



**XVIII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR**  
São Paulo Expo – 13 à 15 de setembro de 2023

## **AVALIAÇÃO DE SENSORES DE MATERIAL PARTICULADO DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÕES EM SISTEMAS DE VENTILAÇÃO**

### **PAPER 87**

#### **RESUMO**

O material particulado (MP) é um dos poluentes mais críticos que afetam a qualidade do ar interno (QAI). Portanto, é fundamental reduzir a exposição dos ocupantes à poluição por MP em ambientes internos. Os sistemas de ventilação para edifícios comerciais e residenciais são fundamentais para atingir esse objetivo. Os desenvolvimentos atuais em microeletrônica digital disponibilizam uma variedade cada vez maior de sensores de MP de baixo custo. Esses dispositivos funcionam com base no princípio da dispersão da luz e abrem novas possibilidades para medir e avaliar a concentração de partículas em ambientes internos. Os mais baratos são unidades simples integradas a produtos de consumo para medir a concentração de MP no ar parado ou com baixa velocidade. O custo destes sensores os torna atraentes também para avaliar a concentração de MP de forma econômica ao longo dos dutos de ventilação. A combinação dessas unidades com equipamentos eletrônicos dedicados baratos possibilita a transmissão dos dados medidos e o desenvolvimento de aplicativos da "Internet das Coisas" (em inglês, Internet of Things, ou IoT). A disponibilidade da concentração de partículas em tempo real poderia permitir ações de controle automatizadas em edifícios inteligentes para minimizar a poluição por MP em ambientes internos. Além disso, os dados obtidos com esses sensores também são úteis para avaliar o desempenho dos componentes dos sistemas de ventilação durante sua operação. Para avaliar o uso potencial de sensores de MP de baixo custo em dutos de ventilação, testamos duas amostras de três tipos diferentes desses sensores em um duto de teste, estudando sua resposta em diferentes condições controladas. Avaliamos o impacto da concentração de partículas, diferentes fontes de MP (aerossol sintético e atmosférico) e taxas de vazão de ar. Apresentamos e discutimos os dados experimentais obtidos nesse estudo e a correlação com os dados medidos de concentração de massa de MP fornecidos por outros dois instrumentos de laboratório usados como referência.

**Palavras-chave:** Sensores de baixo custo, Material particulado, Qualidade do ar interno, Poluição do ar

#### **ABSTRACT**

Particulate matter (PM) is one of the most critical pollutants affecting indoor air quality (IAQ). Hence, reducing occupants' exposure to indoor PM pollution is highly desirable. Ventilation systems for commercial and residential buildings are instrumental in achieving this goal. Current developments in digital micro-electronics make available an increasing variety of low-cost PM sensors. These devices work on the principle of light scattering and open new possibilities for measuring and assessing indoor particle concentration. The least expensive ones are bare units integrated into consumer-grade products to measure PM concentration in still air. Their cost makes them also appealing for evaluating the PM concentration inexpensively along ventilation ducts. Combining them with cheap dedicated electronic equipment makes

transmitting measured data and developing Internet of Things applications possible. The availability of real-time particle concentration could allow automated control actions in intelligent buildings to minimize indoor PM pollution. Moreover, the data obtained from these sensors are also helpful for assessing the performance of ventilation systems components during their operation. To evaluate the potential use of low-cost PM sensors in ventilation ducts, we tested two samples of three different types of those sensors in a test duct studying their response in various controlled conditions. We evaluated the impact of particle concentration, different PM sources (synthetic aerosol and atmospheric one), and airflow rates. We present and discuss the experimental data obtained from this study and the correlation with PM mass concentration measured data provided by the other two laboratory instruments used as a reference.

Keywords: Low-cost sensors, Particulate matter, Indoor air quality, Air pollution

## 1 INTRODUÇÃO

O poluente interno mais importante para a saúde humana em edifícios residenciais e comerciais é o material particulado (MP) transportado pelo ar, de acordo com um número crescente de estudos (CHEN et al., 2012; JI; ZHAO, B. 2015; LOGUE et al., 2012). A redução da exposição ao MP em ambientes fechados pode proporcionar benefícios substanciais para a saúde e para a economia (BEKÖ et al., 2008; CHAN et al., 2015; MONTGOMERY et al., 2015; ZHAO, D. et al., 2015). A capacidade de medir e conhecer as concentrações de partículas em ambientes fechados traz vários benefícios. Por exemplo, o feedback em tempo real sobre as concentrações de MP em ambientes internos pode ser um meio eficaz de aumentar os comportamentos para reduzir as fontes internas (KLEPEIS et al., 2013). As medições em tempo real do MP interno combinadas com outros parâmetros que influenciam a qualidade do ambiente interno e a ocupação e atividade humana com sistemas inteligentes de automação e controle de edifícios podem adaptar a operação do edifício para economizar energia e melhorar a qualidade do ar interno (QAI) (BUSHBY, 1997; RACKES; WARING, 2013, 2014; SNOONIAN, 2003; P. ZHAO, P. et al., 2013). No entanto, as concentrações de PM no ar têm sido raramente medidas em edifícios devido aos custos significativos dos equipamentos envolvidos (HEINZERLING et al., 2013).

