

Uso Integrado de Sensores de Baixo Custo para Fortalecer a Gestão da Qualidade do Ar







Agradecimentos

Coautores e Principais Colaboradores

Meenakshi Kushwaha, ILK Labs, Índia
Sumi Mehta, Vital Strategies, Estados Unidos
Pooja Arora, The Energy and Resources Institute, Índia
Timothy Dye, TD Environmental Services
Thomas Matte, Vital Strategies, Estados Unidos

Revisores Externos

Joshua Apte, University of Texas, EUA
Solomon Teffera, SolTeff Environmental Consulting, USA
Sachchida Tripathi, IIT Kanpur, Índia

Os autores e colaboradores deste guia agradecem às partes interessadas e parceiros do governo e da sociedade civil que forneceram informações e insights inestimáveis durante um intercâmbio técnico virtual de dois dias realizado em dezembro de 2020. A lista completa de participantes encontra-se nos Anexos deste documento. Essas interações foram usadas para delimitar o conteúdo deste compêndio.

Esta publicação contou com apoio financeiro da Bloomberg Philanthropies.

Vital Strategies. Uso Integrado de Sensores de Baixo Custo para Fortalecer a Gestão da Qualidade do Ar. Meenakshi Kushwaha, Sumi Mehta, Pooja Arora, Timothy Dye, Thomas Matte. New York, NY, 2022. Disponível em: <https://www.vitalstrategies.org/resources/integrated-use-of-low-cost-sensors-to-strengthen-air-quality-management/>

Este artigo é distribuído de acordo sob os termos da Licença Creative Commons Attribution NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. Para acessar uma cópia dessa licença, visite o site <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> ou envie uma carta à Creative Commons, P.O. Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA. O conteúdo deste documento pode ser usado livremente nos termos desta licença, desde que o material seja acompanhado da seguinte atribuição: “Uso Integrado de Sensores de Baixo Custo para Fortalecer a Gestão da Qualidade do Ar”. New York, NY; 2022. Copyright ©Vital Strategies



Sumário

Antecedentes e Visão Geral	2	Desenho de Redes de SBCs e Posicionamento dos Sensores	16
Aplicação de Sensores de Baixo Custo (SBC) em programas integrais de gestão de qualidade do ar e sistemas de monitoramento robustos e integrados	3	Escolha do Local de Instalação	16
Possíveis Aplicações de SBCs	7	Mapeamento da Qualidade do Ar	16
Objetivos e Desenho do Projeto	8	Identificação de Pontos Críticos	16
		Avaliação	16
		Outras Considerações	16
		Garantia e Controle de Qualidade	17
Seleção e Especificação de Sensores de Ar	9	Pré-instalação	18
Métricas de Desempenho	9	Calibração/Colocalização	18
Exatidão e Precisão	9	Colocalização para Avaliação de Comparabilidade Entre Sensores	18
Correlação	10	Colocalização a Partir de um Monitor de Referência	18
Comparações Intra-Modelos	11	Manutenção Pós-Instalação	19
Redução de Desempenho	11		
Resposta do Sensor a Altas Concentrações	11	Referências	21
Completeness dos Dados	11		
Efeito dos Parâmetros Ambientais	11	Apêndice	
Avaliação de Desempenho:		A. Abordagens para Medição de Viés, Exatidão e Precisão	22
Avaliações Laboratoriais e de Campo	10	B. Diretrizes Resumidas para Embasamento De Desenvolvimento e Avaliação de Licitação	23
Outros Fatores a Serem Considerados Durante Processo de Seleção de um Sensor de Ar	13		
Energia	13		
Transmissão de Dados	13		
Calibração	13		
Considerações Sobre a Duração do Projeto	13		
Seleção de Serviços de Dados	14		
Gerenciamento e Acesso aos Dados	14		
Revisão de Dados	14		
Atendimento ao Cliente	14		
Modelos de Precificação	14		
Logística	14		
Considerações Sobre Custos Integrais	14		





Lista de Abreviações

API	Application Programming Interface
AQ	Qualidade do Ar
AQM	Gestão da Qualidade do Ar
AQSPEC	Centro de Avaliação de Desempenho de Sensores de Qualidade do Ar
ASTM	Associação Americana de Testagem e Materiais
BAM	Monitor de Partículas por Atenuação de Radiação Beta
CAAQMS	Estações de Monitoramento Contínuo da Qualidade do Ar
CSV	Comma-Separated Values
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental)
GBD	Estudo de Carga Global de Doença
CPCB	Central Pollution Control Board
SBC	Sensor de Baixo Custo
MLR	Regressão Linear Múltipla
MOEFCC	Ministério do Meio Ambiente, das Florestas E das Mudanças Climáticas da Índia
NOx	Gases Óxidos de Nitrogênio
QA/QC	Garantia e Controle de Qualidade
PM	Material Particulado
RFP	Solicitação de Propostas
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
RH	Umidade Relativa
SLR	Regressão Linear Simples
SOW	Declaração do Trabalho do Projeto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente
OMS	Organização Mundial da Saúde



Antecedentes e Visão Geral

A poluição do ar continua a ser o mais letal risco ambiental à saúde humana global, resultando em aproximadamente cinco milhões de mortes a cada ano, principalmente a partir da exposição a partículas finas (PM_{2,5}). O impacto da poluição do ar é maior e crescente em países caracterizados por rápido desenvolvimento econômico e urbanização, juntamente com o aumento de emissões industriais, geração de energia elétrica e transporte motorizado. Em países com regulamentação limitada ou inexistente da qualidade do ar, isso acarreta o aumento acentuado na poluição. Um agravante dos desafios associados poluição do ar em muitos desses países é a persistência de fontes de poluição pré-industriais, como a queima de combustíveis sólidos domésticos, resíduos de colheitas e florestas resultantes da limpeza de terras, bem como queima de lixo a céu aberto.

Para muitos governos municipais em países de baixa e média renda, a complexidade e o custo para compreender e controlar a poluição do ar têm sido barreiras para iniciar ou manter ações efetivas de ar limpo. Uma nova abordagem na gestão da qualidade do ar combinando soluções convencionais com inovações em monitoramento, avaliação, uso de dados e organização pode acelerar as iniciativas neste campo, especialmente em cidades que atualmente dispõem de capacidade técnica limitada.

Recentemente, os sensores de baixo custo (SBCs) vêm ganhando popularidade como ferramentas para preencher as lacunas de dados relativos ao monitoramento da qualidade do ar em tempo real. Ao mesmo tempo, devido ao fator de inovação dos SBCs, sua aplicação mais ampla para apoiar a gestão da qualidade do ar e suas políticas correspondentes requerem uma consideração cuidadosa. Em dezembro de 2020, mais de 50 especialistas internacionais e nacionais se reuniram em um intercâmbio virtual para compartilhar insights, melhores práticas e exemplos internacionais relacionados ao uso de sensores, para melhor compreender suas capacidades, limitações, especificações técnicas e indicações relacionadas à seleção e instalação. Aqui, optamos por integrar esses aprendizados como uma estrutura de monitoramento prevista em *Accelerating City Progress on Clean Air: Innovation and Action Guide*¹, um manual contendo abordagens e inovações comprovadas e rápidas para melhoria da qualidade do ar.

Em resumo, este compêndio fornece orientação pragmática para o uso de sensores de baixo custo (SBC) com base em pesquisa aplicada e experiência de campo, incluindo a identificação de metas de monitoramento e questões para as quais os SBC podem ser adequados, especificações técnicas, questões-chave de garantia e controle de qualidade (ou seja, validação e confiabilidade de resultados precisos, reproduzíveis e consistentes). Um dos principais objetivos deste documento é servir de suporte a governos locais e regionais em seus esforços para desenvolver documentos de licitação para aquisição do conjunto abrangente de serviços necessários para o planejamento, desenvolvimento, implantação, análise, integração com dados complementares de qualidade do ar e comunicação e gerenciamento de resultados de campanhas de SBC.

Este compêndio se concentra no uso de SBC para medição de concentração de massa de PM_{2,5}, o poluente para o qual a tecnologia de SBCs atual é mais adequada e o indicador mais importante da qualidade do ar para a saúde pública.

Este Compêndio aborda os seguintes tópicos:

- Uso de SBCs para coleta de dados úteis adequados para o preenchimento de lacunas em redes oficiais de monitores de referência;
- Medição e produção de dados úteis para a instalação de monitores de referência permanentes;
- Avaliação de medidas de redução de poluição geograficamente direcionadas (por exemplo, zonas livres de veículos, adoção de fontes de energia doméstica limpa em escala de bairros e comunidades);
- Identificação de pontos críticos e monitoramento do perímetro das instalações visando identificar possíveis violações e impactos locais de fontes episódicas de poluição (lixões, plantas industriais) e abordar situações de emergência (grandes incêndios estruturais e/ou incêndios florestais);

P: Por que medir e controlar partículas finas (PM_{2,5}) é uma prioridade?

R: Porque trata-se do poluente mais prejudicial à saúde. PM_{2,5} é um indicador de uma mistura de poluição que causa as doenças e mortes mais graves em todo o mundo. Além de ser uma causa comprovada de doenças graves e morte por doenças cardiovasculares e respiratórias, câncer e diabetes, que estão incluídas nas estimativas da carga global de doenças, o PM_{2,5} também afeta os nascimentos e a saúde infantil, com potencial para prejudicar o bem-estar e a produtividade ao longo da vida.

