaisquer partículas presentes no ar, com concentrações capazes de torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando danos materiais, à fauna e à flora. Numerosos estudos relacionam o ar poluído como o principal fator de risco para doenças respiratórias, cardiovasculares, autoimunes, câncer e danos às funções cognitivas. Os prejuízos causados atingem os ecossistemas naturais e antropogênicos, o clima, a economia e toda a sociedade.

Com base nas diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (OMS), um grupo de poluentes foi mundialmente adotado como indicadores de qualidade do ar, em razão da sua frequência de ocorrência, e de seus efeitos adversos. Entre eles estão os materiais particulados: PM_{2.5} e PM₁₀. Utilizando como base os dados estabelecidos como métodos de referência, esse trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade da integração de sensores óticos de material particulados, PM_{2.5} e PM₁₀, em plataformas microcontroladas, formando-se os monitores de partículas. Estes sensores são relativamente baratos e possuem tamanhos compactos, trabalhando em conjunto com microcontroladores, podem realizar medições de tamanho e concentração em tempo real, e enviá-las através de redes sem fio, o que possibilita a comunicação com dispositivos móveis.

Os monitores descritos neste trabalho utilizam os sensores PMS7003 e SPS30, ambos os sensores de baixo custo, que se baseiam no princípio do espalhamento ótico. O sensor possui uma fonte luminosa LASER, que emite luz com foco no ponto de passagem das partículas; e um fotodiodo, que recebe a luz espalhada pelas partículas, e através da conversão de sinais e processamento, pode-se estimar a quantidade de partículas presentes no ar por metro cúbico, bem como diferenciar os tamanhos das partículas. Os valores de R^2 foi superior a 0,9 na correlação entre os sensores PMS7003 com o sensor SPS30, definido como sensor de referência.

Estes equipamentos permitem a obtenção do conhecimento sobre a concentração espaço – temporal dos poluentes destacados, em tempo real, em locais fixos e também em veículos, demonstrando a versatilidade nas aplicações. Portanto, os monitores óticos desenvolvidos neste trabalho proporcionam a medição em locais onde uma estação convencional dificilmente poderia ser utilizada, podendo ser desenvolvida com itens disponíveis no mercado.

Palavras-chave: LASER, poluição do ar, sensores óticos.

ABSTRACT

Air pollution affects the entire planet, especially developing countries, at a rapid pace, largely caused by human action. Pollutants are any particles present in the air, with concentrations capable of making it inappropriate, harmful or offensive to health, causing damage to property, fauna and flora. Numerous studies link polluted air as the main risk factor for respiratory, cardiovascular, autoimmune diseases, cancer and damage to cognitive functions. The damage caused affects natural and anthropogenic ecosystems, the climate, the economy and society as a whole.

Based on the guidelines established by the World Health Organization (WHO), a group of pollutants was adopted worldwide as air quality indicators, due to their frequency of occurrence and their adverse effects. Among them are particulate matter: PM_{2.5} and PM₁₀. Using data established as reference methods, this work aimed to investigate the feasibility of integrating optical sensors of particulate matter, PM_{2.5} and PM₁₀, in microcontrolled platforms, forming particle monitors. These sensors are relatively inexpensive and have compact sizes, working in conjunction with microcontrollers, can perform size and concentration measurements in real time, and send them over wireless networks, which enables communication with mobile devices.

The monitors described in this work use the PMS7003 and SPS30 sensors, both low cost sensors, which are based on the principle of optical scattering. The sensor has a LASER light source, which emits light focused on the point of passage of the particles; and a photodiode, which receives the light scattered by the particles, and through signal conversion and processing, it is possible to estimate the amount of particles present in the air per cubic meter, as well as to differentiate the sizes of the particles. The R^2 values were greater than 0.9 in the correlation between the PMS7003 sensors and the SPS30 sensor, defined as the reference sensor.

This equipment allows obtaining knowledge about the space-time concentration of the highlighted pollutants, in real time, in fixed locations and also in vehicles, demonstrating the versatility in applications. Therefore, the optical monitors developed in this work provide measurement in places where a conventional station could hardly be used, and can be developed with items available on the market.

Keywords: LASER, air pollution, optical sensors.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

A poluição do ar é um problema complexo e atual, principalmente nos países em desenvolvimento. Um ar poluído causa impactos negativos significativos na saúde humana e ecossistêmica. Numerosos estudos apontam o ar poluído como o principal fator de risco para doenças respiratórias, cardiovasculares, câncer e as funções cognitivas. Há estudos que relacionam o ar poluído com o bem-estar subjetivo, que representa a percepção de como as pessoas pensam e vivenciam suas vidas. Os danos atingem os ecossistemas naturais e antropogênicos, o clima, e por consequência, a sociedade e a economia. Considerando todos os prejuízos que proporciona, em diversos aspectos, e em crescimento acelerado, a poluição aérea tornou-se objeto de atenção das autoridades mundiais e da sociedade civil, que buscam em diversas frentes de pesquisa por soluções confiáveis e viáveis, para mensurar e reduzir a emissão dos diversos agentes poluidores.

Os agentes da poluição no ar compõem os aerossóis atmosféricos. São conjuntos de partículas sólidas ou líquidas suspensas em um gás, o que os diferem, em algumas literaturas, na definição do material particulado, pois abrangem também o gás no qual tais particulados estão em suspensão. As fontes de aerossóis podem ser de origem natural, como: erupções vulcânicas, sal marinho e material biológico; e ser de origem antropogênica, que é a ação humana, tais como: a queima de combustíveis, emissão industrial, queimadas. O importante a se ressaltar é que nem todos os aerossóis são poluentes, visto os que não são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente.

A preocupação com a qualidade do ar, considerando os efeitos negativos que a poluição atmosférica pode causar na saúde e no bem estar humano, assim como em mudanças climáticas que atingem todas as formas de vida no planeta, se intensificou após a ocorrência de eventos catastróficos como o Great Smog, em Londres, no ano de 1952. Tal evento causou a morte de milhares de pessoas, e acarretou significativamente em mudanças na pesquisa ambiental, nas regulamentações

governamentais e nas políticas de conscientização da população acerca da relação entre ar limpo e saúde. No Brasil, o desenvolvimento industrial foi marcado por grandes problemas de saúde e ambientais, entre outros, em Cubatão, o primeiro município a ser industrializado no Brasil, devido à sua localização, que era considerada privilegiada. Entretanto, na década de 1980, ainda não havia legislação nacional específica que tratava dos poluentes do ar com maior incidência e impacto.

A partir de 1989, as políticas públicas com o propósito de manter a qualidade do ar em níveis razoáveis, passaram a ser majoritariamente pautadas por publicações da Organização Mundial de Saúde (OMS), que desde então atualiza periodicamente as suas diretrizes para a qualidade do ar, relacionada à saúde, como forma de auxiliar e estimular as autoridades e a sociedade civil a adotar medidas que impliquem na redução da exposição e efeitos adversos da poluição.

A avaliação da qualidade do ar, por questões práticas, é limitada a um número restrito de poluentes, escolhidos como parâmetros devido a sua frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam no meio ambiente. São eles: material particulado inalável (PM₁₀), material particulado fino (PM_{2.5}), Ozônio troposférico (O₃), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Dióxido de Enxofre (SO₂), e Monóxido de Carbono (CO₂).

Dentre os poluentes listados, o material particulado, caracterizado como uma mistura de partículas sólidas e líquidas suspensas na atmosfera é comumente retratada como a forma mais prejudicial de poluição no ar, pois tem a capacidade de penetração profunda nos pulmões, cérebro, corrente sanguínea, pele, sistema reprodutivo, sistema nervoso, olhos, intestinos fígado, ossos, bem como ser responsável por aumentar a incidência e a gravidade de doenças autoimunes. Além disso, há de se considerar também os impactos socioeconômicos relacionados e interdependentes, como: redução visual em ambientes altamente urbanizados e industrializados, preços de moradias, redução na produção agrícola e mudanças climáticas. Desta forma, além dos impactos causados pela incidência do material particulado fino, identificar e quantificar as suas fontes são determinantes para uma adequada gestão da qualidade do ar, e enfoque em estratégias de controle das emissões.

1.2. JUSTIFICATIVA

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), dispõe a Resolução nº491/2018, o documento atual que estabelece os padrões de qualidade do ar, bem como os termos que o definem. Esta Resolução revogou e substituiu a Resolução nº03/1990.

Seguindo as diretrizes da Resolução CONAMA nº491/2018, o documento norteador para análise quantitativa dos poluentes no ar, denominado “Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar”, considera a necessidade de haver a uniformidade no monitoramento da qualidade do ar, e dispõe a respeito dos métodos de referência adotados e os critérios para utilização de métodos equivalentes, a adequada localização dos amostradores, bem como a representatividade temporal dos dados. Além disso, estabelecem os Padrões de Qualidade do Ar, que são valores diários e anuais de poluentes que não devem ser ultrapassados, e também a sistematização do cálculo do Índice de Qualidade do Ar (IQA_r), com a finalidade de facilitar o entendimento da sociedade na condição de exposição, com base em representação por cores.

O equipamento de medição padrão de referência, o amostrador ativo, de acordo com o “Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar”, utiliza o método gravimétrico para determinar a concentração de materiais particulados. São estações com custos elevados para aquisição, e demandam procedimentos específicos que requerem acesso local. Estão presentes majoritariamente em instituições de pesquisa e órgãos governamentais relacionados. Estas estações contabilizam individualmente a concentração de partículas PM_{2,5} e PM₁₀ ao longo de 24 horas. Requerem o manuseio cuidadoso dos filtros que retêm a passagem da partícula de interesse, bem como os procedimentos específicos para análise em laboratório, até obter os valores diários em micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), a unidade de medida padrão para essa grandeza (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2018). Devido a esta série de procedimentos, os dados não são imediatamente disponibilizados ao público.

Paralelamente a este método, há também dois tipos de amostradores automatizados, que também exigem posterior processamento e análise, como o monitor de atenuação da radiação Beta, e funciona sob o princípio de que a intensidade da radiação Beta pela presença de material particulado é proporcional à quantidade e densidade do material presente; e a Microbalança Oscilante de Elemento Cônico (*Tapered Element Oscillating Microbalance* – TEOM), que mede continuamente a concentração de partículas presentes no ar pela diferença de vibrações causada pelo peso das partículas coletadas. Estes métodos de amostragem de material particulado também possuem custo elevado, além de não serem estabelecidos no Brasil como equipamentos padrão de referência, no “Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar”.

Nas últimas décadas, como alternativa para ampliar os pontos de monitoramento da qualidade do ar, até mesmo pela sociedade civil, foram desenvolvidos os sensores com base no espalhamento da luz, que utiliza uma fonte de luz infravermelha ou LASER atingindo a passagem de ar, e redirecionando a luz incidente nas partículas contidas nessa massa de ar. São os chamados sensores óticos de partículas, e geralmente são construídos para detectar as partículas PM_{2.5} e PM₁₀. Devido aos componentes que utilizam para o método de detecção, medição e contagem serem óticos, com sinais processados por circuitos eletrônicos, em substituição a processos mecânicos, tais sensores são compactos, leves, de baixo custo e consumo de energia.