A disponibilidade de uma ampla variedade de monitores portáteis de poluição do ar, incluindo muitos sensores de PM de baixo custo disponíveis no mercado, muda essa situação (PIEDRAHITA et al., 2014; SNYDER et al., 2013; WANG et al., 2015; WILLIAMS et al., 2014). No entanto, ainda há desafios quanto à possibilidade de usar sensores de MP de baixo custo para medir a concentração de partículas em dutos de ventilação ou dentro de unidades de tratamento de ar. Os fabricantes desses dispositivos os projetaram para medir a concentração de MP no ar parado. Estudamos o comportamento de três modelos diferentes de sensores de MP de baixo custo operando em um fluxo de ar para avaliar seu potencial e quais adaptações poderiam ser necessárias para implantá-los amplamente também dentro de sistemas HVAC. Essa possibilidade é interessante porque a eficácia dos sistemas de

limpeza do ar e a redução de MP obtida com seu uso poderiam ser avaliadas com muito mais facilidade se instrumentos de medição baratos, capazes de transmitir os dados remotamente, pudessem ser incluídos como um dispositivo de rotina. A eficiência real dos sistemas de filtragem de ar durante sua operação, obviamente, tornou-se ainda mais crítica devido à pandemia da Covid-19.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Sensores de MP de baixo custo

Comparamos três tipos diferentes de sensores de MP de baixo custo, usando duas amostras de cada um deles. Tabela 1 resume suas características. Todos os modelos testados destinam-se principalmente a medir a concentração de massa de PM em ar parado e funcionam com um princípio operacional semelhante. Um fluxo de amostra de ar é puxado através de uma câmara óptica incorporada aos sensores. As partículas no fluxo de ar dispersam a luz emitida por uma fonte de luz. A intensidade da luz dispersa é proporcional às características (número de partículas, tamanho e índice de refração) do aerossol e é detectada por um fotodiodo que gera um sinal pulsante, que é então processado por um microcontrolador. Algoritmos proprietários baseados na teoria de Mie (LI, 2019) geram a saída do sensor.

Tabela 1 - Características dos sensores estudados

	<b>Sensor A</b>	<b>Sensor B</b>	<b>Sensor C</b>
Fonte de luz	Diodo laser	Diodo laser	Diodo emissor de infravermelho
Resolução	8 bit	8 bit	N/A
Tensão de alimentação [V]	5 ± 0.3	5 ± 0.5	5 ± 0.5
Corrente de alimentação [mA]	70 ± 10	<80	<20
Dimensões [mm]	70x71x23	41 x 41 x 12	46 x 34 x 17.6
Faixa de concentração de massa [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	0 – 999.9	0 - 1000	0 - 580
Menor tamanho de partícula detectável [ $\mu\text{m}$ ]	0.3	0.3	N/A

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os sensores A e B fornecem uma saída digital com as concentrações de massa de PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub>. O sensor B também fornece a concentração de massa para PM<sub>1</sub> e PM<sub>4</sub>, a contagem de partículas em quatro faixas de tamanho diferentes e o tamanho médio das partículas. Diferentemente dos sensores mencionados acima, o sensor C fornece um sinal analógico (tensão), que é proporcional à

concentração total de massa de partículas.

Usamos dois módulos eletrônicos idênticos baseados em uma unidade de microcontrolador ESP-32 para obter os dados de todos os três sensores simultaneamente. Os sensores A e B foram conectados à placa ESP-32 usando um protocolo de comunicação UART (receptor/transmissor assíncrono universal), enquanto a saída do sensor C foi obtida usando o conversor analógico-digital dedicado do ESP-32, com uma resolução de 12 bits. Os dados digitais do sensor C foram então convertidos em valores de concentração de massa de partículas seguindo o procedimento fornecido pelo fabricante.

As placas foram programadas para ler os sensores a cada segundo e enviá-los por meio de comunicação serial a um programa emulador de terminal executado em um computador pessoal (PC). O programa registrava os dados em um arquivo de texto armazenado no disco rígido local. Salvamos um registro de dados separado para cada módulo sensor durante cada um dos testes realizados.

## 2.2 Instrumentos de referência e aerossóis de teste

Utilizamos dois instrumentos de laboratório de nível de pesquisa como referências. Usamos um TSI OPS 3330 como referência primária para as medições de  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$ . Sua faixa de medição está entre  $0,3 \mu m$  e  $10,0 \mu m$  de tamanho de partícula e foi configurada para usar 12 canais de tamanho. Além disso, um PMS LAS X-II também foi usado como referência apenas para medições de  $PM_{2,5}$ . Sua faixa de medição está entre  $0,09 \mu m$  e  $7,5 \mu m$ , e sua faixa de tamanho foi dividida em 18 compartimentos de tamanho igualmente espaçados em uma escala logarítmica. Vamos nos referir a esses dois instrumentos como Ref1 e Ref2, respectivamente.

Ambos os instrumentos de referência fornecem contagens de partículas por canal como saída bruta. Essas informações são usadas para determinar a concentração ponderada em massa por canal, supondo que o aerossol medido seja feito de partículas esféricas com densidade constante, usando a equação (GÖRNER et al., 2012)

$$m = \rho \frac{\pi D_{pv}^3 c}{6tQ} \phi \quad (1)$$

onde o diâmetro de partícula ponderado por volume para cada canal é dado por

$$D_{pv} = LB \left[ \frac{1}{4} \left( 1 + \left( \frac{UB}{LB} \right)^2 \right) \left( 1 + \left( \frac{UB}{LB} \right) \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

A concentração de massa total de PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> foi obtida como a soma das concentrações ponderadas em massa para todos os canais com tamanhos de partículas inferiores ou iguais a 2,5 µm e 10 µm, respectivamente.