- Compreensão das importantes limitações dos SBCs atuais, incluindo a distinção entre fontes locais de PM da alta poluição de fundo regional, a incapacidade de aferição da composição do PM conforme fontes e a incapacidade de medir, de forma confiável, gases poluentes relevantes para a gestão da qualidade do ar (AQM);
- Orientação para subsidiar a solicitação de propostas (RFPs) de serviços de SBC, incluindo objetivos, planejamento, alocação espacial e seleção de ponto de instalação, seleção de dispositivo, calibração, instalação, manutenção, coleta de dados, transferência, garantia de qualidade e controle de qualidade e análise;
- Melhores práticas para tornar os dados acessíveis e significativos para as partes técnicas e não técnicas interessadas, visando aumentar a responsabilidade e o apoio às iniciativas de ar limpo.

Ferramentas e modelos simples de decisão são fornecidos para ajudar a orientar o desenvolvimento de RFPs e a avaliação das solicitações recebidas.

Aplicação de SBCs em Programas Integrais de Gestão da Qualidade do Ar e Sistemas de Monitoramento Integrados e Robustos

O monitoramento da poluição do ar, que inclui o uso de sensores de baixo custo e outros métodos inovadores, é apenas um dos vários aspectos relativos à gestão da qualidade do ar. Além dos dados de monitoramento, as estimativas das emissões de poluentes derivados das principais fontes podem e devem ser usadas para embasar as iniciativas de ar limpo visando a redução de emissões nocivas, mesmo quando redes de monitoramento robustas ainda estão sendo estabelecidas e aprimoradas.

Uma combinação de abordagens de monitoramento pode ser a base de um programa robusto de gestão da qualidade do ar, apoiar as necessidades de gestão local, regional e nacional da qualidade do ar e fornecer dados para pesquisa e informação pública². Há uma variedade de tecnologias para monitoramento da qualidade do ar a partir do solo e de satélites artificiais. Em terra, os mais precisos são os instrumentos de referência que produzem dados de alta qualidade. Entretanto, estes são caros e difíceis de operar.

Embora o SBC ofereça a promessa de monitoramento mais barato, a precisão varia significativamente a depender da tecnologia de detecção e do poluente em questão. O sensoriamento remoto por satélite tem sido uma fonte crucial de informações globais sobre a qualidade do ar³, especialmente em locais que não contam com qualquer

monitoramento terrestre. Essa abordagem também pode preencher lacunas de dados em áreas com amplo monitoramento em solo⁴⁻⁷.

Quando combinadas com modelos de transporte químico e medições de superfície disponíveis para relacionar as medições da coluna atmosférica com as concentrações de superfície, as estimativas baseadas em satélite para PM_{2.5} e alguns gases poluentes estão disponíveis em resolução espacial variável (~1-10 km), mas não fornecem medidas locais, em escala de vizinhança, com alta resolução temporal.

Em países onde muitas cidades de dimensões consideráveis não possuem monitores de superfície de referência, nenhuma tecnologia pode fornecer monitoramento abrangente. Em vez disso, uma combinação de tecnologias que inclua SBCs pode fornecer soluções econômicas para implementar o monitoramento da qualidade do ar e melhorá-lo de maneira gradual e sustentável, viabilizando a criação de um sistema integrado (Figura 2).

As campanhas e redes de SBCs podem se encaixar em um sistema mais amplo de gestão da qualidade do ar baseado em dados integrados coletados por métodos de sensoriamento remoto por satélite, monitores de superfície tradicionais e avançados e monitoramento periódico a partir de uma ou mais abordagens de alta resolução espacial: regressão baseada no uso do solo, monitoramento móvel ou campanhas e redes de SBC. Esse sistema pode avaliar a variação da poluição do ar em diferentes resoluções espaciais e temporais, informar a posição de monitores de referência adicionais e incorporar inovações que surjam ao longo do tempo. O custo de implantação e operação desse sistema varia significativamente dependendo das circunstâncias locais, mas um sistema híbrido provavelmente teria custos muito inferiores, quando comparado a uma rede regulatória convencional equipada com muitos monitores de referência⁸. Ressalta-se que esse sistema híbrido, além de combinar diferentes tecnologias de monitoramento, conforme demonstrado, pode integrar dados confiáveis de monitoramentos realizados por diferentes entidades governamentais e não governamentais.



NÍVEL ATUAL DE DADOS E CAPACIDADE	Níveis	Dados Disponíveis
	<p>1</p> <p><u>Limitados ou nenhum</u></p> <p>Nenhum monitoramento de referência oficial sustentado para PM_{2.5} em vigor</p>	<p>Aumento dos dispositivos de monitoramento e da densidade da rede</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estimativas baseadas em satélite • Monitoramento não oficial de PM_{2.5} • Regressão baseada em uso do solo, sensor de baixo custo ou estudos de monitoramento móvel
	<p>2</p> <p><u>Monitoramento básico para apoiar as ações iniciais</u></p> <p>Pelo menos um monitor de referência oficial para PM_{2.5} no local, equipado com coleta e uso contínuo de dados (em nível mínimo para informação pública)</p>	<p><u>Fase 1+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Um ou mais monitores fixos de referência para PM_{2.5}
	<p>3</p> <p><u>Monitoramento abrangente para ações sustentadas</u></p> <p>Uma rede de vários monitores de referência de PM_{2.5}, com pelo menos uma estação de monitoramento avançada coletando amostras de PM_{2.5} para composição química e aferição de gases poluentes. Os dados têm sido usados no desenvolvimento de políticas.</p>	<p><u>Fase 2+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Estação avançada de monitoramento de partículas de superfície • Uma ou mais estações de monitoramento de referência para gases poluentes
	<p>4</p> <p><u>Sistema integrado avançado</u></p> <p>Monitoramento de Fase 3 combinado com monitoramento espacial periódico de alta resolução</p>	<p><u>Fase 3+</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelos periódicos de regressão baseada em uso do solo ou campanhas de monitoramento móvel • Redes de sensores de baixo custo

Figura 1: Aplicação de Redes de Sensores de Baixo Custo (SBC) Conforme Nível Atual de Dados e Capacidade

Questões Prioritárias

- **SBC** A qualidade do ar é prejudicial à saúde na área urbana/metropolitana em questão?
- Por que é importante dispor de monitoramento oficial confiável?
- **SBC** Onde os monitores de referência iniciais devem ser instalados?

- Qual é a linha de base de $PM_{2.5}$ e a tendência à medida que as ações de ar limpo são (ou executadas)?
- **SBC** Onde os monitores de referência devem ser instalados?
- A qualidade do ar local está em conformidade com os padrões locais?
- Em que momentos estão ocorrendo os episódios de poluição do ar de curto prazo?
- **SBC** O que se sabe sobre os padrões locais de qualidade do ar e/ou exposição à poluição do ar?

- Quais são as fontes significativas de poluição do ar na área urbana/metropolitana em questão?
- As medidas de controle têm melhorado a qualidade do ar na área urbana/metropolitana em questão?
- **SBC** Onde os monitores de referência adicionais devem ser instalados?
- **SBC** As fontes locais (por exemplo, queima de lixo, uso de energia de biomassa) estão impactando os níveis de $PM_{2.5}$ nas proximidades?
- **SBC** Existem pontos críticos de exposição?

- **SBC** Quais são os pontos críticos e fontes locais do bairro em questão?
- As medidas de controle têm melhorado a qualidade do ar do bairro em questão?
- **SBC** As medidas de controle da poluição do ar com foco geográfico têm melhorado a qualidade do ar do bairro em questão?