Os sensores óticos, geralmente, são embarcados em sistemas eletrônicos programáveis, dotados de microcontroladores, com a função de manipular os dados coletados e armazenar e/ou enviar, em tempo real para bases de monitoramento. Esta integração entre sensor, sistema microcontrolado e demais periféricos dá origem ao monitor de partículas de baixo custo, que trazem consigo também a possibilidade de aplicações móveis, devido à possibilidade na comunicação com smartphones e notebooks.

1.2.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar propriedades físicas e a consistência dos dados provenientes monitores dotados com dois modelos de sensores óticos de materiais particulados, compactos, sendo uma unidade do modelo SPS30, da fabricante Sensirion; e três unidades do modelo PMS7003, da marca Plantower. realizar as devidas comparações obtidas dos diversos sensores óticos entre si. Desta forma pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma análise do funcionamento dos sensores óticos SPS30, utilizado como referência, assim como os sensores PMS7003, nas concentrações de PM_{2.5} e PM₁₀;
- Analisar os dados obtidos pelos sensores, em ambientes internos, correlacionando-os com o sensor de referência;
- Estudar a viabilidade de implantação de monitores contínuos, com sensores óticos embarcados em estações micrometeorológicas fixas ou móveis, para mapear em tempo real as concentrações de PM_{2.5} e PM₁₀.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PADRÕES DE QUALIDADE DO AR

A gestão da qualidade do ar teve início, no Brasil, a partir da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), uma lei que define os mecanismos e instrumentos de proteção do meio ambiente, instituída pela Lei Federal nº 6.938 de 1981 (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2022), e das Resoluções nº 5/1989 e nº 3/1990 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que constituem o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) (IEMA, 2014).

As diretrizes e normas desempenham um papel muito importante na gestão da qualidade do ar. Basicamente, o padrão da qualidade do ar compreende as associações entre concentrações e tempos médios a serem atingidos, juntamente com valores-limite e valores-alvo, além de vários elementos que devem ser especificados na formulação de um padrão, que incluem: a estratégia de medição e monitoramento; os procedimentos para o tratamento dos dados; e as estatísticas para comparar o valor comparado com o valor padrão. O grau de exposição da população aos poluentes atmosféricos é determinado segundo os

Padrões de Qualidade do Ar (ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE, 2021), sendo este o valor de concentração máxima de um poluente específico na atmosfera em um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica (DRUMM et al., 2014). No Brasil, a divisão entre padrões de qualidade é a seguinte: padrões de qualidade do ar intermediários (PI), que são os valores temporários a serem cumpridos em etapas, e o padrão de qualidade do ar final (PF), que são os valores definidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021). O **QUADRO 1** mostra os valores dos padrões intermediários e finais dos poluentes abordados na resolução CONAMA nº491 (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2018).

QUADRO 1- Padrões de qualidade do ar.

Poluente atmosférico	Período de referência	PI - 1 (µg/m³)	PI - 2 (µg/m³)	PI - 3 (µg/m³)	PF (µg/m³)	ppm
Material particulado - PM₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual	40	35	30	20	-
Material particulado - PM_{2.5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO₂	1 hora	260	240	220	200	-
	Anual	60	50	45	40	-
Ozônio – O₃	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	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual	-	-	-	80	-
Chumbo – Pb¹	Anual	-	-	-	0.5	-

FONTE: CONAMA (2018).

1 - Medido nas partículas totais em suspensão.

2.2 ÍNDICE DE QUALIDADE DO AR

Para facilitar os dados de monitoramento da qualidade do ar de curto prazo, visando o entendimento da sociedade, Índice de Qualidade do Ar (IQA) foi elaborado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA)(AGENCY; DIVISION, 2014), sendo adequados para a realidade nacional conforme estabelecido pelo Anexo IV da Resolução Conama nº491/18. Os poluentes são classificados por índices, que são valores adimensionais, e qualificam a qualidade do ar, inclusive através de cores, para fácil distinção (**QUADRO 2**).

QUADRO 2- Estrutura do índice de qualidade do ar.

Qualidade do ar	Cor	Índice	MP10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h
N1 - Boa	Verde	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 - Moderada	Amarela	41 - 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 - Ruim	Laranja	81 - 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 - Muito Ruim	Vermelha	121 - 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	Violeta	201 - 400	>250 - 600	>125 - 300	>200 - 800	>15 - 50	>1130 - 3750	>800 - 2620

FONTE: (Adaptado de AMBIENTE, 2019).

O índice classifica os possíveis efeitos que a poluição pode causar, conforme o

QUADRO 3.**QUADRO 3-** Efeitos da poluição do ar, conforme o IQAr.

Índice	Cor	Efeitos
0 a 40	Verde	Sem efeitos
41 a 80	Amarela	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população em geral não é afetada
81 a 120	Laranja	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
121 a 200	Vermelha	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis.
201 a 400	Violeta	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

FONTE: (Adaptado de AMBIENTE, 2019).

2.3.1 Cálculo do Índice de Qualidade do Ar

O IQAr para a concentração de cada poluente é calculado a partir da seguinte equação:

$$IQAr = I_{ini} \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini})$$

Onde:

I_{ini} é o valor do índice correspondente à concentração inicial da faixa;

I_{fin} é o valor do índice correspondente à concentração final da faixa;

C_{ini} é a concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida;

C_{fin} é a concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida;

C é a concentração medida do poluente.

2.4 REDES DE MONITORAMENTO DO AR

Os objetivos básicos para a implantação de uma rede de monitoramento da qualidade do ar são: gerar dados sobre as condições atuais da qualidade do ar, realizar a construção de um histórico de dados, em que seja possível verificar o grau de exposição da população aos poluentes atmosféricos. Acompanhando as tendências de médio e longo prazo, e observando as metas estabelecidas, é possível realizar o aprimoramento na gestão da qualidade do ar. No Brasil, em 2021 havia 371 estações de monitoramento ativas, uma quantidade muito baixa se comparada às 5000 estações ativas no Estados Unidos (VORMITTAG et al., 2021).

Considerando a viabilidade na implantação de uma rede de monitoramento do ar, os materiais particulados (PM_{2.5} e PM₁₀), que possuem característica e heterogeneidade complexa (ZHANG; SRINIVASAN, 2020), são os parâmetros

O desenvolvimento e a utilização de sistemas que monitores a qualidade do ar em tempo real, através da Internet das Coisas (IoT), a um custo acessível, se torna importante para ampliação da rede de monitoramento, cobrindo espaços que ainda não são cobertos pelas redes convencionais, que são gerenciadas pelos estados, bem como instituições especializadas na divulgação dos dados a respeito da qualidade do ar para a sociedade (TRILLES et al., 2019) (TAGLE et al., 2020). Estas iniciativas podem partir da própria sociedade, através de redes colaborativas (LUIS VÁZQUEZ-VERA et al., 2020).

A Internet das Coisas (IoT) interliga dispositivos físicos através da rede. As “coisas” incluem sensores sem fio, atuadores, *wearables*, RFID (identificação por radiofrequencia), entre outros. A IoT é uma tecnologia emergente aplicada em vários setores, tal como o monitoramento da poluição do ar (MUPPALLA et al., 2019).

2.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Atualmente, há diversas iniciativas civis colaborativas, que disponibilizam uma plataforma de integração em tempo real de dados dos sensores de baixo custo, para ampliar as informações sobre os principais poluentes no mundo todo (LUIS VÁZQUEZ-VERA et al., 2020). Um dos exemplo é a PurpleAir, que fabrica monitores de qualidade do ar com sensores de baixo custo, e capacitam pessoas do mundo inteiro na coleta de dados e compartilhamento de dados (ZIMMERMAN, 2022) (BI et al., 2022).



FIGURA 2- Monitor de qualidade do ar externo / PurpleAir PA-II.
FONTE: (PurpleAir).

Os monitores de qualidade do ar externo PurpleAir PA-II (**FIGURA 2**) contêm dois sensores óticos de baixo custo, da fabricante Plantower, modelo PMS5003. Os sensores são instalados em duplicata, para garantir a confiabilidade dos dados.

Há outras redes semelhantes, como a AirCasting, aCanAirIO, a PlumeLabs e IQAir, que são projetos de ciência cidadã que também utiliza sensores óticos de baixo custo, em monitores móveis e fixos, e fácil visualização em smartphones e wearables, com a utilização de aplicativos.

Cada círculo colorido nas **FIGURA 3** e **FIGURA 4** , indicam a localização geográfica de um monitor de baixo custo nos mapas da PurpleAir. A cor corresponde ao Índice de Qualidade do Ar, e o número significa a concentração do poluente. A quantidade de círculos presentes nos mapas indicam uma baixa densidade e até mesmo a ausência de medições autônomas, fixas ou móveis, no Brasil, bem como toda a América do Sul. Em contrapartida, a **FIGURA 4** apresenta uma alta quantidade de monitores distribuídos na América do Norte, sobretudo nos Estados Unidos, em que há sobreposição de pontos coloridos, que representam cada monitor PurpleAir PA-II, e seu Índice de Qualidade do Ar correspondente.



FIGURA 3- Representação dos monitores PurpleAir na América do Sul.
FONTE: (PurpleAir).

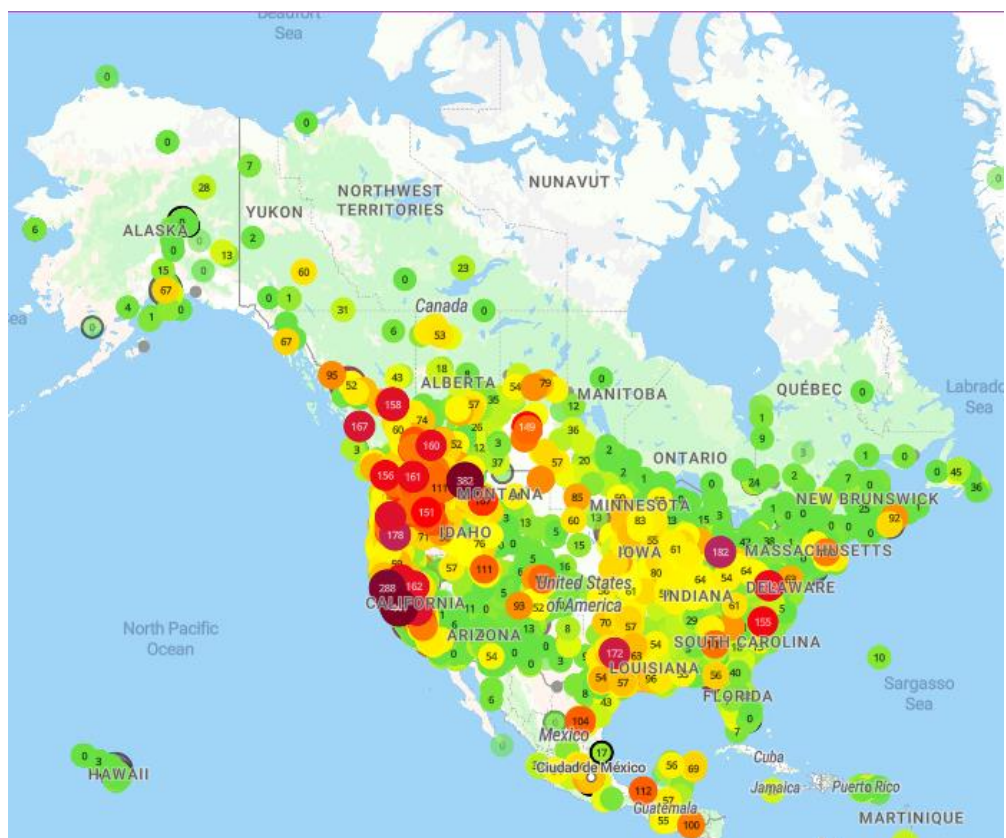


FIGURA 4- Representação dos monitores PurpleAir na América do Norte.
FONTE: (PurpleAir).