### 2.3 Testes de laboratório

A Figura 1 mostra o esquema da configuração do laboratório. Usamos um equipamento de teste para filtros de ar em conformidade com a ISO 16890-2 (2016) para simular as condições dentro de um duto de ventilação. A entrada de ar externo identificada como Inlet 2 está localizada a aproximadamente 11 m acima do nível do solo e a aproximadamente 90 m de distância do tráfego rodoviário. Os módulos sensores foram instalados no interior do duto de teste conectados à sonda de amostragem isocinética (TSI 1130011) usada com o Ref1, conforme mostrado na Figura 2. Uma segunda sonda de amostragem isocinética idêntica foi instalada 3,3 m a jusante e conectada ao Ref2. Ambas as sondas foram colocadas no plano médio do duto de teste, de modo que os instrumentos coletaram amostras do fluxo de ar a partir de sua linha central. Os instrumentos de referência foram conectados às sondas de amostragem usando mangueiras condutoras de silicone para evitar a perda de partículas devido a cargas eletrostáticas. Durante os primeiros 17 testes de curta duração, os sensores foram colocados em uma caixa de proteção. No restante dos testes, nós os expusemos diretamente ao fluxo de ar. Não encontramos diferenças significativas entre os resultados obtidos com e sem a caixa. Portanto, não discutimos mais esse aspecto.

A Tabela 2 resume as condições de teste usadas em nosso estudo. A parte inicial consistiu em testes curtos com duração entre 300 s e 8 h para avaliar a resposta dos sensores sob diferentes concentrações de partículas usando o aerossol sintético sebacato de di-etil-hexila (em inglês Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate ou DEHS) e o aerossol atmosférico no ar externo.

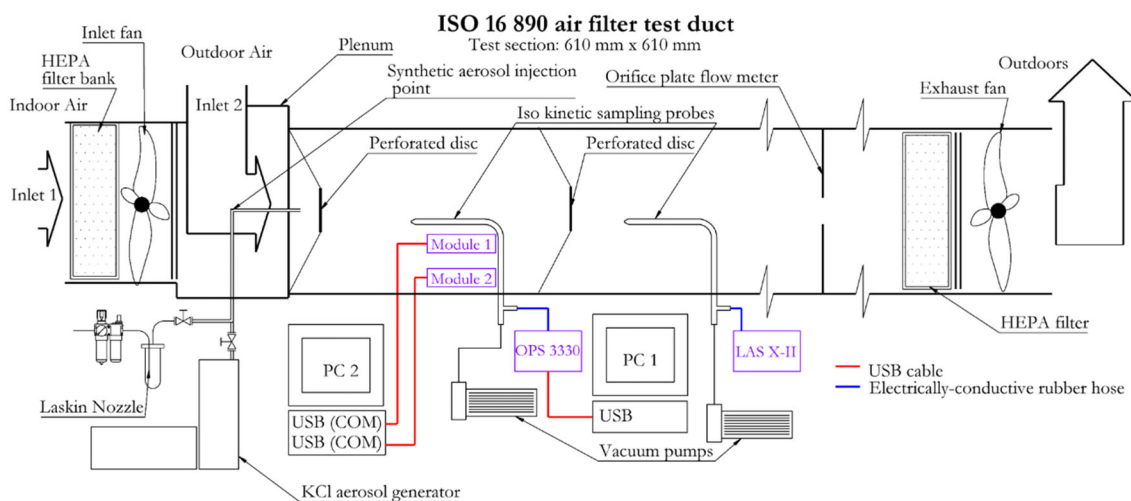
Tabela 2 - Condições de teste estudadas

Velocidade do ar no duto de teste [m/s] - [pés/min]	Concentrações de massa total média medidas com Ref1 [µg/m <sup>3</sup> ]	Tipo de aerossol de teste	Temperatura [°C]	Umidade relativa [%]
0.50 – 98.4	33	DEHS	22	39
0.75 – 147.6	8/23/30/50/80/111/123/310	DEHS	22	30-39
0.75 – 147.6	14/48	Ar externo	20	37
0.00 – 0.00	13.8	Ar externo	20	38
1.50 – 295.3	7-45	Ar externo	21-23	30
2.50 – 492.1	6 - 45	Ar externo	14-21	22-38

Fonte: Elaborado pelos autores.

O aerossol DEHS foi gerado usando um bico de Laskin alimentado com ar comprimido isento de óleo. Variamos a pressão do ar comprimido para controlar a concentração de massa de partículas dentro do duto de teste. A uniformidade da concentração de aerossol de DEHS na seção de teste foi verificada antes de seguir o protocolo descrito pela norma ISO 16890-2:2016.