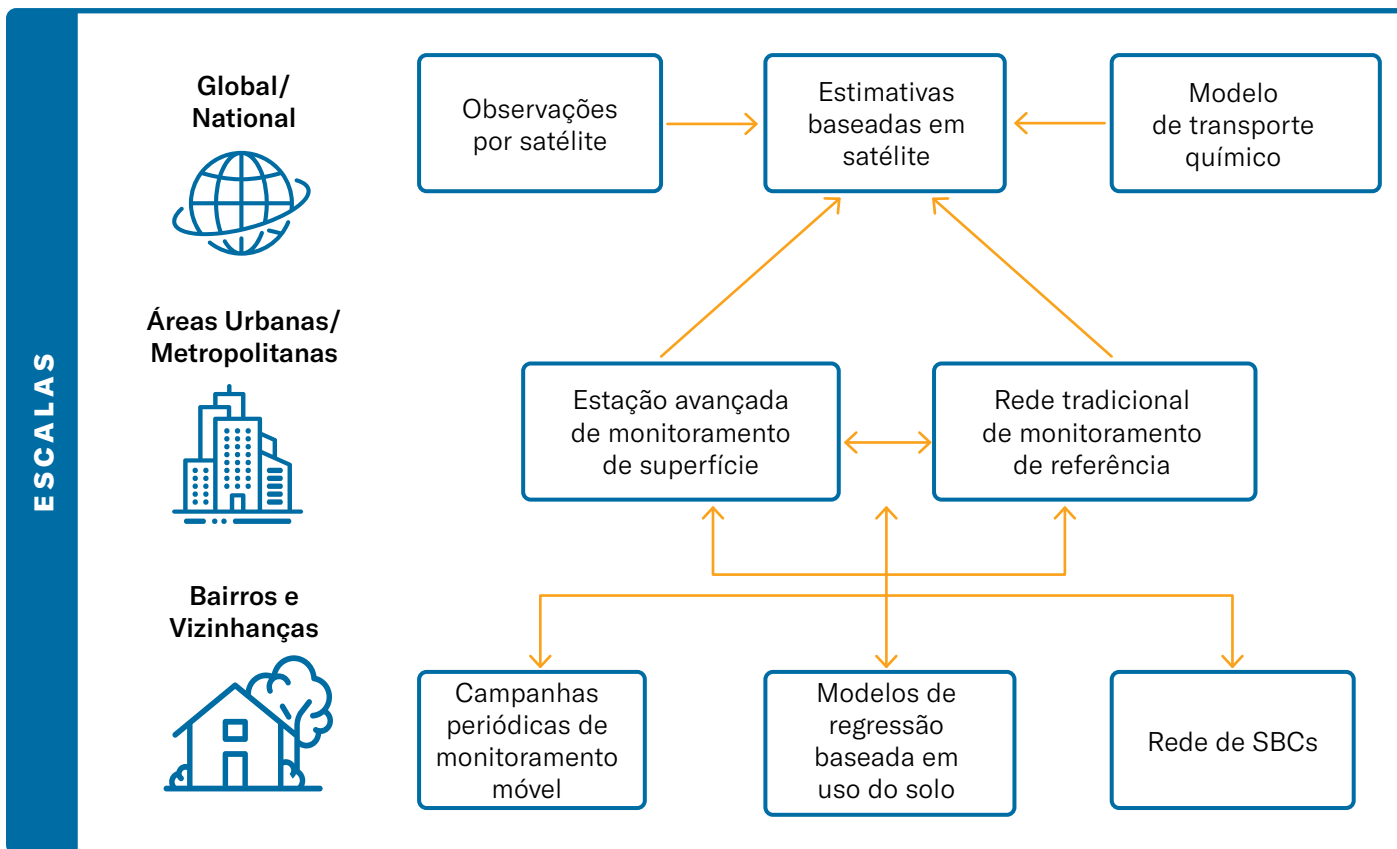


Figura 2: Sistema Integrado de Gestão da Qualidade do Ar

Possíveis Aplicações de Sensores SBC

A seção anterior forneceu uma visão geral de como os SBCs podem complementar outros métodos de monitoramento convencionais e inovadores como parte de um sistema de monitoramento abrangente. Aqui consideramos as diferentes aplicações de sensores SBC, dependendo do nível atual de capacidade de monitoramento e das principais questões a serem abordadas (Figura 1). A aplicação pragmática de SBCs deve partir de uma avaliação dos dados atuais de monitoramento da qualidade do ar e da capacidade de uma cidade ou jurisdição onde a instalação de SBCs está sendo considerada, a partir da definição de questões-chave sobre a qualidade do ar relevantes para embasar ou avaliar decisões. Além disso, é preciso realizar um inventário de qualquer monitoramento disponível e confiável e dos dados sobre níveis de poluição, para avaliar como os dados coletados pelos sensores SBC podem preencher lacunas e ser integrados a outros dados de monitoramento da qualidade do ar.

Por exemplo, em cidades com capacidade de monitoramento limitada ou inexistente, as redes SBC podem ser usadas para verificar se os níveis de $PM_{2.5}$ estimados a partir de métodos de sensoriamento remoto baseados em satélite mostram um aumento substancial dos padrões de saúde em uma cidade e regiões vizinhas. As redes também podem fornecer dados práticos iniciais para embasar a criação de um sistema de monitoramento integrado de abordagens complementares, através, por exemplo, da delimitação do escopo dos pontos de instalação dos monitores de referência permanentes iniciais ou adicionais. Em cidades que disponham de ao menos alguns monitores de referência estabelecidos, os SBCs oferecem uma maneira de complementar o monitoramento existente, preencher lacunas espaciais na rede de monitoramento, identificar pontos críticos e medir a eficácia de iniciativas de ar limpo geograficamente direcionadas. As aplicações potenciais dos SBC dependem do nível atual de dados e da capacidade da cidade em questão, além das principais lacunas de dados e questões relacionadas à qualidade do ar. Ver Figura 1.

Objetivos e Desenho do Projeto

Este compêndio se concentra em quatro aplicações práticas de SBCs para embasar a gestão da qualidade do ar. Tais aplicações incluem:

1. **LOCALIZAÇÃO** Caracterização dos padrões espaciais dos níveis de $PM_{2.5}$ na ausência de monitores de grau de referência para orientar a localização de um monitor de referência inicial ou monitor(es) adicional(is) para preencher lacunas em uma rede esparsa.

Questões práticas a serem consideradas antes de planejar um projeto de monitoramento baseado em SBC

- Qual é o status atual e a capacidade de monitoramento oficial de referência da qualidade do ar (Figura 1)?
- Considerando os dados oficiais e não oficiais disponíveis sobre os níveis de poluição do ar, quais são as principais lacunas de dados e perguntas sobre os níveis de qualidade do ar que os SBCs podem ajudar a responder?
- Quais são as limitações dos SBCs atualmente disponíveis e suas vantagens e desvantagens em comparação a outras abordagens de monitoramento? Os SBCs são adequados para responder às questões-chave?
- Que dados de apoio (e.g., fontes de $PM_{2.5}$, emissões e sua distribuição espacial, etc.) estão disponíveis ou devem ser coletados para auxiliar o planejamento de um projeto de SBC e agregar valor aos dados para orientar ou avaliar o controle da poluição do ar?

2. **MAPEAMENTO DA QUALIDADE DO AR** Caracterização de gradientes de exposição espacial e temporal por toda a cidade para avaliar dados e previsões de emissões, fornecer estimativas de exposição para estudos de saúde e informar a expansão da rede existente de monitores de referência.
3. **IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS** Identificação de áreas com maiores concentrações de poluição do ar devido à proximidade de fontes, para priorizar a ação local ou para conscientizar o público sobre fontes específicas.
4. **AValiação** Avaliação do impacto das medidas geograficamente direcionadas visando controlar fontes específicas e/ou reduzir a exposição à poluição em

populações que vivem próximas a fontes específicas.

A aplicação das redes de sensores SBC e as questões prioritárias a serem abordadas dependem do nível atual de dados e da capacidade de gestão da qualidade do ar (Figura 1).

Todas as quatro aplicações pressupõem que os dados do SBC seriam usados em conjunto com abordagens convencionais de gestão da qualidade do ar, juntamente com outras metodologias e abordagens inovadoras de medição, incluindo regressão baseada no uso do solo e sensoriamento remoto.

- Os SBCs não devem ser usados para rastrear tendências de longo prazo nos níveis de $PM_{2.5}$ em escala urbana. Esse rastreamento deve ser feito estabelecendo pelo menos um ou mais locais de monitoramento de referência que possam fornecer dados consistentes ao longo de uma linha do tempo.
- Os SBCs podem ajudar a seleção de locais, mas não substituem os monitores de referência. Na ausência de monitoramento de referência, as estimativas baseadas em satélite constituem uma alternativa para rastreamento de tendências em longo prazo.

A decisão sobre as métricas adequadas para o desempenho do sensor depende da aplicação pretendida. As medições qualitativas ou indicativas podem ser úteis em locais específicos ou para fins educacionais. Por exemplo, tentar entender alterações gerais na poluição do ar em uma escola ou centro comunitário pode não exigir um grau mais elevado de qualidade dos dados. No entanto, será necessária mais alta qualidade de dados ao compararmos os dados do SBC com outros sensores ou com os padrões.

Limitações dos sensores de baixo custo

Conhecer as limitações dos sensores de baixo custo pode ajudar a garantir que eles sejam usados somente quando adequados à sua finalidade e evitar problemas de qualidade de dados e outros imprevistos. Para tanto, as orientações nas seções subsequentes deste compêndio devem ser seguidas

- A exatidão e a precisão desse tipo de sensor têm sido suas principais limitações. Um passo importante para redução do problema de qualidade de dados é a escolha de um dispositivo que tenha um bom desempenho quando testado por programas de testagem e avaliação consolidados, conforme descrito neste documento.
- Além do uso de SBCs para medir a concentração de $PM_{2,5}$, os sensores atuais não demonstraram bom desempenho ao aferir diversos poluentes relevantes para o gerenciamento da qualidade do ar, incluindo composição de partículas e óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre e ozônio. Outros métodos como amostradores de baixo custo baseados em filtragem de material particulado e amostradores passivos estão disponíveis.
- Embora o baixo custo unitário dos SBCs seja atraente, os custos de pessoal e demais recursos de instalação, manutenção, calibração e substituição, além do gerenciamento e a manutenção de rede de dados, devem ser considerados.
- Finalmente, as redes de SBCs podem gerar dados que parecem preocupantes, mas não são confiáveis. Por exemplo, um pequeno pico com duração de segundos a minutos nos níveis medidos por um único sensor pode indicar um sensor com defeito ou um aumento transitório na poluição do ar altamente localizada.
- Este último tem pouca relevância para a gestão da qualidade do ar ou à saúde pública, a menos que afete uma grande população ou ocorra regularmente. Qualquer tipo de pico de medição pode distrair os já escassos recursos humanos e materiais do governo dos esforços para controlar as importantes fontes de poluição identificadas.