2.6 AEROSSÓIS E MATERIAIS PARTICULADOS

Os aerossóis atmosféricos são um conjunto de partículas sólidas ou líquidas suspensas em um gás, o que os diferem na definição do material particulado (**FIGURA 5**), pois abrange também o gás no qual tais particulados estão em suspensão. As fontes de aerossóis podem ser de origem natural, como: erupções vulcânicas, sal marinho e material biológico; e ser de origem antropogênica, que é a ação humana, tais como: a queima de combustíveis, emissão industrial, queimadas.

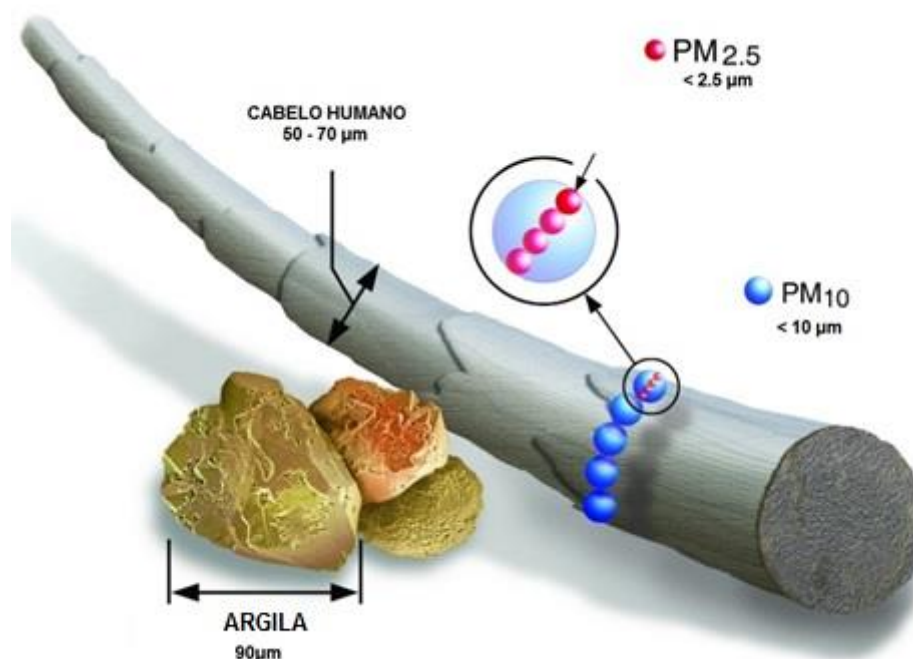


FIGURA 5- Comparação do tamanho do material particulado com fio de cabelo e argila.
FONTE: Adaptado de <https://www.epa.gov>.

De acordo com a fonte emissora e os processos de formação, os aerossóis são classificados como: primários e secundários. Aerossóis primários são emitidos para a atmosfera sem sofrerem nenhum tipo de processo. Os aerossóis secundários são formados a partir dos primários por processos químicos e físicos.

As classes de materiais particulados mais importantes definidas pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) são as PM₁₀ e PM_{2.5}, que se assumem comumente como a massa total de partículas com diâmetro aerodinâmico, respectivamente, inferior a 10 e 2.5µm. Entretanto tal definição é apenas uma aproximação, em que PM₁₀ é o material particulado que passa por uma entrada seletiva de tamanho com um corte de eficiência em diâmetro aerodinâmico de 10 µm. (BUDDE; BUSSE; BEIGL, 2012).

Para PM_{2.5} e PM₁₀, o “Guia técnico para o monitoramento e avaliação da qualidade do ar” define como método de referência aqueles que empregam o método gravimétrico para medir as partículas.

2.7 GRAVIMETRIA

A gravimetria consiste em um método de análise quantitativa da amostra de um elemento ou composto, que se utiliza de sua separação e pesagem na forma mais pura possível, para realizar a medição ou alteração da massa (SOUZA; BORGES, 2019). Desta forma, na gravimetria aplicada na análise de partículas no ar, os filtros de separação das amostras, são submetidas à um dessecador, antes e depois da coleta, para que a umidade não interfira nas medidas. Os filtros são pesados antes e depois da coleta, que é realizada em um amostrador de filtro, o equipamento que possibilita a passagem do ar atmosférico por meio de uma bomba a vácuo em uma vazão ajustável e constante, que entra por uma entrada superior e comporta um impactador, que retira do fluxo as partículas acima do tamanho de interesse. As demais partículas chegam ao filtro, que retém partículas de tamanho maior à medida de corte, contidas nesse ar, em um período estabelecido, em geral, para 24 horas seguidas (**FIGURA 6**).

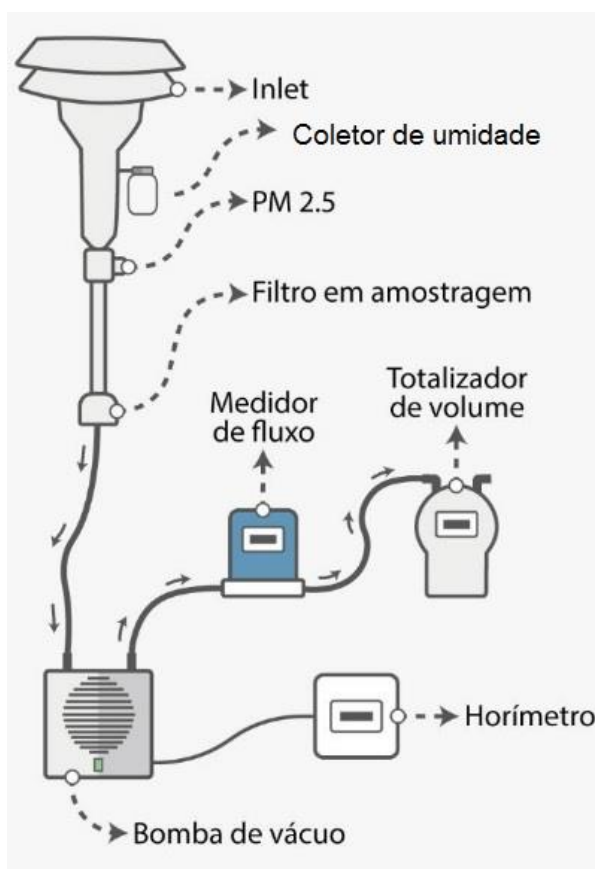


FIGURA 6- Diagrama de amostragem de partícula PM2.5 por gravimetria.
FONTE: (MORAIS, 2022).

A pesagem deve ser feita em uma balança analítica, com resolução acima de 5 casas decimais. Conhecendo a massa e o volume do ar amostrado, é possível conhecer a concentração diária de material particulado em micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). O método gravimétrico, quando realizado adequadamente, é considerado como método mais preciso para o monitoramento, entretanto apresenta desvantagens, se comparado a equipamentos certificados como equivalentes:

- A medição não ocorre em tempo real, pois requer a captura das partículas no filtro e posterior pesagem, para obter-se o resultado da poluição.
- Os dados observados são uma média diária, tempo em que a amostra ficou exposta, sem a possibilidade de se observar as variações durante este intervalo.
- A amostra deve ser inserida, removida e pesada manualmente em uma balança analítica, por um operador, diariamente ou semanalmente, o que implica um alto custo operacional, se comparado aos métodos automatizados.

Como não há uma atmosfera padrão de materiais particulados, para que se possa fazer a calibração, devem ser observados alguns parâmetros para aceitação dos dados obtidos através do amostrador de referência, tais como: a utilização de um dispositivo de controle de vazão, de modo a mantê-la constante e de acordo com o método durante a amostragem; um medidor de vazão, com precisão de $\pm 10\%$; um temporizador, para a medição do tempo de amostragem, com precisão de $\pm 15\text{min}$.

2.8 SENSORES ÓTICOS LASER

Os sensores utilizados neste trabalho utilizam o princípio do espalhamento ótico, tendo em si uma fonte de luz LASER. Esses dispositivos, via de regra, são compostos apenas pelos componentes do circuito de detecção, um microventilador, gerando um fluxo de ar constante internamente, e um circuito eletrônico para conversão de sinais de detecção e mensuração das partículas em uma ou mais saída de dados, variando apenas o protocolo em que os dados são enviados. Para realmente

fazer uso dos dados dos sensores foi necessário que o mesmo fosse conectado a um microcontrolador (QIAN; PANG; O'NEILL, 2018), que consiste em um circuito integrado que reúne um ou mais processadores, memórias voláteis e não voláteis, assim como outros periféricos de entrada e saída de dados, e outros recursos que podem variar a cada modelo e fabricante. Desta forma, um sensor de partículas ótico embarcado em um sistema microcontrolado, com recursos de armazenamento e transmissão dos dados do ambiente, analisado em uma escala temporal, pode ser redefinido como: Monitor de partículas.

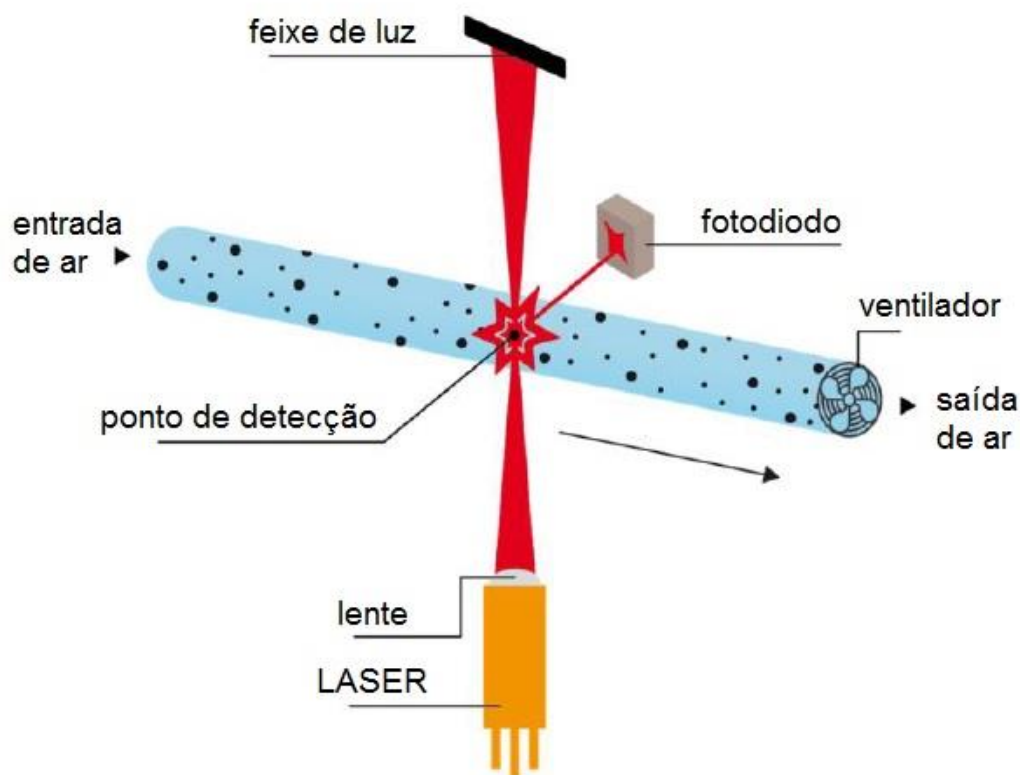


FIGURA 7- Operação dos sensores óticos a LASER.
FONTE: (SENSIRION, 20120).