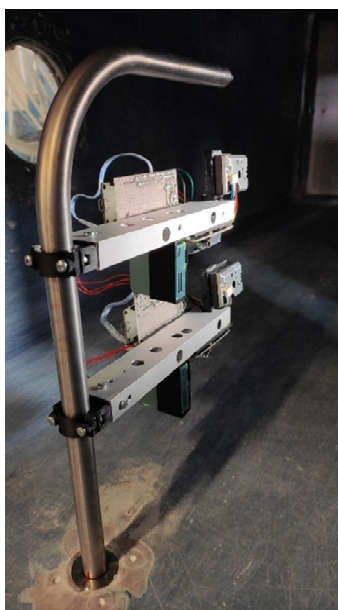
Figura 1 - Configuração de laboratório usada para a caracterização dos sensores.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os testes curtos foram realizados com taxas de fluxo de ar iguais a 670 m<sup>3</sup>/h e 1.000 m<sup>3</sup>/h, o que corresponde a baixas velocidades de ar (0,50 m/s e 0,75 m/s, respectivamente) recomendadas pelos fabricantes dos sensores A e B. Ao usar o aerossol DEHS, o ar interno foi extraído da entrada 1 por meio do banco de filtros de ar particulado de alta eficiência (HEPA) mostrado na Figura 1. A velocidade de rotação dos ventiladores foi ajustada para atingir a taxa de fluxo de ar desejada, mantendo o duto em uma pressão mais alta do que a da sala. Essa configuração garantiu que apenas partículas DEHS com uma concentração estável estivessem presentes no duto de teste durante os experimentos. A concentração de massa de referência foi obtida da Ref1, considerando uma densidade de partículas de 0,912 g/cm<sup>3</sup> para partículas DEHS (norma ISO 16890-2:2016).

Figura 2 - Sonda de amostragem isocinética a montante da Ref1 e os sensores testados apoiados a ela



Fonte: Elaborado pelos autores.

Foi feito um teste adicional usando ar externo parado, realizando uma purga prévia extraindo ar da Inlet 2, ligando o ventilador do equipamento de teste a jusante por alguns minutos e, em seguida, realizando o teste sem nenhuma taxa de fluxo imposta. Para obter a concentração de massa do ar externo, assumimos uma densidade de partículas de  $1,65 \text{ g/cm}^3$ . Weijers et al. (2004), com base no estudo de Tuch et al. (2000), propuseram esse valor de densidade. Tittarelli et al. (2008) também o utilizaram para estimar a concentração de massa de partículas no ar externo da cidade de Turim, Itália, usando um espectrômetro de partículas.

Após os testes preliminares, realizamos os experimentos com taxas de fluxo de ar mais altas ( $2000$  e  $3400 \text{ m}^3/\text{h}$ ) durante períodos mais longos (20 min, 1 h, 60 h e 88 h) usando ar externo não filtrado para estudar o desempenho dos sensores em condições operacionais como as de um duto de ventilação.

Em todos os testes, controlamos a velocidade de rotação dos ventiladores por meio de um circuito lógico programável (PLC) para manter uma taxa de fluxo de ar constante, independentemente das condições ambientais, como umidade relativa e temperatura. A taxa de fluxo de amostragem do Ref1 foi constante ( $1 \text{ l/min}$ ) em todos os testes. No caso do Ref2, as taxas de fluxo de amostragem de  $95$  e  $10 \text{ cm}^3/\text{min}$  foram usadas na amostragem do aerossol DEHS e do ar externo, respectivamente.

### **3 RESULTADOS**

Apresentamos os resultados gerais dos testes de curta duração com concentração constante de aerossol DEHS, comparando a resposta dos sensores de PM de baixo custo e nossos instrumentos de referência. Em seguida, apresentamos os resultados dos testes que simulam a operação dentro de um duto de ventilação com taxas de fluxo de ar constantes.

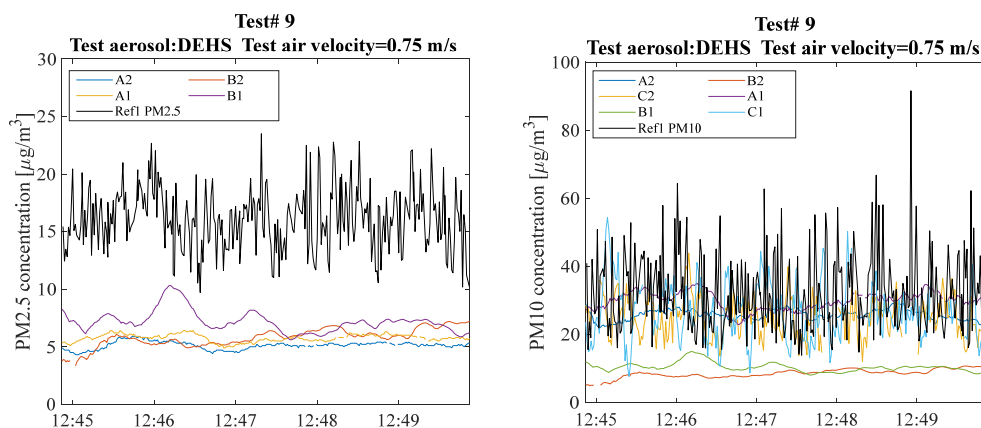
#### **3.1 Testes de aerossol sintético em concentrações constantes de massa de partículas**

A Figura 3 mostra um exemplo dos dados coletados durante os testes curtos usando concentrações estáveis de aerossol DEHS.

Determinamos a concentração média de massa obtida por cada sensor para cada teste como a média aritmética dos pontos de dados coletados durante o teste. Todos os pontos de dados com mais de três desvios padrão de diferença em relação ao valor médio medido não foram considerados nos cálculos. Em seguida, comparamos as concentrações médias de massa obtidas de cada sensor com a saída de concentração média de massa da Ref1. Fizemos uma distinção entre os resultados de  $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$  para considerar os canais dedicados nos sensores dos tipos A e B separadamente. A saída dos sensores C foi comparada somente com os valores de concentração de massa de  $\text{PM}_{10}$  do Ref1 porque não detectamos partículas

maiores que 10  $\mu\text{m}$ .