Seleção/Especificação de Sensores de Ar

O desempenho dos sensores de ar é uma medida da exatidão, precisão e confiabilidade do dispositivo. O desempenho pode variar significativamente de um fabricante para outro devido a vários fatores, tais como condições climáticas, níveis de poluição. Para ajudar usuários e compradores a selecionar sensores de ar mais adequados aos seus propósitos, as organizações desenvolveram centros de avaliação e protocolos de testagem para determinar quais sensores de ar têm melhor desempenho. Essas organizações incluem agências governamentais, instituições acadêmicas e associações que desenvolveram testes dos sensores de ar realizados por meio de métodos confiáveis e independentes. Esta seção fornece uma visão geral dos métodos de avaliação, recursos e outros critérios para identificar quais sensores de ar são os melhores para uma determinada aplicação. Grupos de testagem e normatização desenvolveram recentemente métodos de teste^{9,10}. Os métodos relativos a sensores de ar normalmente incluem a avaliação destes dispositivos em ambientes de laboratório e de campo. As avaliações laboratoriais testam os sensores de ar usando instrumentos de referência em uma câmara que controla todos os parâmetros de teste – temperatura, umidade e concentrações de poluentes. As avaliações de

laboratório não podem simular totalmente as condições reais, conforme ocorre nas avaliações de campo. Sendo assim, embora tais avaliações nos permitam investigar o desempenho do dispositivo de forma sistemática, a imensa gama de variáveis condicionantes no mundo real constitui um desafio para a realização de simulações em um ambiente controlado. O teste de campo oferece ao usuário a oportunidade de desafiar o sensor e determinar o desempenho geral do dispositivo. Tais testes são realizados através da instalação de vários (pelo menos três) sensores de ar junto a um instrumento de referência.

Métricas de Desempenho

Métricas de desempenho são parâmetros usados para descrever o desempenho de um sensor de ar em relação ao padrão (normalmente um instrumento de referência). Várias métricas nos ajudam a entender o desempenho de um sensor de ar e determinar o melhor sensor para uma determinada aplicação. As métricas estão resumidas abaixo e na Figura 4, e são geralmente aplicáveis a poluentes gasosos e particulados.

Exatidão e Precisão

A exatidão e a precisão referem-se à capacidade dos sensores de aferir um valor correto de forma confiável em todas as vezes (Figura 3). Precisão refere-se à capacidade

do dispositivo realizar medidas replicáveis e consistentes sempre que utilizado. Por sua vez, exatidão refere-se à capacidade do dispositivo aferir um valor correto ou verdadeiro. Por exemplo, se um instrumento de referência identificar um valor de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e três sensores de ar localizados próximos a ele encontrarem valores de 40, 40,5 e 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, então os dispositivos de teste são precisos (os valores estão próximos), mas não exatos (os valores não são exatamente iguais aqueles aferidos pelo instrumento de referência). Consulte o Apêndice para mais métricas específicas para determinação de precisão e do viés.

Correlação

A correlação mede como os dados coletados pelo sensor de ar se relacionam com os dados de um instrumento de referência, e esta pode ser avaliada para medições realizadas ao longo do tempo ou em diferentes locais. A correlação temporal mede o quanto as medições realizadas por diferentes monitores variam ao longo do tempo.

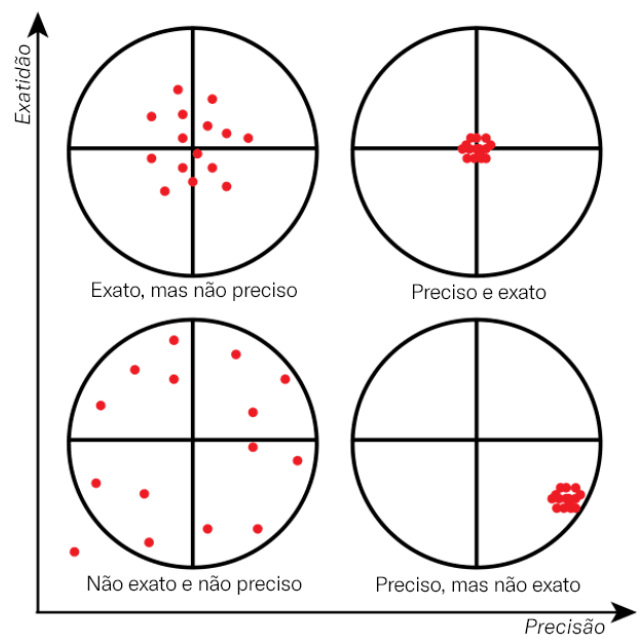


Figura 3: Dados de amostra ilustram diferentes níveis de exatidão versus precisão. Fonte da imagem: <https://wp.stolaf.edu/it/gis-precision-accuracy/>

Avaliação de Desempenho: Avaliações laboratoriais e de campo

Avaliação em laboratório

A validação realizada em laboratório ajuda a avaliar sistematicamente o desempenho dos sensores de ar conforme uma variedade de condições de temperatura e umidade. O procedimento é geralmente realizado em uma câmara de monitoramento que pode controlar, manter e monitorar todos os parâmetros de teste, tais como temperatura, umidade relativa e concentração de aerossóis. Embora as avaliações realizadas em laboratório sejam úteis para determinar o desempenho dos sensores sob condições específicas e reguladas, elas não podem simular totalmente as condições reais como a avaliação de campo. É possível que a diferença entre as condições de campo e de laboratório se deva a fatores como mudanças nas condições climáticas e diferenças nas propriedades dos poluentes.

Avaliação de campo

Embora as avaliações em laboratório nos permitam investigar o desempenho do dispositivo sistematicamente, as condições reais são difíceis de simular em um ambiente controlado. Os testes de campo demonstram como um dispositivo funcionará em condições reais e seus resultados, incluindo a instalação junto a um monitor de referência, devem ser revisados no âmbito do planejamento de um projeto de SBCs. A avaliação de campo deve ser realizada em condições semelhantes àsquelas que são esperadas e obter desempenho comparável ao dos dispositivos de referência. Estações de monitoramento regulatórias estabelecidas com dispositivos $\text{PM}_{2,5}$ de referência podem ser usadas como localizações conjuntas para avaliações de campo.

Recursos-chave para avaliação de sensores de Ar

- Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA) – Metas de desempenho: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>
- Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQSPEC): <http://www.aqmd.gov/aq-spec>
- Air Parif: <http://www.airlab.solutions/en>

A correlação espacial mede quanto pares de medidas, tais como médias semanais, variam juntos em múltiplas localizações. Uma alta correlação ($>0,80$) indica que o sensor detecta tendências semelhantes aos dados de referência. No entanto, as medições do sensor podem ter um R^2 alto, mas diferirem significativamente das medições de referência devido a vieses (por exemplo, um valor de R^2 de 0,99 que subestime ou superestime a concentração real significativamente).

Outra métrica útil para tal comparação é o valor da Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado, ou RMSE Normalizado. Valores mais baixos desta métrica indicam concordância superior com o instrumento de referência. Consulte o apêndice sobre como calcular os valores de R^2 e RMSE.

Comparações Intra-Modelos

Ao usar vários dispositivos de sensor de ar para um projeto, é importante assegurar que as leituras de diferentes dispositivos se conformam entre si. Para garantir isso, são recomendadas as comparações intra-modelos (ou seja, entre exemplares de um mesmo modelo), utilizando pelo menos três dispositivos da mesma marca, modelo e versão de firmware para o teste.

Redução de Desempenho

O desempenho do sensor de ar (o drift, ou “desvio”) pode diminuir com o tempo devido a causas diversas, tais como mau funcionamento de peças mecânicas, deposição de partículas em unidades internas de detecção ou outros fatores ambientais. O desvio pode ser positivo ou negativo e nos leva a concluir equivocadamente que as concentrações estão diminuindo ou aumentando em prazos alongados, em projetos com duração superior a seis meses. O fabricante deve fornecer a expectativa de vida útil do sensor e os métodos para detectar e corrigir o desvio dos sensores de ar.

Resposta do Sensor a Altas Concentrações Uma vez que as condições ambientais em áreas altamente poluídas podem exceder em uma ordem de magnitude ou mais os parâmetros de avaliação típicos de SBCs, é importante determinar a resposta do sensor em contextos de concentrações extremas de poluentes. É preciso notar que um desempenho excelente em uma região com concentrações mais baixas pode não se traduzir em outras áreas.

Abordagens inovadoras para configurações com pouca disponibilidade de recursos

Em locais sem acesso confiável a eletricidade e conexões Wi-Fi, a instalação de sensores de ar equipados com bateria integrada e os módulos de internet celular é mais adequada. Alternativamente, alguns grupos de pesquisa empregam uma combinação de baterias portáteis e um módulo Wi-Fi em conjunto com o sensor de ar. Embora essa configuração permita flexibilidade de instalação em configurações com recursos escassos, devido às peças adicionais, esta não será uma configuração plug-and-play e, como tal, exigirá mais tempo de pessoal para monitoramento e solução de problemas. Os custos adicionais de compra e manutenção das baterias e do módulo Wi-Fi também deverão ser considerados.

Completeness dos Dados

A completeness dos dados indica a confiabilidade de um sensor de ar, ou seja, se a rede de sensores está operando de forma consistente e produz um conjunto completo de dados, necessários para tirar conclusões sobre a qualidade do ar. As variações sazonais esperadas de concentração

Os fatores de calibração podem mudar de acordo com o tempo e o local

A calibração pode realmente ser um desafio para a maioria dos SBCs que medem $PM_{2,5}$. Dado que tais sensores operam de acordo com o princípio de espalhamento óptico, mudanças nas propriedades ópticas do material particulado afetam sua resposta. Tais propriedades (como distribuição de tamanho, resposta à umidade, etc.) mudam frequentemente em áreas urbanas e em diferentes estações do ano. Assim, o fator de calibração pode diferir não apenas a partir da localização, mas também com o tempo. Por exemplo, as calibrações de uma região podem não se aplicar a outras, e as calibrações realizadas no verão podem variar durante as monções ou no inverno. Para resolver este problema, é aconselhável manter um SBC junto ao monitor de referência (por exemplo, um Monitor de Atenuação Beta - BAM) dentro da área geral de estudo.

de poluentes não seriam confiáveis caso os sensores não durassem pelo menos um ano. Sensores sobressalentes que tenham sido testados para testagem de comparação em pontos colocalizados devem ser deixados de lado.