- O ventilador aspira o ar através da entrada.
- O ar passa pelo laser onde a luz refletida pelas partículas é capturada pelo fotodiodo. O fotodiodo passa a informação para o conversor fotoelétrico, que processa o sinal das partículas em densidade.
- O sinal é transmitido para o processador, onde um algoritmo proprietário processa os dados e fornece saídas para a densidade das partículas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

2.9 MICROCONTROLADOR

O microcontrolador é um sistema microprocessado com vários periféricos disponíveis em um único chip (LIMA; VILLAÇA, 2012). Basicamente, os microcontroladores, são componentes que integram as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento de sistemas embarcados de automação e IoT (*Internet of Things*), necessitando de um circuito mínimo de componentes externos para o seu funcionamento e programação.

2.10 ESPALHAMENTO ÓTICO

As ondas eletromagnéticas são a radiação ou propagação de energia emitidos por corpos com temperatura maior que o zero absoluto (0 K), e podem ocorrer em diversos comprimentos de onda, que formam o espectro eletromagnético.

Há dois processos de interação energia-matéria, que ocorrem na atmosfera, através da interação da radiação com as moléculas e com as partículas estão presentes nela. Tais processos são: a absorção e o espalhamento.

Tais processos ocorrem na atmosfera, por meio da interação da radiação com as moléculas e com as partículas presentes nela. O espalhamento Mie ocorre quando a relação entre o comprimento de onda da radiação e a partícula são próximos, ou seja, estes possuem quase o mesmo tamanho, que é o caso das partículas presentes nas camadas mais baixas da atmosfera.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

As análises presentes neste estudo foram realizadas na cidade de Cuiabá, no interior do prédio em que se localiza o Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, da Universidade Federal de Mato Grosso, câmpus Cuiabá.

Os monitores foram instalados no laboratório de Instrumentação, um ambiente fechado, e com variações na suspensão de partículas PM_{2.5} e PM₁₀, de acordo com a quantidade de pessoas no ambiente, utilização dos equipamentos e ferramentas, e funcionamento do aparelho de ar condicionado.

3.3 MONITOR DE MATERIAL PARTICULADO

O monitor de partículas, assim denominado por conter, em um único dispositivo: o elemento sensor, o componente de tratamento, de armazenamento e envio dos dados, no caso o microcontrolador, os circuitos necessários para a correta integração entre tais partes, inclusive uma fonte de alimentação compatível dotada de capacidade para realizar as medições em um intervalo de tempo necessário. Para proteger todas as peças que compõe o monitor de partículas, de efeitos causados por elementos climáticos e demais intempéries, quando utilizados em ambientes externos, os mesmos são montados no interior de um abrigo micrometeorológico, que permita, sem interferir, as medições.

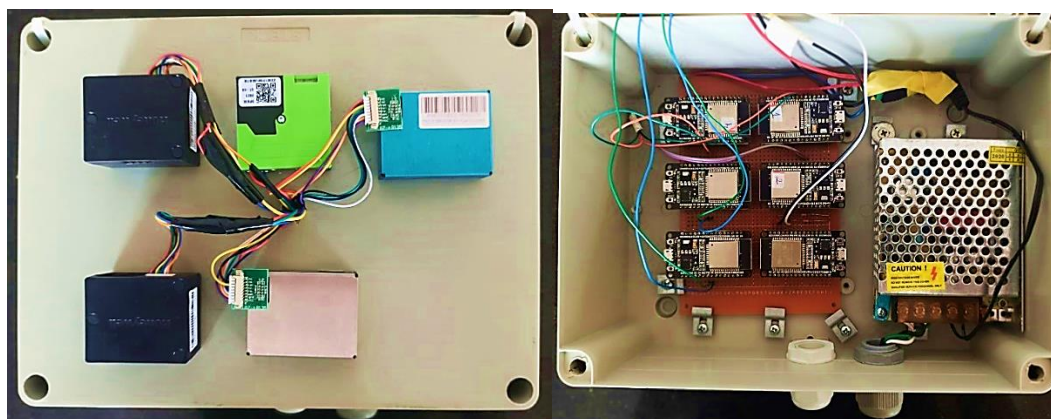


FIGURA 8- Monitor ótico para partículas de baixo custo.
FONTE: (Autor).

No monitor de material particulado PM_{2.5} e PM₁₀, desenvolvidos com componentes de baixo custo e disponíveis no mercado (**FIGURA 8**), integrou fisicamente todos os sensores.

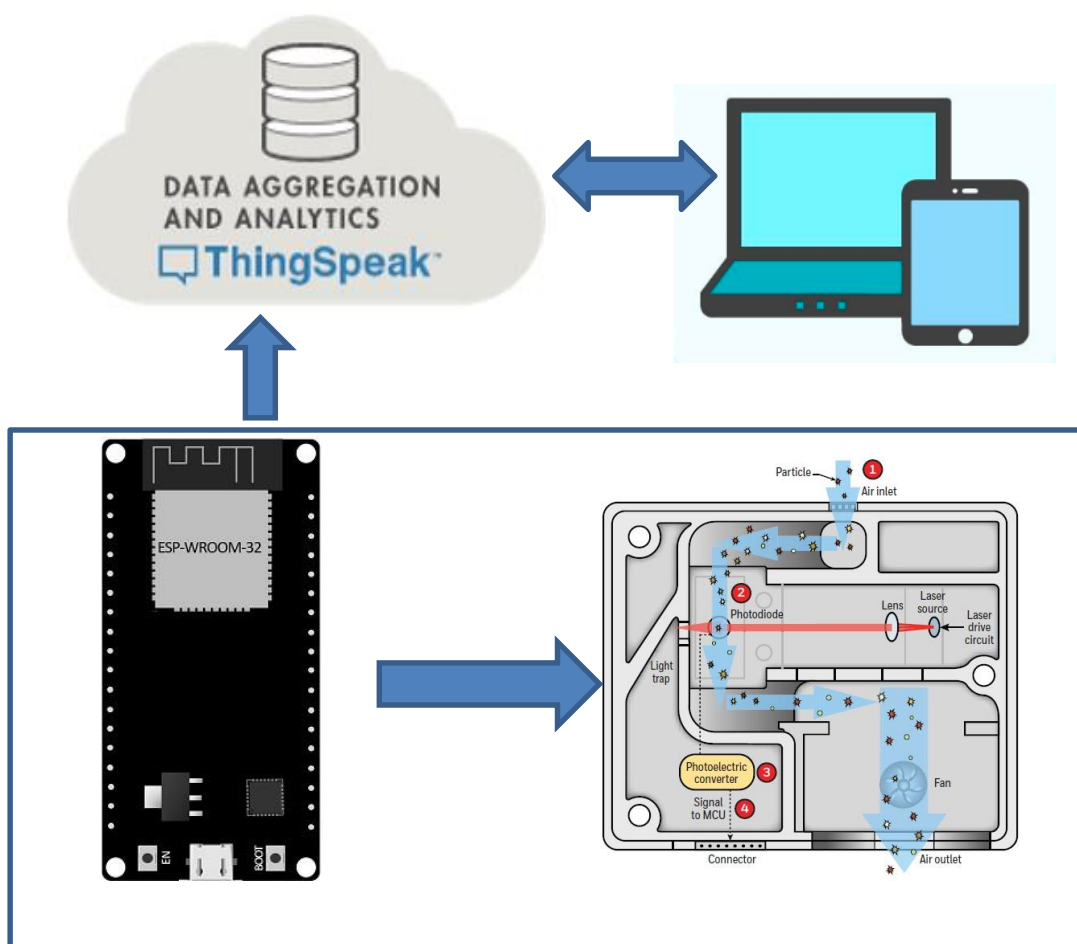


FIGURA 7- Diagrama de operação do monitor ótico, comunicando com dispositivos em tempo real.
FONTE: (Autor).

Desta forma, este monitor de material particulado é composto basicamente por um ou mais sensores óticos de baixo custo, enviando dados ciclicamente para uma placa eletrônica, que gerencia os dados que devem ser armazenados, e estabelece comunicação em tempo real com dispositivos externos sem a necessidade de conexão física, por meio do protocolo Wifi.

3.4 PLACA DE DESENVOLVIMENTO ESP32

ESP32 é o nome de uma série de sistemas em um chip (SoC) programáveis de baixo custo e baixo consumo, que contém o microcontrolador ESP32-D0WD (ou suas variantes) (**FIGURA 8**), com recursos de Wi-Fi e Bluetooth de modo duplo, projetado pela empresa Espressif Systems (ESP, 2021). Para funcionar, o ESP32 precisa de componentes adicionais: uma memória flash usada para armazenar o firmware e os dados, um cristal oscilador que produz a frequência de processamento dos programas, uma antena para os recursos de comunicação, bem outros componentes passivos. Por isso, a Espressif também fabrica módulos que integram tais componentes, como o modelo: ESP-WROOM-32 (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

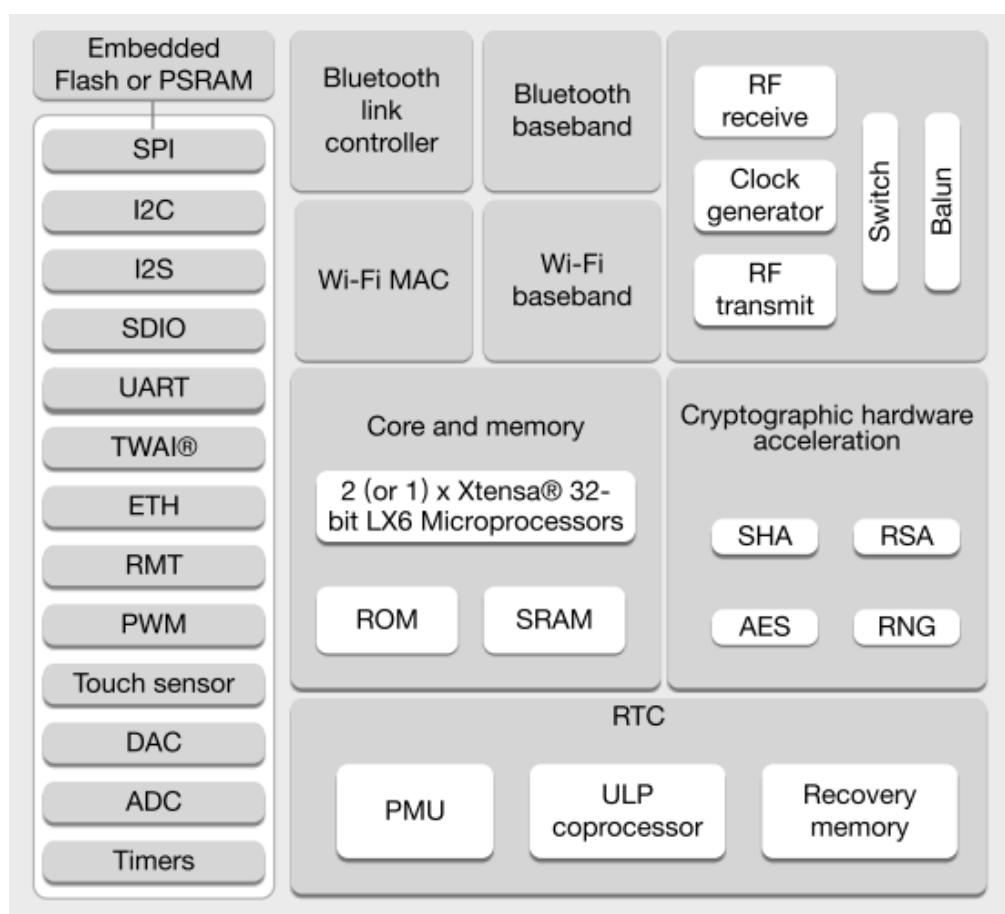


FIGURA 8- Diagrama de blocos funcionais do microcontrolador ESP32.
FONTE: (ESP, 2021).