Figura 3 - Dados de concentração de massa de PM coletados dos sensores de PM de baixo custo e calculados a partir dos instrumentos de referência durante testes curtos usando concentrações estáveis de aerossol DEHS em baixa velocidade do ar de teste (0,75 m/s).



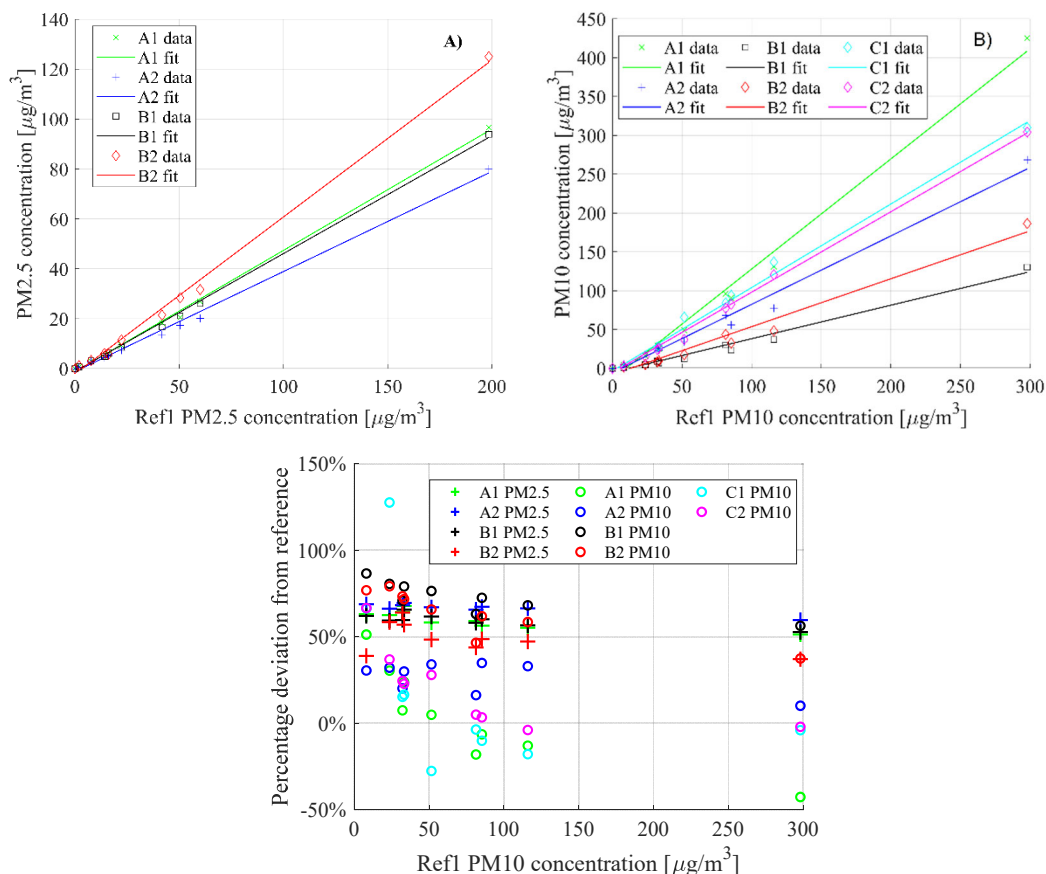
Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 4 mostra os ajustes de regressão linear para os dados de  $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$  dos sensores e os erros percentuais como uma função da concentração de massa de  $\text{PM}_{10}$  obtida da saída do dispositivo de referência. Em geral, com o aerossol DEHS, os sensores apresentaram valores de concentração de massa mais baixos do que o instrumento de referência. No entanto, eles demonstraram uma boa correlação linear com o Ref1. Apesar disso, a distribuição dos erros percentuais mostrados na Figura 4c) indica que um ajuste linear pode não ser adequado para calibrar as leituras de  $\text{PM}_{10}$  dos sensores A1, C1 e C2, especialmente quando as concentrações de massa mudam em uma ampla faixa de valores. Isso ocorre porque o desvio percentual da referência de suas leituras de  $\text{PM}_{10}$  mudou significativamente na faixa de concentrações estudadas.

A Tabela 3 contém os parâmetros da regressão linear das leituras de  $\text{PM}_{2,5}$  e  $\text{PM}_{10}$  dos sensores de PM de baixo custo e os obtidos na Ref1. O coeficiente de determinação ajustado (KOTZ et al., 2006) também é fornecido como um indicador da qualidade do ajuste linear. Para os tipos de sensores A e B, as medições de  $\text{PM}_{2,5}$  apresentaram uma correlação linear mais significativa com os dados de referência do que as de  $\text{PM}_{10}$ . Também podemos observar pequenas diferenças entre dois sensores do mesmo modelo. Elas são evidentes nas mudanças de inclinação e interceptação das linhas de regressão linear.