Efeito dos Parâmetros Ambientais

É importante verificar se os dispositivos registram dados de temperatura e umidade. Caso contrário, será

Questões-Chave para Seleção de SBC

Aplicação



SIM



O sensor SBC atende às necessidades iniciais para sua aplicação planejada (por exemplo, aferição de poluentes de interesse)?

Desempenho



SIM



O SBC foi certificado, testado ou avaliado por uma organização confiável?



NÃO

Selecione outro SBC.

Avaliação de Campo



SIM



O SBC foi testado em sua área sob condições semelhantes de poluição e clima?



NÃO

É possível realizar um teste de campo em sua região?



NÃO

Selecione outro SBC.

Suporte



SIM



O SBC atende aos outros requisitos para sua aplicação? (energia, comunicações, suporte, etc.)



NÃO

Selecione outro SBC.



CONSIDERE USAR O SBC

Figura 4: Questões-chave para seleção de SBCs

preciso registrar os dados de umidade e temperatura separadamente ou acessar esses dados a partir de uma estação meteorológica próxima. (Para a maioria dos modelos de SBC, umidade e temperatura são parâmetros que impactam o desempenho do dispositivo e, portanto, é importante manter um registro desses valores).

Outros fatores a se considerar durante o processo de seleção do sensor de ar

Outros fatores são cruciais para escolha de um sensor de ar que atenda às metas e objetivos estabelecidos. Alguns deles podem afetar significativamente o desempenho do sensor, ao passo que outros podem afetar os custos iniciais e permanentes de tais dispositivos. Por exemplo, uma fonte de alimentação instável pode produzir um conjunto incompleto de dados e limitar a análise.

Duração estimada do projeto	Principais Considerações
Curto prazo	Desempenho, facilidade de instalação, manutenção
Médio prazo (até um ano)	Calibração repetitiva, desvio do sensor, peças de reposição e substituição
Longo prazo (mais de 1 ano)	Prazo de validade, garantia estendida

Tabela 1: Principais considerações para seleção de um sensor SBC dependendo da duração do projeto.

Questões-chave para embasar a seleção do dispositivo, escolha do ponto de instalação e implementação do estudo

- Quais são as principais metas e objetivos do projeto?
- Qual é o nível atual de capacidade de gestão da qualidade do ar?
- Quais dados estão atualmente disponíveis para informar o desenho do estudo e abordar questões-chave?
- Qual é prazo proposto para alcançar resultados?
- Como os dados serão analisados e visualizados?

Energia

Este é um fator importante ao projetar redes para cidades com quedas de energia frequentes ou que traga desafios relacionados à obtenção de energia. A interrupção no fornecimento de energia se traduz em baixa qualidade de

dados. Há diversas opções de fontes de alimentação para os SBC, incluindo a rede elétrica convencional, energia solar e baterias. Uma fonte alternativa de alimentação pode aumentar a confiabilidade. Caso decida por usar energia solar, é preciso se certificar de que há luz solar suficiente. Estas decisões devem ser tomadas antecipadamente para garantir que o local de instalação disponha da quantidade de luz solar adequada para geração de energia solar.

Transmissão de Dados

Normalmente, os dados coletados por sensores de ar são transmitidos para uma nuvem em tempo real. Essa transmissão ocorre por meio de uma rede Wi-Fi ou módulo de rede celular (um cartão SIM) instalado no sensor. Como forma de backup, os dados podem ser armazenados em um dispositivo de memória interna (como um cartão SD) que possa ser acessado fisicamente. A conexão por Wi-Fi pode ser instável ou exigir protocolos de segurança adicionais, reduzindo a confiabilidade dos sensores de ar. Um módulo celular pode exigir custos mensais que devem ser considerados.

Calibração

Como qualquer instrumento, os sensores de ar exigirão calibração e correção periódicas dos dados. A resposta do sensor pode mudar de acordo com as estações do ano, propriedades poluentes e idade do sensor. É recomendável que os sensores de ar sejam calibrados no local antes da instalação e depois, periodicamente. Consulte a seção sobre Calibração para obter mais detalhes. Informe-se junto ao fabricante do SBC sobre quais são os protocolos, frequência e custo adicional para manter o sensor calibrado e operante.

Considerações sobre a duração do projeto

O período planejado para realização de monitoramento com SBC pode afetar alguns dos recursos e funções selecionadas para seu sensor. Projetos de curto prazo com duração de alguns meses e aqueles que não abrangem mais de uma estação podem dispensar uma logística de localização ou esforços de recalibração abrangentes. Para os projetos de longo prazo, especialmente com duração superior a um ano, a vida útil do sensor de ar e as garantias associadas se tornam mais importantes. Uma vez que os sensores de ar tipicamente duram entre um e dois anos, você precisará planejar substituições e manutenção adicional. Outros custos a ser considerados aumentam com o tempo – repita as calibrações para capturar dados sobre sazonalidade, desvio do sensor, taxas de gerenciamento de rede e dados, etc. (Tabela 1).

Seleção de Serviços de Dados

Os sensores de ar produzem uma quantidade considerável de dados que devem ser gerenciados, controlados quanto à sua qualidade e disponibilizados para o sucesso do seu projeto. É fundamental entender quais serviços de dados são fornecidos (ou não fornecidos) por uma empresa de sensores de ar. Alternativamente, uma autoridade reguladora local ou regional pode considerar a execução de alguns desses serviços caso esteja equipada com a experiência e as ferramentas necessárias.

Gerenciamento e Acesso aos Dados

Os fabricantes devem fornecer detalhes sobre onde os dados serão armazenados e como eles poderão ser acessados. Os sistemas baseados em nuvem são ideais e facilitam o armazenamento, rastreamento e garantia de qualidade dos dados.

Algumas questões a serem consideradas incluem:

- Os dados estarão disponíveis publicamente ou são protegidos por senha?
- Os usuários terão acesso aos dados não tratados?
- Quem será o proprietário dos dados?
- Por quanto tempo os dados serão retidos após o estudo?
- Há custos adicionais para versões do site/aplicativo para dispositivos móveis?
- Há um limite de quantas pessoas podem acessar os sites/aplicativos?

Revisão de Dados

É importante decidir quem será responsável por revisar os dados e resolver quaisquer problemas que venham a ser identificados. Caso esse serviço seja fornecido, os fornecedores devem descrever o processo e a frequência de revisão de dados diariamente para identificar problemas antecipadamente, corrigir a trajetória e ajudar a criar um conjunto de dados completo e de alta qualidade.

Atendimento ao Cliente

Você pode precisar de ajuda adicional do fornecedor para instalar, operar e usar os sensores de ar, portanto, leve as seguintes perguntas em consideração: quanto tempo durará o suporte ao cliente? Que formas de suporte estão incluídas na garantia? Que formas de suporte não estão incluídas? O fornecedor oferece suporte em sua cidade ou em regiões próximas?

Modelos de Precificação

Há dois tipos de modelos de precificação no mercado: 1) a aquisição de sensores de ar; e 2) os planos de assinatura ou leasing de sensores. Ao adquirir hardware, os custos adicionais devem ser considerados, como por exemplo: acessórios relacionados, peças sobressalentes, serviços e envio para reparos e manutenção, custos de operação contínuos, custos de acesso aos dados, etc. Você pode solicitar ao fornecedor informações sobre o custo dos itens necessários e seu custo total para o primeiro ano de operação. O modelo de assinatura normalmente inclui o hardware mais os serviços. O custo da assinatura anual pode consistir em serviços de manutenção, reparo/substituição, acesso a dados, QA/QC de dados, etc. A quantidade específica de serviços dependerá do fabricante.

Logística

Os projetos baseados em SBC que possuam vários sensores instalados em locais diferentes geralmente exigem flexibilidade e capacidade de triagem para fazer o melhor uso dos recursos disponíveis. Além do estágio de configuração, há pequenas tarefas que podem consumir tempo e recursos. Os tempos de viagem de um local para outro para solucionar problemas de configuração/solução de problemas/reparo/substituição podem ser longos, e é uma boa ideia contar com um gerente de projetos qualificado no campo que possa priorizar e planejar a manutenção da rede com eficiência.

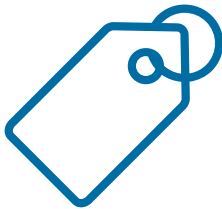
Considerações Sobre Custos Integrais

Embora o baixo custo unitário dos sensores possa ser atraente, os custos com pessoal e outros recursos de instalação, manutenção, calibração e substituição do dispositivo, juntamente com o gerenciamento e manutenção da rede de dados¹¹, podem neutralizar grande parte ou mesmo todas as economias esperadas com a aquisição do instrumento. As principais considerações sobre custos (Figura 5) incluem:

- Preço de compra de equipamentos de monitoramento;
- Suprimentos, peças, serviços e envio para reparos e manutenção;
- Insumos, transporte, análises laboratoriais para amostras baseadas em filtros;
- Estruturas, infraestrutura de apoio, segurança;
- Locação de imóveis, quando aplicável;
- Serviços públicos, incluindo energia elétrica confiável e comunicação sem fio;
- Custos de pessoal para instalação, calibração e manutenção;
- Equipamentos de gerenciamento de dados, taxas e pessoal.
- Projeto de redes de SBCs e posicionamento dos sensores.