O módulo ESP-WROOM-23 possui dimensões compactas, uma característica muito conveniente para aplicações em fase final de desenvolvimento, principalmente em IoT. Entretanto, para projetos em fase de testes, em que há necessidade de alterações de hardware e software, os pinos do módulo são mais acessíveis em uma placa de desenvolvimento. A placa de desenvolvimento denominada ESP32 DEVKIT DOIT (**FIGURA 9**), utilizada neste estudo, contém um ESP-WROOM-32, circuito de gravação com chip e porta micro USB, também utilizada para alimentação elétrica, possível devido ao circuito com um regulador de tensão, que recebe a tensão de 5VDC, e disponibiliza ao módulo 3.3VDC.



FIGURA 9- Placa ESP DEVKIT DOIT.

FONTE: (Autor).

As principais características da placa ESP DEVKIT DOIT são: arquitetura de 32 bits, núcleo duplo, clock de até 240MHz, memória RAM de 512kB, Wi-fi 2.4GHz, Bluetooth 4.2 e BLE (Bluetooth Low Energy), entre outros periféricos de comunicação. Os terminais, dentre os quais estão as interfaces de entradas/saídas, são espaçadas em medidas de montagem PTH (Pin Through Hole), padrão de 0.1”, o que facilita a prototipagem e testes.

3.5 SENSOR “PMS7003”

O Sensor PMS7003 é um modelo de sensor fabricado pela empresa Plantower, que permite obter a concentração de partículas suspensas no ar (**FIGURA 10**). Este sensor disponibiliza os dados de PM1, PM2.5 e PM10 (micrômetros), para a placa ESP32, através do protocolo serial UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), em 3.3VDC. Portanto, utiliza dois pinos para a comunicação, RX (recebe dados) e TX (envia dados) (PLANTOWER, 2016).



FIGURA 10- Sensor PMS7003.

FONTE: (Autor).

Seu princípio de funcionamento se baseia na dispersão a LASER, o que significa produzir dispersão LASER irradiada por partículas suspensas no ar, coletando a luz dispersa em um determinado grau, para obter a curva de mudança de luz de dispersão no tempo. Um microprocessador interno ao sensor calcula o diâmetro de partícula equivalente, e o número de partículas com diâmetro diferente por unidade de volume, com base na teoria MIE (PLANTOWER, 2016). O diagrama funcional do sensor pode ser visto na **FIGURA 11**.

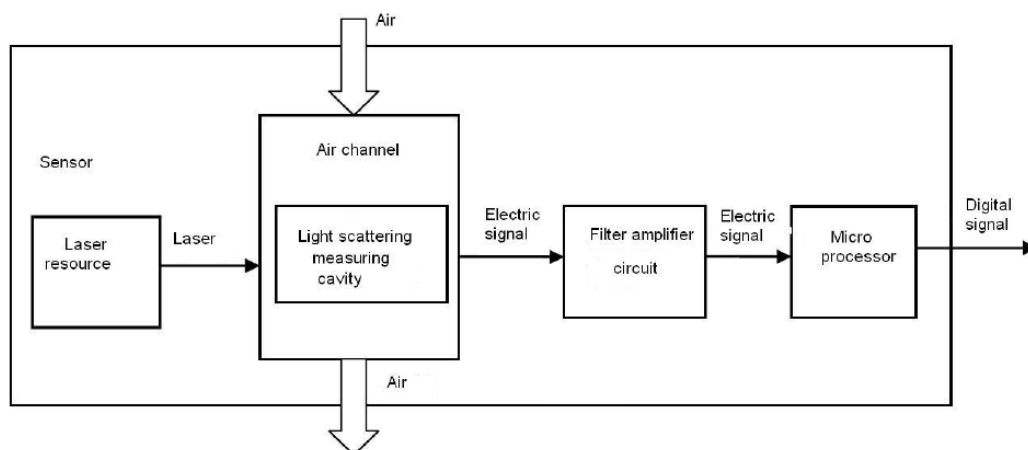


FIGURA 11- Diagrama de bloco funcional do sensor.

FONTE: (PLANTOWER, 2016).

O sensor possui um estágio de detecção das partículas por dispersão, em uma cavidade em que o laser incide nas partículas presentes no ar que flui, através do orifício de entrada, que possui um microventilador, para uma abertura de saída, por sucção. A dispersão de luz atinge o elemento receptor proporcionalmente ao tamanho

e a quantidade de particulados presentes no ar aspirado, que envia sinais elétricos para o estágio eletrônico que filtra os sinais e os amplifica, para o estágio que abarca o microprocessador, responsável por distinguir as partículas e disponibilizar os valores, conforme o protocolo de comunicação, das concentrações instantâneas da massa das partículas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

O sensor deve ser alimentado com a tensão de 5VCC, entretanto as portas de comunicação operam com o nível de tensão de 3.3VCC, compatível com a placa de desenvolvimento ESP DEVKIT DOIT. A corrente elétrica de consumo em funcionamento é próxima a 100mA. Há dois modos de saída neste sensor: passivo e ativo. O padrão é o modo ativo, que envia os dados para as portas automaticamente. Este modo se divide em dois submodos: estável e rápido. Se a mudança de concentração for pequena, o sensor funcionará no modo estável com o intervalo real de 2,3 segundos. E se a mudança for grande, o sensor será alterado para o modo rápido automaticamente com o intervalo de 200 a 800 milissegundos. No modo passivo, os dados são enviados mediante solicitação do programa.

3.7 SENSOR “SPS30”

O SPS30 é um modelo de sensor óptico de partículas, desenvolvido pela Sensirion. Este sensor também utiliza o espalhamento ótico da luz LASER, processados por algoritmos avançados para a detecção e classificação de PM₁, PM_{2.5}, PM₄ e PM₁₀ (**FIGURA 12**).



FIGURA 12- Sensor SPS30.
FONTE: (Autor).

Os sensores SPS30 Sensirion possuem a certificação MCERTS, uma certificação baseada no relatório MCERTS 80010867 datado de 25/11/2019 de teste, e na avaliação da Sira, além da vigilância contínua do produto e do processo de fabricação (SIRA CERTIFICATION SERVICE, 2021). Os mesmos também são calibrados usando instrumentos de referência, tais como o TSI Optical Particle Sizer Modelo 3330 ou o TSI DustTrak™ DRX 8533, para garantir a menor variação possível entre cada lote (SENSIRION, 2020). Desta forma, o monitor que contém o sensor SPS30 foi escolhido como referência para a presente pesquisa, em relação aos que contém os sensores PMS7003.

Nos monitores de partículas desenvolvidos na presente pesquisa a aquisição dos dados foi realizada por meio da comunicação de rede Wifi das placas ESP DEVKIT DOIT, ligadas a cada sensor, para a plataforma de aquisição de dados Thingspeak. Cada conjunto foi programado individualmente, conforme os protocolos de comunicação de cada sensor, e possuem um endereço de comunicação único. Por meio de tal endereço, previamente configurado na plataforma Thingspeak, os dados são enviados e podem ser visualizados em gráficos de linha atualizados em tempo real, no site da Thingspeak (**FIGURA 13**), onde também realizar o download dos dados armazenados no formato de planilhas. Os valores dos monitores de partículas são armazenados a cada 15 segundos, e permanecem disponíveis para visualização e download através do endereço <https://thingspeak.com/>, mediante prévio cadastro e

senha, em dispositivos que estejam conectadas à internet.

ThingSpeak™			Channels ▾	Apps ▾	Devices ▾	Support ▾
New Channel			Search by tag			Q
Name ↕	Created ↕	Updated ↕				
 Sensor 1  sps30, sensorion Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2022-12-28	2023-03-03 20:55				
 Sensor 2  pms7003, plantower Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2022-12-29	2023-03-03 21:00				
 Sensor 3  pms7003, plantower Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2023-01-02	2023-03-03 21:00				
 Sensor 4  pms7003, plantower Private Public Settings Sharing API Keys Data Import / Export	2023-01-02	2023-03-03 21:00				

FIGURA 13- Tela de seleção de dados no ThingSpeak.

A plataforma também permite a visualização gráfica dos dados mais recentes, com atualizações em tempo real, conforme a **FIGURA 14**.

Channel Stats

Created: 5 months ago
 Last entry: 3 months ago
 Entries: 162614

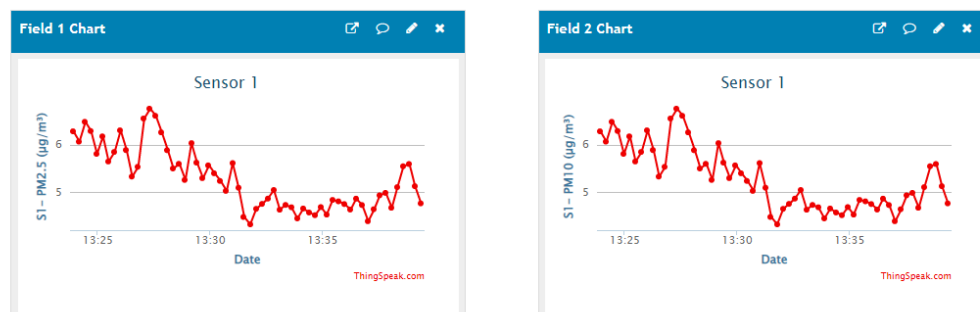


FIGURA 14- Visualização de dados em gráficos no ThingSpeak.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pelos monitores desenvolvidos para mensurar a concentração de material particulado PM_{2.5} e PM₁₀, mostrando os dados dos quatro monitores de partículas, tendo como monitor de referência aquele que integra o sensor SPS30- Sensirion, e também outros três monitores compostos pelo sensor PMS7003- Plantower, armazenados em medições com intervalo de 15 segundos. Comparando os dados de cada um dos sensores entre si, e com o sensor de referência, foram analisados o comportamento dos dados dos sensores, a correlação e a regressão linear, tal como o coeficiente de determinação R^2 , precisão e acurácia.