Figura 4 - Valores médios de concentração de massa de partículas obtidos dos sensores de PM de baixo custo e da Ref1 dos testes com aerossol DEHS. a) Leituras de concentração de massa de PM<sub>2,5</sub> dos sensores de PM de baixo custo em função da concentração de PM<sub>2,5</sub> do dispositivo de referência. b) Leituras de concentração de massa de PM<sub>10</sub> dos sensores de PM de baixo custo em função da concentração de PM<sub>10</sub> do dispositivo de referência. c) Porcentagem de desvio das leituras do sensor em relação à referência plotada contra os valores de concentração de massa de PM<sub>10</sub> obtidos da Ref1. Observe as diferentes escalas do eixo y.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste linear dos sensores de baixo custo comparados com Ref1 na medição com DEHS

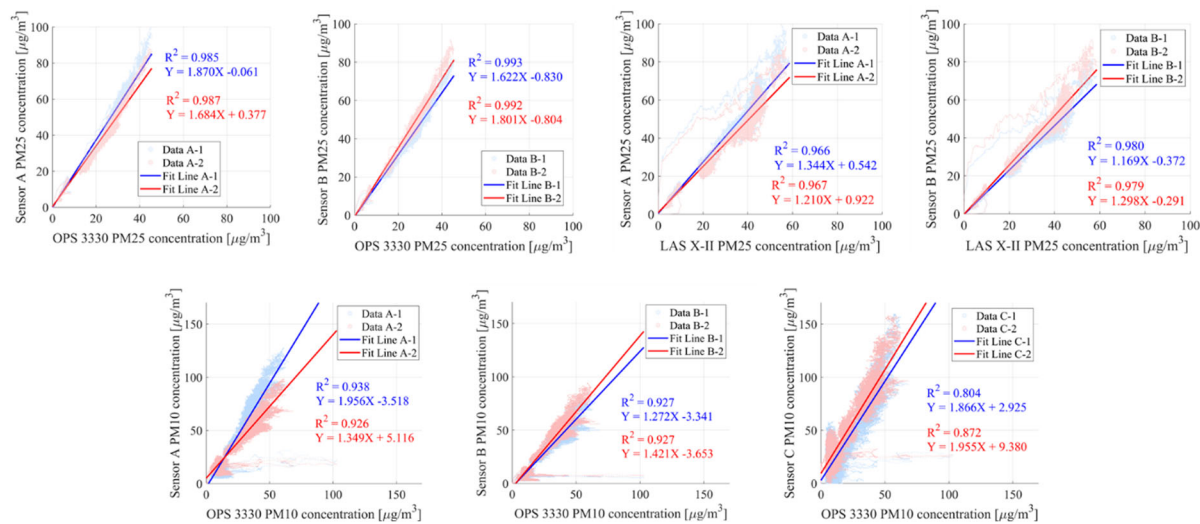
Sensor	Interceptação	PM <sub>2,5</sub> Inclinação	R <sup>2</sup>	Interceptação	PM <sub>2,5</sub> Inclinação	R <sup>2</sup>
A1	-1.262	0.486	0.997	-13.841	1.418	0.988
A2	-1.197	0.401	0.995	-5.693	0.881	0.985
B1	-1.122	0.472	0.998	-4.998	0.431	0.978
B2	-2.111	0.629	0.996	-8.072	0.617	0.972
C1	-	-	-	-3.531	1.076	0.983
C2	-	-	-	-5.505	1.036	0.996

Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.2 Simulação das condições de trabalho dentro de um duto de ventilação

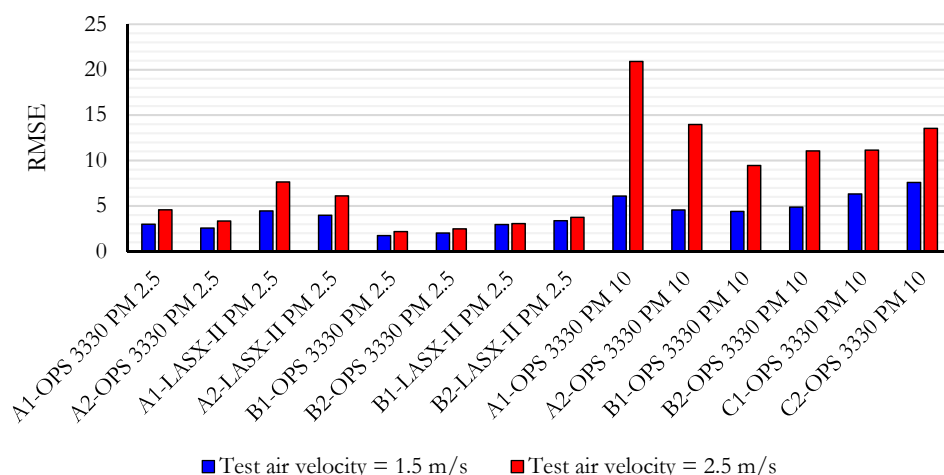
Os testes realizados com ar externo extraído da Inlet 2 do equipamento de teste mostraram um comportamento diferente do sensor em comparação com os testes que usaram o aerossol DEHS. Nesse caso, os sensores de baixo custo superestimaram a concentração de PM para Ref1 e Ref2.

Figura 5 - Correlação entre as concentrações medidas com sensores de baixo custo e instrumentos de referência, parâmetros de ajuste linear para PM<sub>2,5</sub> e PM<sub>10</sub> medidos do ar externo a 1,5 m/s



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6 - Erro quadrático médio [%] (RMSE) das concentrações de massa de partículas medidas com os sensores testados em relação aos instrumentos de referência sob duas velocidades de ar de teste diferentes



Fonte: Elaborado pelos autores.

## 4 DISCUSSÃO

A detecção do sensor de MP se baseia na luz dispersa medida causada pelas partículas que atravessam um raio de luz, de modo que ele fornece uma medição indireta da concentração de massa de partículas.