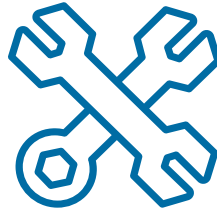
Custos-chave a se considerar na seleção de SBCs

Preço de Compra



Custo inicial do equipamento de monitoramento

Manutenção



Suprimentos, peças, serviços e envio para reparos

Infraestrutura



Estruturas e infraestrutura de suporte para instalação, segurança

Locação de Imóveis



Quando aplicável, locação ou arrendamento de propriedades para instalação do equipamento

Serviços de Utilidade Pública



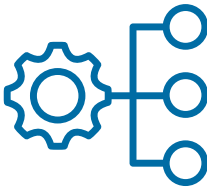
Energia elétrica confiável e comunicação sem fio

Pessoal



Custos de pessoal para instalação, calibração e manutenção

Gerenciamento de Dados



Equipamento de gerenciamento de dados, taxas e pessoal

Figura 5: Principais custos a considerar para seleção de SBCs

Desenho das Redes de SBCs e Posicionamento dos Sensores

Primeiramente, a implantação de redes de SBCs envolve o projeto de uma rede e depois a seleção de locais para instalação dos sensores. Um planejamento detalhado envolve a criação de uma rede para determinar a localização geral dos pontos de instalação, a definição do número de sensores necessários e a seleção e execução da logística necessária para instalação dos dispositivos. Todas essas tarefas podem ser realizadas por autoridades reguladoras, consultores ou, em alguns casos, pelo próprio fornecedor. A solicitação de propostas deve especificar os serviços necessários e as respostas devem indicar claramente quem prestará esses serviços.

Projetar uma rede de sensores pode ser desafiador porque a escolha dos pontos de instalação e o número de sensores instalados dependem de fatores como aplicação, cobertura geográfica, orçamento disponível, entre outros. Várias considerações são cruciais ao projetar uma rede e elas são descritas abaixo, com base na aplicação pretendida:

Escolha do Local de Instalação

Para prospectar novos locais para monitoramento de referência, os sensores de ar podem ser instalados em diversos locais para monitorar gradientes de qualidade do ar (ou seja, as diferenças na qualidade do ar em uma mesma região). Nesse caso, a duração do monitoramento dependeria do objetivo do monitoramento de referência, mas pode variar de curto a longo prazo (em diferentes estações).

Mapeamento da Qualidade do Ar

Os pontos de instalação de sensores para mapeamento da qualidade do ar podem ser situados em diferentes locais da cidade visando capturar gradientes das concentrações de poluentes, indicando exposições populacionais correspondentes. Os locais mais apropriados seriam próximos a fontes poluentes como indústrias, estradas/interseções de tráfego intenso e fontes de fundo, como áreas inexploradas ou zonas rurais. Locais que possam ser afetados durante eventos episódicos, como a queima de resíduos de culturas agrícolas também podem ser selecionados nos termos dessa aplicação.

Identificação de Pontos Críticos Para identificação de pontos críticos, os sensores devem ser instalados em locais próximos às fontes, como um cruzamento de tráfego intenso, um aglomerado industrial, um local de queima de biomassa a céu aberto ou uma usina onde as concentrações sejam potencialmente altas.

Avaliação

Para avaliar o impacto das intervenções políticas de redução da poluição do ar em uma localização geográfica específica, os pontos de instalação devem estar próximos das fontes identificadas em que haja um impacto esperado sobre a população humana.

Outras Considerações

A localização e o número de sensores instalados também devem levar em consideração os seguintes fatores¹²:

- **Necessidade de sensores sobressalentes (backup):** O orçamento deve cobrir sensores sobressalentes que possam substituir aqueles que venham a falhar durante o período do estudo.
- **Condições meteorológicas:** As condições meteorológicas e do vento afetam a concentração e distribuição da poluição. Portanto, é uma boa ideia encontrar pontos situados a favor e contra o vento para monitorar a poluição que entra e sai de uma determinada área.
- **Localização conjunta de sensores:** Planeje a instalação permanente de um sensor de ar próximo às estações de referência para monitorar continuamente o desempenho do sensor.
- **Acesso:** É importante ter acesso ao local para realizar manutenção, substituição e demais tarefas durante o período do estudo. Pode ser necessário firmar um acordo de acesso formal que liste os termos e procedimentos para acessar o local de instalação.
- **Energia:** Os sensores de ar podem precisar ser conectados à rede elétrica convencional, podem contar com painéis solares ou oferecer ambas as opções. Caso eletricidade seja necessária, certifique-se de que haverá acesso a uma fonte energética confiável. Caso decida por utilizar energia solar, certifique-se de que haja exposição suficiente à luz solar (ou seja, painéis solares que não sejam bloqueados por edifícios ou outras estruturas).
- **Segurança:** Os sensores de ar e demais equipamentos estão sujeitos a adulteração e roubo. Procure um local seguro, alto, fora do alcance das mãos humanas, em um local discreto ou atrás de um portão ou cerca que possam ser trancados.

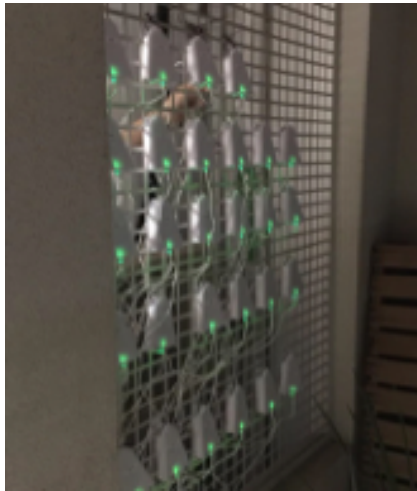


Figura 6: Exemplo de colocação de sensor para teste de comparabilidade

- **Altura do sensor:** Tente posicionar os sensores de 1 a 2 metros acima do solo ou do telhado. Evite áreas próximas a fontes de poluição locais (como chaminés, ou dutos de ventilação de cozinhas) ou drenos de poluição (como árvores). Posicione os sensores de modo a permitir o fluxo de ar irrestrito e assegurar medições representativas.

Garantia e Controle de Qualidade

Esta seção descreve algumas abordagens-chave relacionadas a garantia e controle de qualidade, para assegurar um bom nível de desempenho ao longo de todo o projeto.

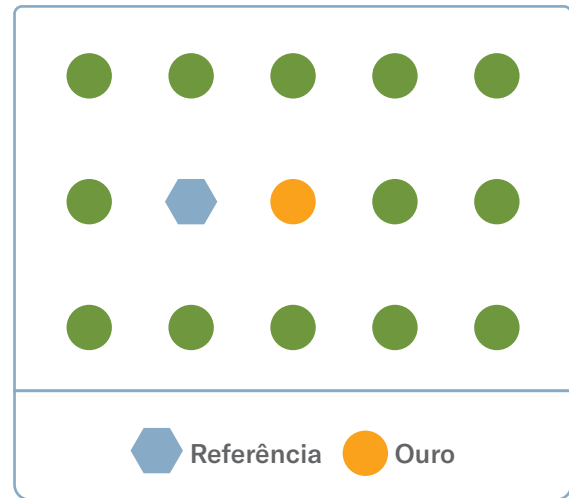


Figura 7: Calibração de sensores de ar posicionados junto a um monitor de referência

Colocalização	Processo de comparação lado a lado usando um instrumento de referência. De acordo com esse método, os sensores de ar e os monitores de referência são posicionados próximos um do outro.
Calibração	Processo de ajuste dos dados do sensor de ar em relação a um padrão de referência. Os sensores de ar são calibrados pelo fabricante (calibração de fábrica) e também no campo (a partir do posicionamento conjunto com monitores de referência) antes de que uma campanha de medição possa ser iniciada Como a resposta do sensor pode mudar de acordo com as estações, é necessário calibrá-lo repetidamente para projetos de médio ou longo prazo. Os métodos empregados para realizar a calibração “remota” ou por “nuvem” devem ser cuidadosamente avaliados. Para saber mais, consulte a Figura A1 do Apêndice.
Correção de Dados	Processo de ajuste dos dados para outros fatores que possam influenciar a resposta do sensor, tais como temperatura, umidade, etc.

Tabela 2: Definições de termos comumente usados no contexto de garantia e controle de qualidade de sensores de baixo custo: localização conjunta, calibração e correção de dados.

Pré-Instalação

Calibração/Colocalização

Os sensores de ar precisam ser calibrados para fornecer dados de alta qualidade. Alguns fabricantes podem fornecer um fator de calibração ou fornecer serviços de calibração assim que os sensores forem instalados. Embora os sensores de ar possam ser calibrados na instalação, eles devem ser recalibrados periodicamente antes, durante e após o estudo. As calibrações são determinadas usando dados coletados durante uma comparação baseada em colocalização. A colocalização, ou localização conjunta, é um método de comparação lado a lado entre os dados coletados por sensores de ar e um monitor de referência com um padrão conhecido. A definição dos fatores de calibração constitui uma área ativa de pesquisa para instituições acadêmicas e fabricantes que têm desenvolvido novos métodos. Há várias recomendações importantes a se considerar no âmbito da calibração: 1) compreenda o método usado para calibrar os dados do sensor, 2) determine com que frequência um sensor precisará ser calibrado e quem irá calibrá-lo e 3) certifique-se de que os dados não tratados e calibrados sejam arquivados. É importante criar uma calibração formal do SBC ou um guia de comparação baseado em localização conjunta para que todos os funcionários adotem o mesmo procedimento. Mais detalhes sobre as formulações usadas para estimar o fator de calibração são discutidos no Apêndice deste documento.