Nas medições, todos os monitores foram submetidos ao mesmo ambiente, para garantir a validade dos dados e certificar que os mesmos estivessem funcionando em igualdade de condições.

A coleta dos dados dos quatro monitores utilizada ocorreu no dia 06 de fevereiro do ano de 2023. Nas planilhas constam 1252 entradas de dados, para PM_{2.5} e PM₁₀, e as leituras foram efetuadas a cada 15 segundos, sincronizados pela internet. Obteve-se os dados dos quatro monitores, sendo nomeados, conforme o sensor que os integra, da seguinte forma: REF – SPS30, 2 – PMS7003, 3 – PMS7003, e 4 – PMS7003. Tais rótulos facilitam a visualização nos gráficos e tabelas que serão apresentados.

No gráfico (**FIGURA 15**), são apresentados os valores dos quatro monitores, para partículas PM_{2.5}, entre os horários 12:45 e 18:15, um intervalo em que houve menor quantidade de picos de concentração de partículas, e uma maior semelhança entre os valores mostrados.

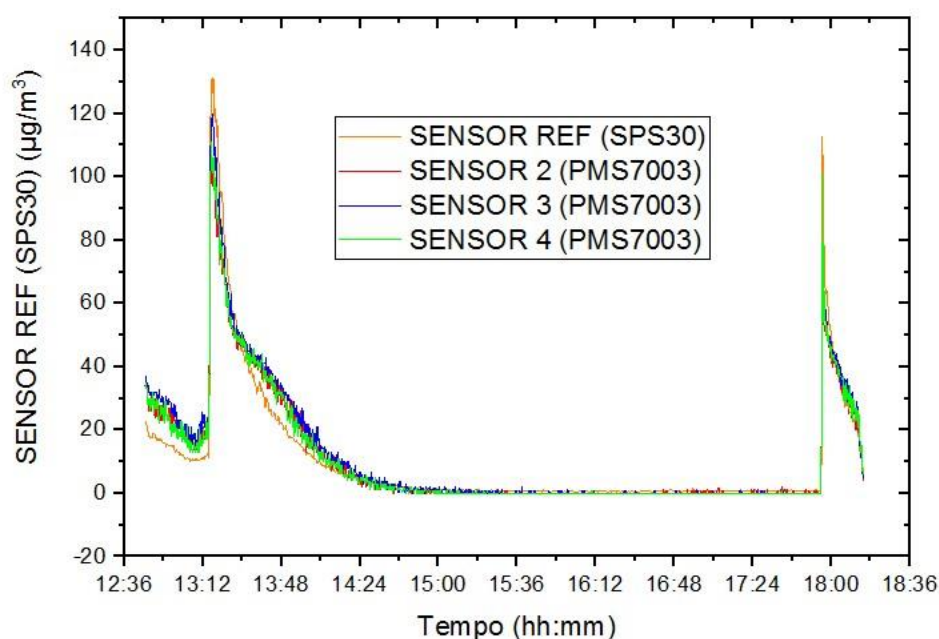


FIGURA 15- Concentração de PM2.5 dos sensores 1, 2, 3 e 4, com medições realizadas a cada 15 segundos em 01/02/2023.

Em **FIGURA 15**, o SENSOR REF apresentou picos mais elevados a partir de 13:12 e a partir das 18:00. Os demais sensores apresentaram valores mais próximos entre si, em todo o período.

A **FIGURA 16** apresenta a correlação entre SENSOR REF e SENSOR 2, para PM2.5, com R quadrado ajustado com valor: 0,93267. A concentração de partículas variou de 0 a aproximadamente 120µg/m³.

Na **FIGURA 16**, referente às partículas PM2.5, correlaciona o SENSOR REF com o SENSOR 3, cujo R quadrado ajustado obteve o valor: 0,93652.

Também para PM2.5, o gráfico (**FIGURA 17**) apresenta a correlação entre o SENSOR REF e SENSOR 4, que indicou o R quadrado ajustado: 0,94011.

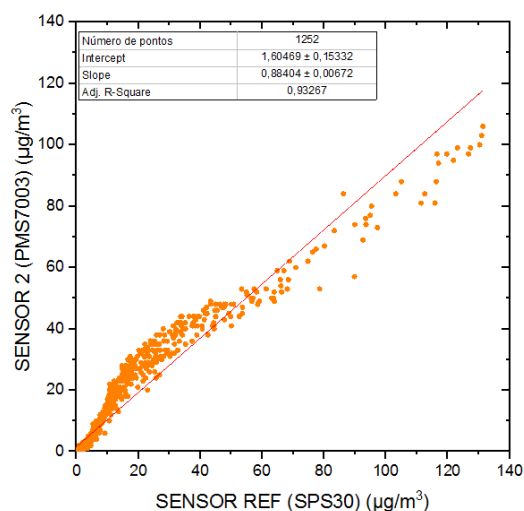


FIGURA 16- Correlação entre REF e S2.

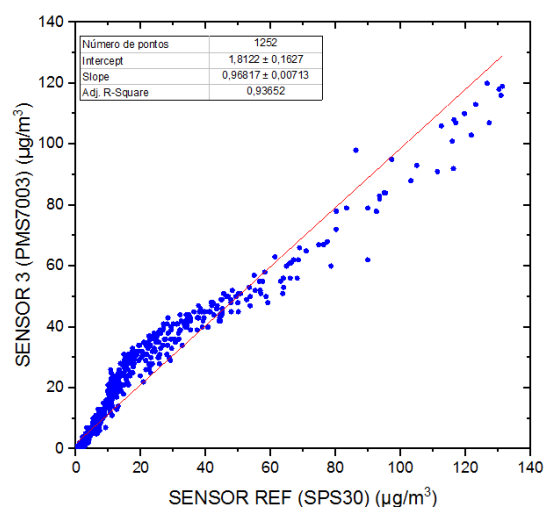


FIGURA 17- Correlação entre REF e S3.

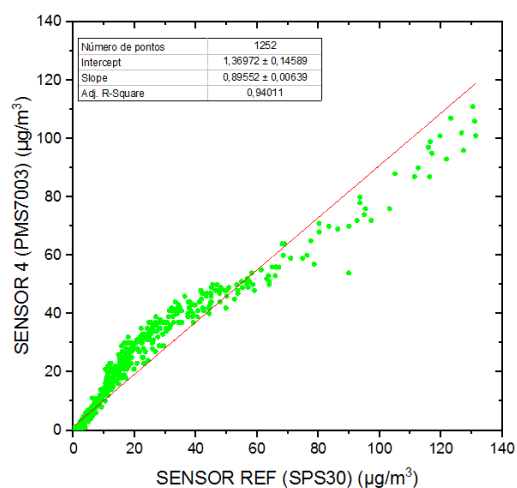


FIGURA 17 - Correlação entre REF e S4.

Aplicando a equação de regressão linear para SENSOR 2, SENSOR 3 e SENSOR 4, os valores são ajustados para o seguinte gráfico (**FIGURA 18**), que aproxima os valores em todo o período medido.

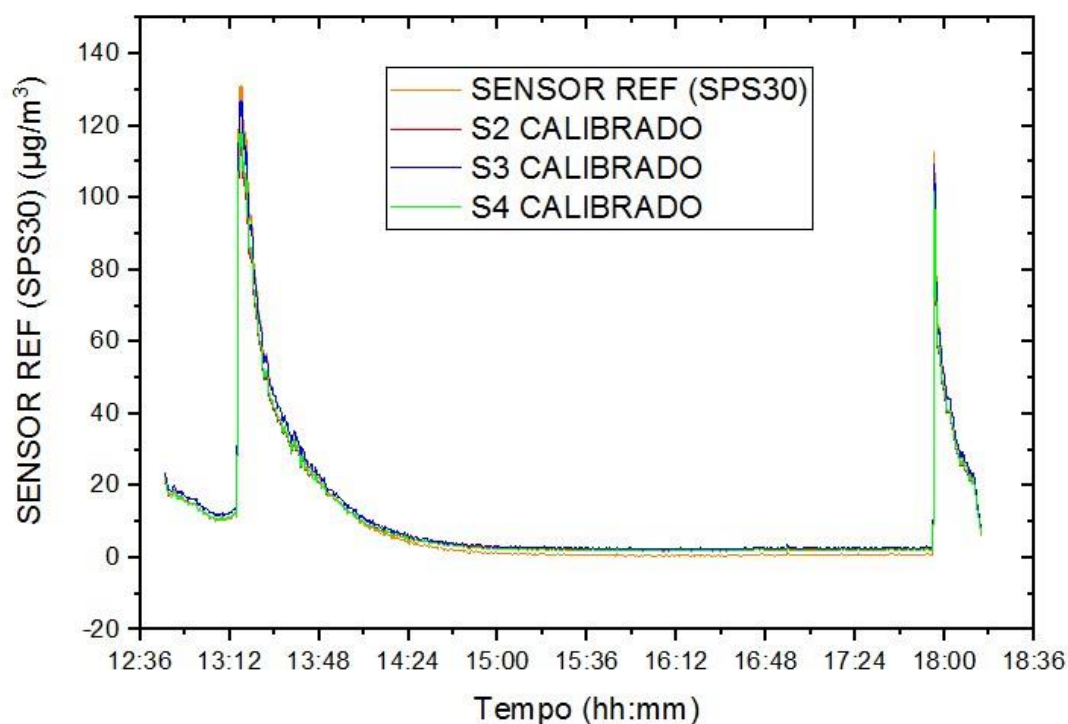


FIGURA 18 - Sensores REF, e S2, S3 e S4 calibrados.

Aplicando a equação de regressão linear para um intervalo maior de tempo, em PM_{2.5}, o gráfico a seguir (**FIGURA 19**) apresenta uma aproximação entre os valores dos sensores calibrados com o sensor de referência SENSOR REF. Nos picos que excederam $200\mu\text{g}/\text{m}^3$, os valores continuaram acentuados em relação aos demais sensores.

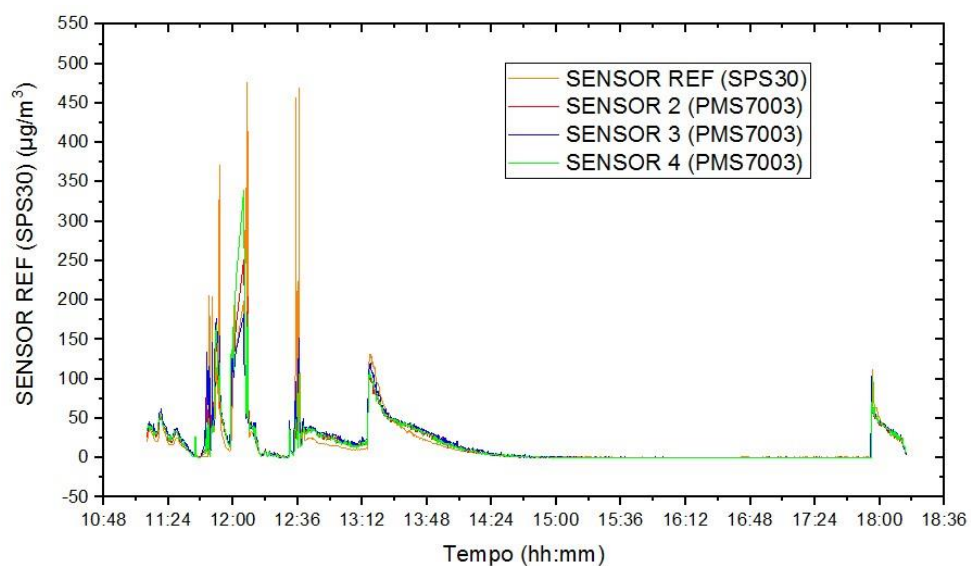


FIGURA 19 - Calibração dos sensores, entre 11:40 e 18:15.