A comparação do comportamento dos sensores de MP de baixo custo com instrumentos de referência que utilizam um DEHS ou um aerossol atmosférico leva a conclusões diferentes. A diferença entre a subestimação e a superestimação, respectivamente, da concentração de massa de partículas pode ser provavelmente associada ao algoritmo que converte o sinal medido em uma concentração de massa de partículas. Esse algoritmo é escolhido pelo fabricante do sensor e é influenciado pelo índice de refração e pela densidade dos aerossóis usados durante o projeto e a calibração dos sensores de MP de baixo custo.

A maneira mais direta de comparar as medições fornecidas pelos sensores de MP de baixo custo e os instrumentos de referência é a análise dos parâmetros das estatísticas de regressão linear. Em nosso caso, os valores de  $R^2$  estavam entre 0,804 e 0,996. Portanto, a relação entre as medições é linear e direta. A inclinação da regressão linear representa a superestimação ou subestimação da medição. Por exemplo, valores maiores que um significam superestimação, e valores menores que um significam subestimação.

O teste realizado com aerossol sintético mostrou uma correlação linear entre as medições fornecidas pelos sensores de PM de baixo custo e os instrumentos de referência, tanto para  $PM_{2,5}$  quanto para  $PM_{10}$ . Com relação à concentração absoluta de massa de partículas, os sensores de PM de baixo custo forneceram medições mais baixas de concentração de massa de partículas de  $PM_{2,5}$ . Em contrapartida, não há uma tendência clara para as medições de  $PM_{10}$ .

Os testes realizados com ar externo (aerossol atmosférico) mostraram uma superestimação consistente da concentração de massa medida em toda a faixa de tamanho de partícula com ambas as velocidades de ar testadas.

A relação entre a velocidade do fluxo de ar e a velocidade do ar de amostragem, a turbulência e a posição, a forma, o tamanho e a orientação da entrada podem influenciar a eficiência da amostragem do instrumento de medição de aerossol (KULKARNI et al., 2011). A mudança na eficiência da amostragem aumenta com velocidades mais altas do fluxo de ar e pode causar maiores imprecisões nas concentrações medidas nesse caso. Quanto maior a velocidade do fluxo de ar, maior é a diferença entre os sensores de PM de baixo custo e os instrumentos de referência. Essa diferença é ainda maior nas medições de  $PM_{10}$ , para as quais as condições isocinéticas são importantes.

## 5 CONCLUSÕES

Os dados obtidos com esse estudo mostraram que os sensores de MP de baixo custo fornecem dados mais confiáveis de  $PM_{2,5}$  do que de  $PM_{10}$ , especialmente se a velocidade do ar for superior a 1 m/s. Apesar da recomendação do fabricante sobre a velocidade máxima do ar para sua operação, os sensores de MP de baixo custo testados podem ser usados em dutos de ventilação, fornecendo dados razoavelmente confiáveis. Os valores de concentração de massa de partículas medidos não são tão precisos quanto os fornecidos pelos instrumentos de referência. No entanto, é possível realizar um procedimento de calibração adicional, alterando as propriedades da amostra de MP para cada aplicação específica ou por meio de medições em laboratório.

Os sensores de PM de baixo custo são muito convenientes para detectar níveis altos e perigosos de concentrações de PM. Eles também podem avaliar o desempenho da filtragem de filtros de partículas em condições operacionais. Seu baixo preço e a capacidade de serem facilmente adaptados a um sistema de aquisição de dados os tornam uma boa opção de valor para avaliação e gerenciamento do sistema de ventilação. De fato, para avaliar o desempenho dos filtros de ar, é essencial fornecer uma relação confiável entre a concentração de partículas a montante e a jusante do banco de filtros. Para medir a eficiência do filtro, o que mais importa é a taxa de redução da concentração de partículas, e não os valores absolutos das concentrações de partículas. A velocidade do ar pode afetar muito os dados fornecidos por sensores de PM de baixo custo. Portanto, esses sensores podem ser usados de forma confiável para avaliar a eficiência da filtragem somente quando as velocidades do ar a montante e a jusante forem suficientemente próximas.

São necessários mais estudos para comparar a eficiência do filtro de ar medida com sensores de PM de baixo custo e instrumentos de laboratório.

## 7 NOMENCLATURA

$PM_x$	=	material particulado (MP) com dimensões inferiores ou iguais a X em $\mu\text{m}$ .
m	=	concentração ponderada em massa por canal.
$\rho$	=	densidade de partículas.
$D_{pv}$	=	diâmetro de partícula ponderado por volume.
LB	=	limite inferior do canal.
UB	=	limite superior do canal.
c	=	contagens de partículas por canal.
t	=	tempo de amostragem.
Q	=	vazão da amostra.
$\phi$	=	fator de diluição.
$R^2$	=	coeficiente de determinação.
$\hat{R}^2$	=	coeficiente de determinação ajustado.

## REFERÊNCIAS

BEKÖ, G.; CLAUSEN, G.; WESCHLER, C. J. Is the use of particle air filtration justified? Costs and benefits of filtration with regard to health effects, building cleaning and occupant productivity. *Building and Environment*, v. 43, n. 10, p.1647–1657, 2008.

BUSHBY, S. T. BACnet™: a standard communication infrastructure for intelligent buildings. *Automation in Construction*, v. 6, n. 5–6, p. 529–540, 1997.

CHAN, W. R.; PARTHASARATHY, S.; FISK, W. J.; MACKONE, T.E. Estimated effect of ventilation and filtration on chronic health risks in U.S. offices, schools, and retail stores. *Indoor Air*, v. 26 n. 2, p. 331–343, 2015.