Colocalização para Avaliação de Comparabilidade Entre Sensores

Todas as unidades de sensores a ser instalados devem ser posicionadas de forma conjunta e testados para determinar qualquer variação nas medições entre as diferentes unidades (um método que também é chamado de variabilidade intra-modelos). Tais colocalizações devem ser realizadas preferencialmente no campo, onde os sensores podem ser posicionados próximos uns dos outros, para que o ar amostrado tenha concentrações de poluentes semelhantes, conforme ilustrado na Figura 7. Este método tem importância crucial ao considerar aplicações que envolvem medições para determinar gradientes espaciais (por exemplo, identificação de pontos críticos e mapeamento da qualidade do ar). As colocalizações são normalmente conduzidas durante vários dias ou semanas. Também é importante avaliar o desempenho a partir da faixa esperada de poluição e das condições climáticas



quando as comparações baseadas em colocalização são realizadas.

Colocalização a Partir de um Monitor de Referência

Uma vez que os sensores tenham sido avaliados quanto à variabilidade intra-modelos, pelo menos um sensor deve ser calibrado em campo por meio da colocação de sensores adjacentes a um monitor de referência para confirmar que o ar amostrado possui concentrações semelhantes de poluentes, conforme ilustrado na Figura 6. Essas calibrações ajudam a determinar a precisão em relação à precisão da referência conhecida e constituem uma prova de que estão funcionando conforme esperado. O posicionamento dos sensores junto a um monitor de referência deve ser feito com todos os dispositivos por várias semanas no início do estudo (quando possível). Ao final do estudo, todos os sensores devem ser colocalizados novamente no ponto de referência. Alternativamente, há outros métodos de calibração usados por pesquisadores, tais como o método do “sensor de ouro” através do qual o sensor calibrado, (ou “de ouro”) é utilizado para calibrar os demais sensores no campo.

Manutenção Pós-Instalação

Calibração: Uma vez que os critérios de comparabilidade e precisão tenham sido estabelecidos durante o estágio de pré-instalação, os sensores implantados podem ser calibrados periodicamente (semanal ou mensalmente), ao posicionar o “sensor de ouro” junto aos demais sensores no campo. Esse método é chamado “calibração por transferência”. Alternativamente, cada um dos sensores instalados pode ser levado volta ao local de referência e ser calibrado em rotação.

Acurácia: As dados gerados pelos sensores também precisam ser revisados periodicamente. Qualquer anomalia precisa ser documentada e corrigida com alguma frequência para evitar aborrecimentos derivados do tratamento de dados volumosos. Para métodos de estimativa de exatidão, viés e precisão, consulte o Apêndice.

Validação de Dados: A validação de dados é uma etapa importante, anterior à análise que visa obter inferências definitivas. Ela requer interpretação visual dos dados não tratados para identificar padrões incomuns, discrepâncias, desvios e atraso na resposta do sensor. A validação dos dados deve ser realizada o mais rápido possível, com frequência diária ou semanal. Um esquema de validação deve ser planejado para uma avaliação rápida da qualidade dos dados e é especialmente importante no caso de cidades que não possuam dados históricos para fins de comparação.

Algumas das outras tarefas específicas de manutenção incluem:

- Assegurar a instalação adequada dos dispositivos sensores de ar;
- Limpeza do dispositivo;
- Substituição de insumos como baterias e outros acessórios (quando aplicável);
- Substituição dos sensores que estejam coletando dados incorretos ou aqueles que tenham ultrapassado seu tempo de vida útil;
- Acompanhamento qualquer obstrução física, como árvores e edifícios, que possam surgir à medida que o monitoramento avança;
- Criação (durante a instalação), manutenção e validação de um protocolo para que o registro das ações e uma metodologia sistemática sejam seguidos.





Referências

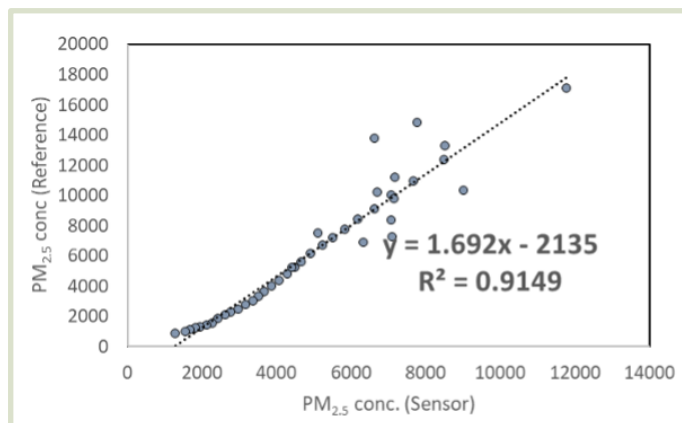
1. Vital Strategies 2020, Accelerating City Progress on Clean Air, Technical Guide. Visualizado em 19 de agosto de 2021, <https://www.vitalstrategies.org/resources/accelerating-city-progress-on-clean-air-innovation-and-action-guide/>
2. Martin RV, Brauer M, van Donkelaar A, Shaddick G, Narain U, Dey S. No one knows which city has the highest concentration of fine particulate matter. *Atmospheric Environ*. 2019 Jun 24;100040.
3. GBD Compare | IHME Viz Hub [Internet]. [Citado em 27 de junho de 2018]. Disponível em: <http://vizhub.healthdata.org/gbd-compare>
4. World Health Organization. Global Urban Ambient Air Pollution Database (Atualizado em 2016) [Internet]. WHO. 2016 [Citado em 21 de outubro de 2016]. Disponível em: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/cities/en/
5. WHO | Air quality guidelines - global update 2005 [Internet]. WHO. [Citado em 14 de setembro de 2016]. Disponível em: http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_agg/en/
6. United Nations Environment Program (UNEP). Actions on Air Quality: Policies & Programmes for improving Air Quality Around the World [Internet]. 2015 [Citado em 10 de setembro de 2019]. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/17203/AQ_GlobalReport_Summary.pdf?sequence=1&isAllowed=y
7. Chow JC, Watson JG, Feldman HJ, Nolen JE, Wallerstein B, Hidy GM, et al. Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards. *J Air Waste Manag Assoc*. 2007 Oct;57(10):1151-63.
8. Brauer, M., Guttikunda, S.K., Nishad, K.A., Dey, S., Tripathi, S.N., Weagle, C. and Martin, R.V., 2019. Examination of monitoring approaches for ambient air pollution: A case study for India. *Atmospheric Environment*, 216, p.116940.
9. Duvall, R., A. Clements, G. Hagler, A. Kamal, Vasu Kilaru, L. Goodman, S. Frederick, K. Johnson Barkjohn, I. VonWald, D. Greene, AND T. Dye. Performance Testing Protocols, Metrics, and Target Values for Fine Particulate Matter Air Sensors: Use in Ambient, Outdoor, Fixed Site, Non-Regulatory Supplemental and Informational Monitoring Applications. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/R-20/280, 2021.
10. ASTM WK64899, New Practice for Performance Evaluation of Ambient Air Quality Sensors and Other Sensor-Based Instruments, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, <https://www.astm.org>
11. Bachmann J. Managing Air Quality: Lessons from the American Experience. Collaborative Clean Air Policy Centre. 2019 Disponível em: <https://ccapc.org.in/policy-briefs/2019/us-experience-bachmann:14>
12. EPA (2021). A Guide to Siting and Installing Air Sensors. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors> (Accessed: 7th September, 2021)

Apêndice:

A. Abordagens para Medição de Viés, Exatidão e Precisão

Curvas de Calibração

As curvas de calibração podem ser geradas a partir dos dados de comparação baseada na colocação de sensores e monitores de referência. Uma análise de Regressão Linear Simples (SLR), conforme Figura A1, usando as leituras de dados não tratados para exatamente a mesma duração de monitoramento, pode ser usada para desenvolver fatores de calibração. Os fatores de calibração derivados das equações matemáticas também podem ser usados para corrigir os dados do sensor. Para uma calibração mais robusta, a Regressão Linear Múltipla (MLR) permite a inclusão de outros fatores que podem influenciar as medições de concentração de poluentes, tais como umidade e temperatura. É preciso observar que o fator de calibração pode mudar de acordo com as condições ambientais e exigir calibrações repetidas.



Equação de Calibração

$$y = 1,692x - 2135$$

Em que 'y' é a concentração de referência, 'x' é a concentração do sensor, '1,692' representa o desvio dos dados e **R²** é o coeficiente de determinação que denota a proximidade da interceptação da inclinação

Figura A1 Ilustração de uma curva de calibração para dados coletados por meio de colocação entre um sensor e um monitor de referência

Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

RMSE é uma medida de precisão do modelo de calibração que pode ser calculada usando concentrações previstas e de referência.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (p_i - y_i)^2}{n}}$$

Onde p_i é o valor individual previsto, y_i é o valor de referência individual e n é o número de pontos de dados no modelo.

Viés

O viés nos dados do sensor resulta em valores de concentração que não representam as concentrações verdadeiras. Trata-se de um erro sistemático na medição que resulta em concentrações mais altas ou mais baixas em todos os pontos de dados por conta de um valor de desvio fixo. O viés deve ser calculado periodicamente, preferencialmente sempre que a calibração for realizada. A Figura A1 mostra um gráfico de linhas representando a polarização nos dados do sensor.

O viés pode ser estimado através da seguinte fórmula:

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

em que B é o Viés, C é a concentração média do poluente medida pelo sensor e C_R é a concentração média do mesmo poluente medida pelo monitor de referência.

Precisão

A precisão dos dados aferidos demonstra a repetibilidade das concentrações quando o sensor é usado para coletar dados nas mesmas condições diversas vezes. A duração curta da medição, como o intervalo de 1 segundo, pode resultar em menor precisão, a qual pode ser corrigida até certo ponto agrupando os dados em médias de 5 minutos.