A seguir, o gráfico (**FIGURA 20**) apresenta de forma ampliada, o intervalo em que ocorrem as elevações mais acentuadas na concentração de PM2.5, medida nos quatro monitores, entre 11:40 e 18:15.

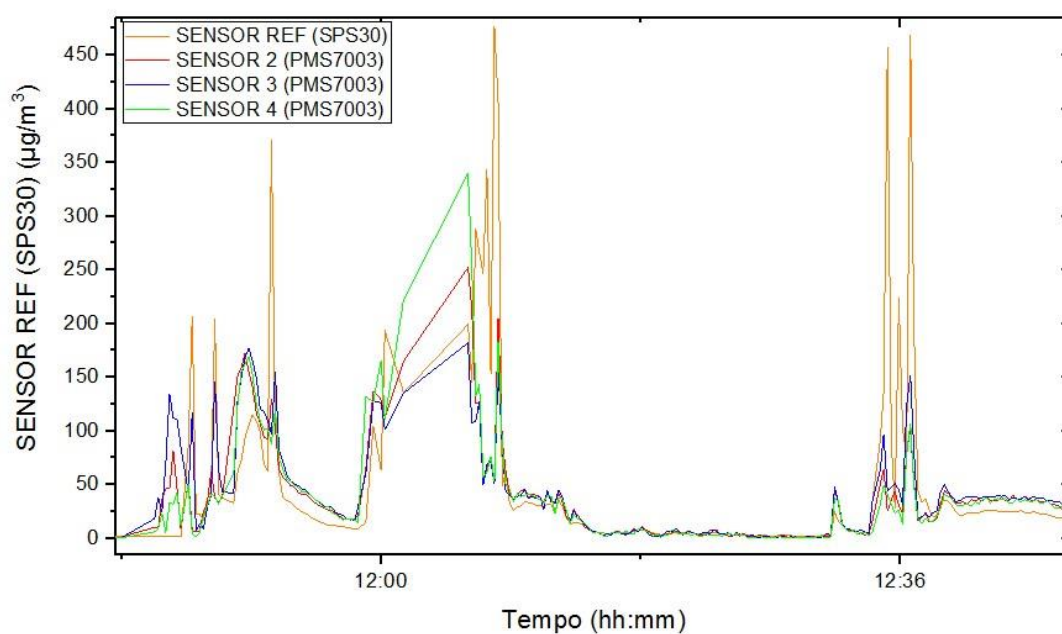


FIGURA 20 - Ampliação do gráfico de calibração.

Para as medições de PM₁₀, os gráficos são mostrados a seguir. O gráfico mostrado na **FIGURA 21** mostra o comportamento dos sensores entre 12:45 e 18:15. É possível observar uma elevação e um declínio acentuado do sensor de referência, SENSOR REF, em relação aos demais sensores, entre 13:12 e 14:24, e o pico atingiu 170 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

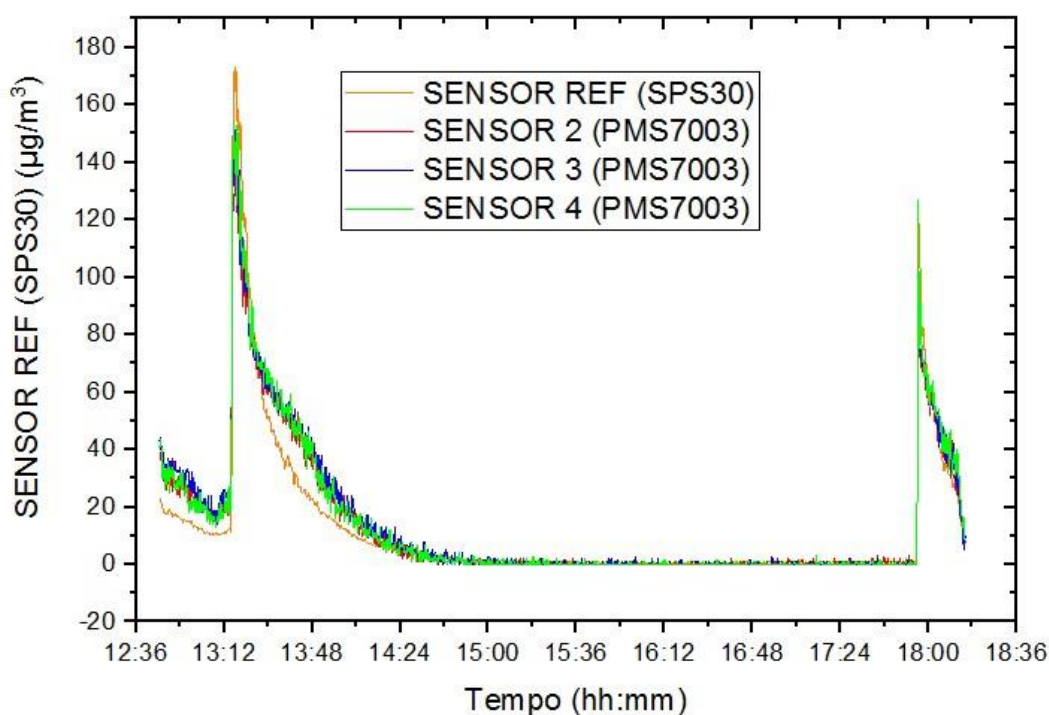


FIGURA 21- Concentração de PM₁₀ nos quatro sensores testados.

Os gráficos seguintes (**FIGURA 22**, **FIGURA 23**, **FIGURA 24**) apresentam as correlações entre SENSOR REF e SENSOR 2, com R quadrado ajustado com valor: 0,9498; o SENSOR REF e SENSOR 3, com R quadrado ajustado com valor: 0,94554; e SENSOR REF e SENSOR 4, com R quadrado ajustado com valor: 0,96156. A concentração de partículas variou de 0 a aproximadamente 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

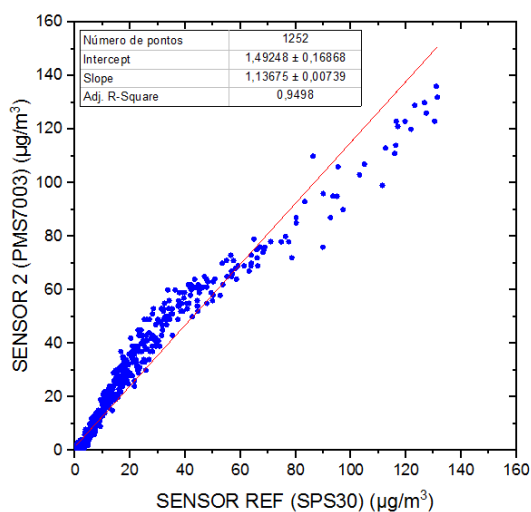


FIGURA 22 - Correlação entre REF e SENSOR 2.

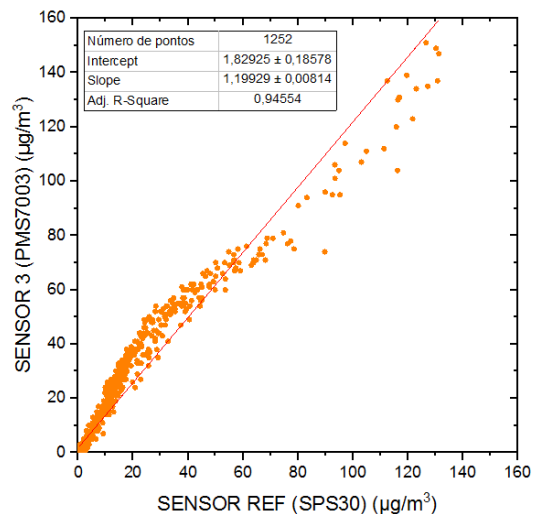


FIGURA 23- Correlação entre REF e SENSOR 3.

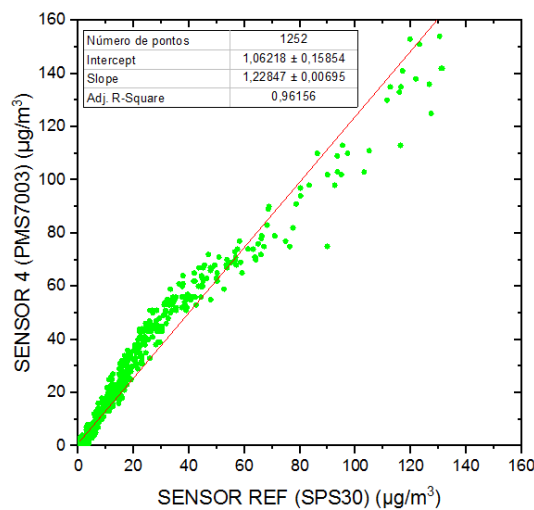


FIGURA 24- Correlação entre REF e SENSOR 4

Após a calibração, utilizando a equação de regressão linear, o seguinte gráfico (FIGURA 25) apresenta maior proximidade entre os valores dos sensores testados com o sensor de referência.

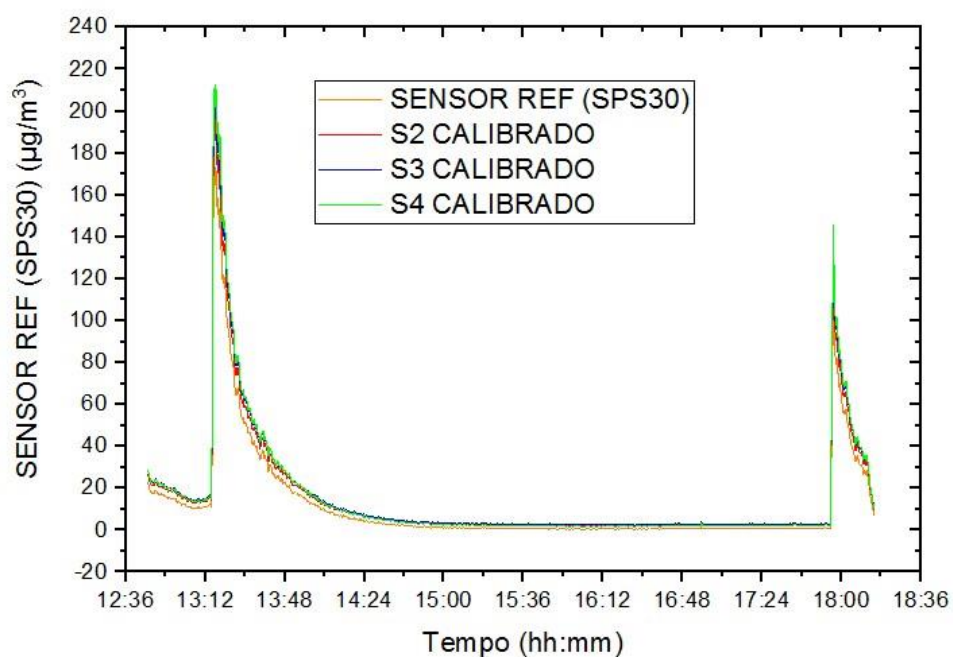


FIGURA 25- Sensores calibrados para PM10.