CHEN, C.; ZHAO, B.; WESCHLER, C. J. Indoor exposure to “outdoor PM10”: Assessing its influence on the relationship between PM10 and short-term mortality in U.S. cities. *Epidemiology (Cambridge, Mass)*, v. 23, n. 6, p. 870–878, 2012.

GÖRNER, P.; SIMON, X.; BÉMER, D.; LIDÉN, G. Workspace aerosol mass concentration measurement using particle counters. *Journal of Environmental Monitoring*, v. 14, p. 420–428, 2012.

HEINZERLING, D.; SCHIAVON, S.; WEBSTER, T.; ARENS, E. Indoor environmental quality assessment models: A literature review and a proposed weighting and classification scheme. *Building and Environment*, v. 70, p. 210–222, 2013.

Ji, W.; ZHAO, B. Estimating Mortality Derived from Indoor Exposure to Particles of Outdoor Origin. *Plos One*, v. 10, n. 4, 2015.

KLEPEIS, N. E.; HUGHES, S. C.; EDWARDS, R. D.; ALLEN, T.; JOHNSON, M.; SMITH, K. R.; BOMAN-DAVIS, M.; BELLETTIERE, J.; HOVELL, M. F. Promoting Smoke-Free Homes: A Novel Behavioral Intervention Using Real-Time Audio-Visual Feedback on Airborne Particle Levels. *Plos One*, v. 8, n. 8, 2013.

KOTZ S. *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Wiley. 2. ed, 2006.

KULKARNI P.; BARON P. A.; WILLEKE K. (2011). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc, 3 ed, 2011.

LI, J. (2019). Recent advances in low-cost particulate matter sensor: calibration and application. Washington University in St. Louis.

LOGUE, J. M.; PRICE, P. N.; SHERMAN, M. H., SINGER, B. C. A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants. *Environmental Health Perspectives*, v. 120, n. 2, p. 216–222, 2012.

MONTGOMERY, J. F.; GREEN, S. I.; ROGAK, S. N. Impact of relative humidity on HVAC filters loaded with hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Aerosol Science and Technology*, v. 49, n. 5, p. 322–331, 2015.

PIEDRAHITA, R.; XIANG, Y.; MASSON, N.; ORTEGA, J.; COLLIER, A.; JIANG, Y.; LI, K.; DICK, R. P.; LV, Q; HANNIGAN, M.; SHANG, L. The next generation of low-cost personal air

quality sensors for quantitative exposure monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 7, n. 10, p. 3325–3336, 2014.

RACKES, A.; WARING, M. S. Modeling impacts of dynamic ventilation strategies on indoor air quality of offices in six US cities. *Building and Environment*, v. 60, p. 243–253, 2013.

RACKES, A.; WARING, M. S. (2014). Using multiobjective optimizations to discover dynamic building ventilation strategies that can improve indoor air quality and reduce energy use. *Energy & Buildings*, v. 75, p. 272–280.

SNOONIAN, D. Smart Buildings. *IEEE Spectrum*, p. 18–23, 2003.

SNYDER, E. G.; WATKINS, T. H.; SOLOMON, P. A.; THOMA, E. D.; WILLIAMS, R. W.; HAGLER, G. S. W.; SHELOW, D.; HINDIN, D. A.; KILARU, V. J.; PREUSS, P. W. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. *Environmental Science and Technology*, v. 47, p. 11369–11377, 2013.

TITTARELLI, A.; BORGINI, A.; BERTOLDI, M.; SAEGER, E. D.; RUPRECHT, A.; STEFANONI, R.; TAGLIABUE, G.; CONTIERO, P.; CROSIGNANI, P. Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter. *Atmospheric Environment*, v. 42, n. 36, p. 8543–8548, 2008.

TUCH, T., MIRME, A., TAMM, E., HEINRICH, J., HEYDER, J., BRAND, P., ROTH, C., WICHMANN, H. E., PEKKANEN, J., KREYLING, W. G. Comparison of two particle-size spectrometers for ambient aerosol measurements. *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 139–149, 2000.

WANG, Y.; LI, J.; JING, H.; ZHANG, Q.; JIANG, J.; BISWAS, P. Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement. *Aerosol Science and Technology*, v. 49, n. 11, p. 1063–1077, 2015.

WEIJERS, E. P.; KHLYSTOV, A. Y.; KOS, G. P. A.; ERISMAN, J. W. Variability of particulate matter concentrations along roads and motorways determined by a moving measurement unit. *Atmospheric Environment*, v. 38, p. 2993–3002, 2004.

WILLIAMS, R.; KAUFMAN, A.; HANLEY, T.; RICE, J.; GARVAY, S. Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors (EPA/600/R-14/464 (NTIS PB 2015-102104)), 2014.

ZHAO, D.; AZIMI, P.; STEPHENS, B. Evaluating the Long-Term Health and Economic Impacts of Central Residential Air Filtration for Reducing Premature Mortality Associated with Indoor Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) of Outdoor Origin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 12, p. 8448–8479, 2015.

ZHAO, P.; MEMBER, S.; SURYANARAYANAN, S.; MEMBER, S.; SIMÕES, M. G.; MEMBER, S. An Energy Management System for Building Structures Using a Multi-Agent Decision-Making Control Methodology. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, v. 49, n. 1, p. 322–330, 2013.