A calibração também foi aplicada a um intervalo maior de tempo, com picos de concentração maiores, de PM10. Nesse caso, há valores maiores na elevação para o SENSOR 4, em que a concentração se aproxima de $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$, conforme a FIGURA 26.

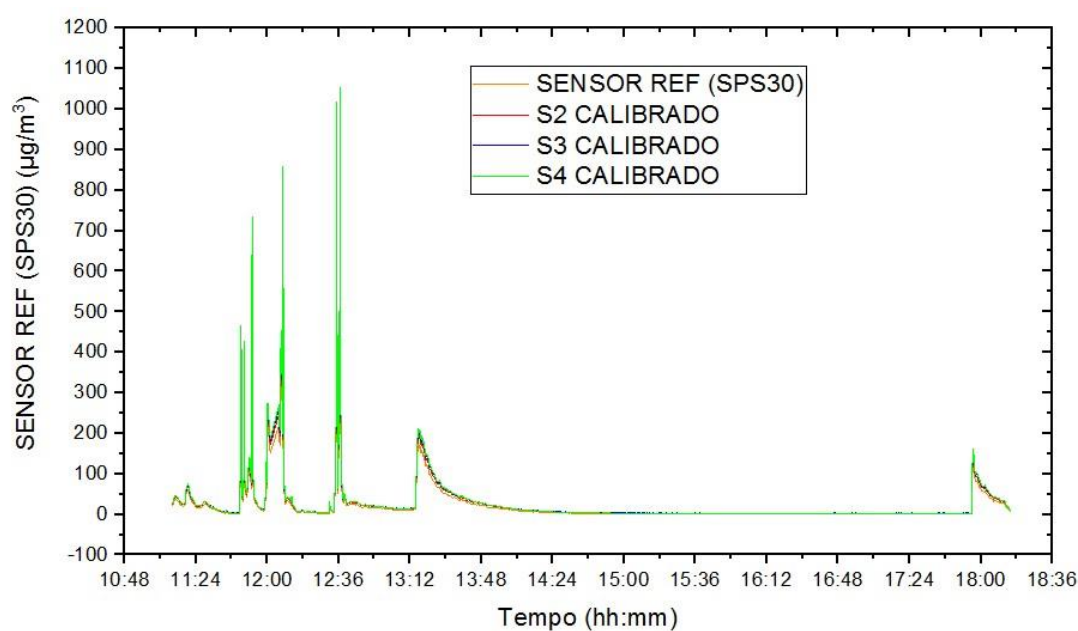


FIGURA 26- Sensores calibrados em PM10.

No proximo gráfico (Figura XX), há uma ampliação, para melhor visualização dos sensores entre 11:44 e 12:12.

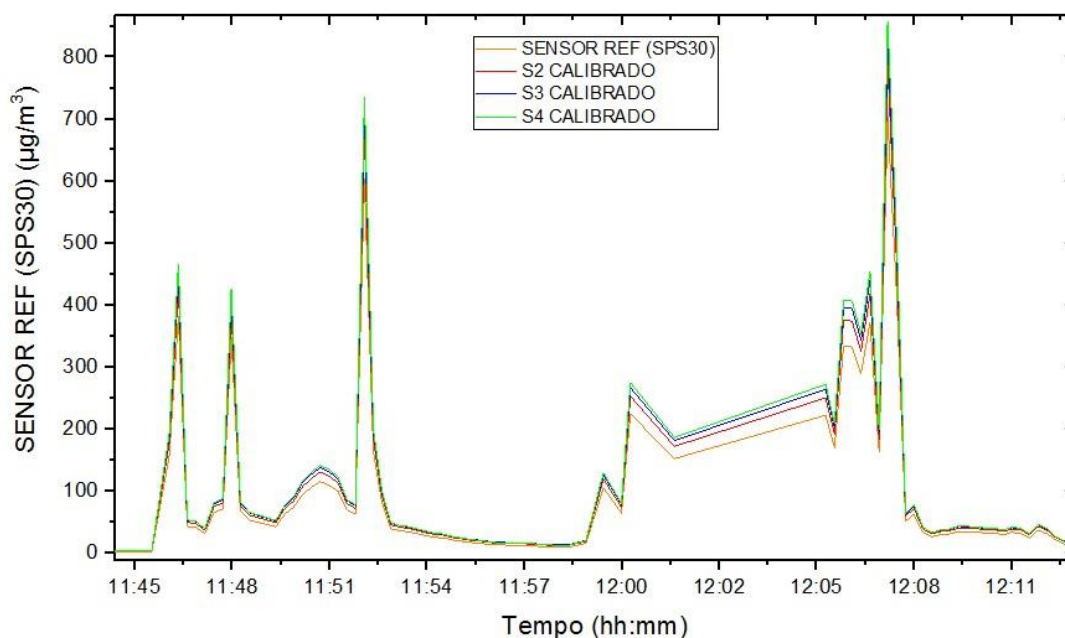


FIGURA 27- Gráfico dos sensores calibrados para PM10, ampliado.

5. CONCLUSÕES

Os dados obtidos demonstram que os sensores apresentam valores coerentes entre si, com valores de R^2 acima de 0,9 demonstrando a acurácia entre o sensor de referência e os outros quatro sensores. Isso indica que os mesmos são viáveis para serem aplicados em monitores de qualidade do ar de baixo custo. Tais monitores têm o potencial de abrangência maior que as estações de qualidade do ar convencionais, ampliando e trabalhando em conjunto com as mesmas.

Através da visualização ampliada dos gráficos que comparam o sensor de referência com os demais sensores, para os dois diâmetros, PM2.5 e PM10, é possível perceber que as medidas são mais coincidentes nas concentrações de PM10, sobretudo

nos picos.

Os resultados podem ser mais confiáveis através da utilização de mais de um sensor em cada monitor, através da comparação e ajuste dos resultados.

Entretanto não foi possível realizar as devidas comparações com um equipamento amostrador de referência, que poderia fornecer maiores detalhes sobre a consistência dos resultados obtidos.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho proporcionou o conhecimento a respeito dos detalhes dos sensores, que envolvem limitações e possibilidades de melhoria.

Seguem como sugestões para a continuidade nos monitores utilizados, o desenvolvimento de teste dos sensores em um ambiente controlado, uma câmara isolada, com convecção forçada, possibilidade de inserção de fontes de poeira e fumaça, e controle de umidade e temperatura.

Há também a necessidade de desenvolvimento de um sensor, baseado no mesmo princípio, considerando os detalhes construtivos, como o duto de passagem do ar com as partículas, e detalhes eletrônicos e de programa com o código aberto. O sensor pode ser construído a partir de uma impressora 3D, que poderia representar um aprimoramento contínuo, e integração com sensores de outras variáveis meteorológicas, de acordo com a demanda.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCY, U. S. E. P.; DIVISION, I. Air Quality Index (AQI). **Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research**, n. February, p. 120–120, 2014.

BI, J. et al. Publicly available low-cost sensor measurements for PM_{2.5} exposure modeling: Guidance for monitor deployment and data selection. **Environment International**, v. 158, 2022.

BUDDE, M.; BUSSE, M.; BEIGL, M. Investigating the use of commodity dust sensors for the embedded measurement of particulate matter. **9th International Conference on Networked Sensing Systems, INSS 2012 - Conference Proceedings**, p. 1–4, 2012.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. RESOLUÇÃO Nº 491, DE 19 DE NOVEMBRO DE 2018. p. 1–5, 2018.

DRUMM, F. C. et al. Poluição Atmosférica Proveniente Da Queima De Combustíveis Derivados Do Petróleo Em Veículos Automotores '[Air Pollution From The Burning Of Petroleum Derived Fuels In Motor Vehicles.]. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66–78, 2014.

ESP. ESP32 Series Datasheet. **Espressif Systems**, p. 1–65, 2021.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32-WROOM-32D and ESP32-WROOM-32U Datasheet. p. 27, 2022.

IEMA. Primeiro diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Instituto de Energia e Meio Ambiente**, 2014.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. Recomendações para a expansão e a continuidade das redes de monitoramento da qualidade do ar no Brasil. p. 1–17, 2022.

LIMA, C. B. DE; VILLAÇA, M. V. M. **Avr e Arduino: Técnicas De Projeto**. [s.l: s.n.].

LUIS VÁZQUEZ-VERA, J. et al. **Design of a Low-cost Air Quality Remote Monitoring System based on IOT and Sensor Sensitivity Validation; Design of a Low-cost Air Quality Remote Monitoring System based on IOT and Sensor Sensitivity Validation**. [s.l: s.n.]. v. 4

MUPPALLA, A. R. et al. Design and Implementation of IoT Solution for Air Pollution Monitoring. **Proceedings of the 2019 IEEE Recent Advances in Geoscience and Remote Sensing: Technologies, Standards and Applications, TENGARSS 2019**, p. 45–48, 2019.

OMS, O. M. DA S. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**. [s.l: s.n.].

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Diretrizes globais de qualidade do ar da OMS: partículas inaláveis (MP_{2,5} e MP₁₀), ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e monóxido de carbono. Resumo executivo**. [s.l: s.n.].

PLANTOWER. PMS7003 - Dust sensor module. p. 15, 2016.

QIAN, D.; PANG, Z.; O'NEILL, Z. **Evaluation of Low-cost Particulate Matter (PM) Sensors: A Preliminary Investigation**. ASHRAE 2018 Annual Conference. **Anais...**2018.

SENSIRION. Sensor Specification Statement. How to Understand Specifications of Sensirion Particulate Matter Sensors. **The Sensirion Company**, v. 1, n. March 2020, p. 9, 2020.

SIRA CERTIFICATION SERVICE. **PRODUCT CONFORMITY CERTIFICATE**. n. 8, p. 1–5, 2021.

SOUZA, L.; BORGES, S. **Monitoramento Da Qualidade Do Ar – Diagnóstico Das Tecnologias E Da Rede De Monitoramento Da Região**

Metropolitana Do Rio De Janeiro Air Quality Monitoring - Diagnosis of the Technologies and the Monitoring Network of the Metropolitan Region of Rio. p. 73–86, 2019.

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, 2020.

TRILLES, S. et al. Reliability validation of a low-cost particulate matter IoT sensor in indoor and outdoor environments using a reference sampler. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 24, 1 dez. 2019.

VORMITTAG, E. D. M. P. A. D. A. et al. Análise do monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Estudos Avancados**, v. 35, n. 102, p. 7–30, 2021.

ZHANG, H.; SRINIVASAN, R. **A systematic review of air quality sensors, guidelines, and measurement studies for indoor air quality management** **Sustainability (Switzerland)**, 2020.

ZIMMERMAN, N. Tutorial: Guidelines for implementing low-cost sensor networks for aerosol monitoring. **Journal of Aerosol Science**, v. 159, 2022.