Em que P é a precisão, C_s é o desvio padrão das medições e C_m é a média da medição em uma concentração fixa.

$$P = \left(\frac{C_s}{C_m} \right)$$

B. Diretrizes Resumidas para Embasamento de Desenvolvimento e Avaliação de Licitação

Esta seção destina-se a embasar o desenvolvimento de avaliações e áreas técnicas de uma solicitação de proposta (RFP) para uma rede de sensores de ar. Ela fornece uma estrutura de amostra e critérios de amostra necessários para solicitar e avaliar as qualificações, experiência e respostas recebidas do fornecedor. Estão incluídas listas de verificação para tarefas, serviços e recursos que uma autoridade reguladora pode vir a solicitar. O modelo de amostra pode ser usado como ponto de partida a ser adaptado de acordo com os objetivos e o contexto do projeto.

Critérios de Avaliação da Proposta

Os seguintes critérios podem ser usados para avaliar as propostas submetidas

1. Extensão dos serviços e suporte cobertos;
2. Desempenho e experiência demonstrados em contexto relevante;
3. Histórico de atendimento no país/região;
4. Período de garantia e tempo de resposta para reparos/substituições;
5. Qualidade dos dados e facilidade de acesso; e
6. Custos gerais.

Qualificações e Experiência do Fornecedor

Experiência anterior

1. Liste projetos anteriores realizados com capacidade semelhante
2. Para cada projeto, inclua na proposta:
3. Descrição resumida
 - a. Nome e informações de contato da organização/cliente
 - b. Datas de serviço
 - c. Relatórios ou publicações resumidas
 - d. Há permissão para entrar em contato com o cliente? Sim Não

Demonstração de Desempenho

Os candidatos podem incluir as seguintes informações como demonstração de desempenho anterior:

- Publicações revisadas por pares
- Relatórios ou informes de organizações independentes
- Certificação de tecnologia de sensores com base em padrões de desempenho emitidos por agências governamentais e associações
- Evidência de desempenho do sensor em condições semelhantes de poluição e clima (conforme descrito na SOW)
- Evidência de avaliação de desempenho do sensor por uma organização confiável
 - A avaliação inclui uma avaliação de campo?
Sim Não
 - Liste o(s) nome(s) da organização de avaliação
 - Especifique a data e o período de tempo de cada avaliação

Experiência de Pessoal

Descreva na proposta a experiência do corpo de funcionários para cada nível de serviço de suporte oferecido.

Locais de atendimento e suporte ao cliente

Liste os locais e as informações de contato dos escritórios locais e regionais, juntamente com o tempo de resposta esperado para reclamações e substituições.

Informações potenciais para a Declaração de Trabalho (SOW)

(A ser preenchido pela organização emissora da RFP)

Antecedentes e Objetivos

- Local geral do estudo _____
- Objetivo da rede _____
- Duração do estudo _____
Observação: Normalmente, a duração mínima necessária para medir uma série de condições, em diferentes estações, é de 12 a 24 meses. Alternativas para extensão do período do estudo podem ser consideradas.
- Poluentes a ser medidos _____
- Número de sensores _____
- Localização dos pontos de instalação (quando disponível) _____
- Dados auxiliares necessários (clima, emissões, etc.) _____

Especificações do Sensor

Assinale as alternativas para as quais as informações de suporte são fornecidas/o serviço está incluído e forneça detalhes adicionais na proposta.

- Desempenho do Sensor
 - Especifique o viés, a precisão, a correlação e o erro quadrático médio (RMSE) e forneça dados de apoio como parte da proposta
Viés _____
Precisão _____
Coeficiente de correlação mínimo (com grau de referência) _____
RMSE _____
 - Observação: Os requisitos para os parâmetros acima são os seguintes (a ser preenchidos com base nos requisitos do projeto):
Viés Máx. _____
Precisão Mín. _____
Coeficiente de correlação mín. (com grau de referência) _____
RMSE Máx. _____
- Tempo de atividade do sensor
 - Especifique a completude média dos dados do sensor _____
Forneça dados de apoio como parte da proposta
 - Observação: O requisito mínimo de completude de dados é de 75%, ou seja, o sensor de ar deve funcionar e produzir dados válidos por ao menos 75% do tempo total de operação
- Calibração de dados
 - Descreva na proposta como os dados serão calibrados _____
 - Especifique a frequência e o processo de calibração de dados _____
- Energia e telecomunicações
- Como o sensor de ar é alimentado?
(Assinale todas as alternativas aplicáveis)
 - Solar _____
 - Principal _____
 - Bateria _____
- Para baterias internas, inclua o tempo necessário para uma carga completa _____

Como os dados serão transmitidos?

(Assinale todas as alternativas aplicáveis)

- Wi-Fi _____
Custo coberto pelo fornecedor Sim Não
- Celular _____
Custo coberto pelo fornecedor Sim Não
- Outras especificações
 - Especifique a resolução temporal dos dados
Observação: o tempo mínimo de frequência necessário é de 1 minuto
 - Especifique o formato dos dados armazenados
Observação: Os dados devem estar em um formato legível por máquina (por exemplo, csv)
 - Toda a infraestrutura de suporte, ou seja, instalação, montagem, hardware de suporte deve ser incluída no orçamento.
 - O sensor deve ser à prova de intempéries e capaz de operar em condições de frio e chuva.
 - O fornecedor deve incluir um guia do usuário e um manual atualizados, que cubra as etapas de instalação, operação, acesso aos dados e reparos.

Serviços de Instalação

Assinale a(s) alternativa(s) apropriada(s) para os serviços prestados

- Pontos de instalação: O fornecedor selecionará os pontos de instalação com base nas especificações do projeto e será responsável por configurar a energia e a infraestrutura de suporte, desenvolver acordos de acesso e assegurar condições mínimas de segurança e acesso seguro. O local selecionado para instalação deve ser representativo da qualidade do ar na área em questão e receber interferência mínima do entorno.
- Colocalização junto a um ponto de referência: O fornecedor deverá configurar e operar os sensores de ar próximos a um ponto de referência antes do início do projeto. Quaisquer sensores que não atendam às especificações deverão ser substituídos pelo fornecedor.
- Instalação no local: O fornecedor irá configurar e instalar os sensores no local determinado. O fornecedor será responsável pela infraestrutura necessária para instalação no local determinado. O fornecedor deverá confirmar que cada sensor está operando corretamente após a instalação no local e documentar as condições do local, localização e elevação.

Principais Considerações para Desenvolvimento e Avaliação de RFP

- Certifique-se de que a proposta de um fornecedor descreva quais serviços de suporte estão incluídos (ou não incluídos) em seu preço.
- Os fornecedores também devem informar o custo de substituição e serviços caso o projeto ultrapasse o período de garantia.
- Prefira fornecedores que tenham suporte ao cliente localmente e assegurem um tempo de resposta mais ágil para substituição e realização de reparos (visando garantir a qualidade dos dados).
- Informe-se sobre serviços adicionais que os fornecedores possam fornecer (tais como escolha de pontos de instalação, colocação junto a um ponto de referência e instalação de sensores no local).
- Os fornecedores devem disponibilizar evidências de verificação/avaliação de seu produto SBC por organizações independentes e confiáveis.
- Os fornecedores devem disponibilizar dados de avaliações realizadas em configurações comparáveis para embasar suas declarações sobre desempenho no campo. Isso visa assegurar evidências de desempenho do SBC sob condições semelhantes de poluição e climaperformance under similar pollution and weather conditions.
- Os fornecedores não devem submeter protótipos ou modelos experimentais.

Serviços de manutenção e garantia

- Especifique o período de garantia (mínimo de 12 meses)
- Especifique o custo da garantia adicional _____

Assinale as alternativas para os serviços incluídos no período de garantia

- Manutenção periódica no local.
Especifique com que frequência a manutenção será realizada _____
- Custos de substituição do sensor (transporte, instalação, etc.)
Especifique o tempo de resposta para reparos e substituição _____
Os custos de envio estão incluídos na garantia?

Serviços de Dados

Assinale a(s) alternativa(s) apropriada(s) para os serviços incluídos

Observação: Os dados devem estar em um formato legível por máquina (por exemplo, csv)

- Sistema de gerenciamento de dados
Descrever o sistema de gerenciamento de dados na proposta _____
- Portal de dados baseado em web
 - Especifique o número máximo de usuários (quando houver) _____
 - O portal é: Público Privado Ambas as opções estão incluídas
- Serviços de calibração de dados
 - Especifique a frequência de calibração _____
 - Descreva como os dados não tratados e calibrados serão armazenados/acessados (na proposta) _____
- Aplicativo móvel
 - O aplicativo é: Público Privado Ambas as opções estão incluídas
 - O aplicativo móvel é compatível com: Android iOS Ambos
- Retenção de Dados
 - Especifique por quanto tempo os dados serão armazenados _____
 - Descreva como os dados serão armazenados/acessados (na proposta)
- Verificações de qualidade (obrigatório)
 - Descreva o protocolo de verificação de controle de qualidade (na proposta)
- Alarmes e alertas
 - Descreva os tipos de alertas disponíveis (e.g., e-mails/mensagens de texto enviados quando o sensor desliga ou em caso de altas concentrações).
- Interface de Programação de Aplicativos

Serviços de Treinamento

- Especifique se o treinamento é remoto ou presencial
Quanto tempo é necessário para o treinamento?

- É necessário viajar?

Assinale a(s) alternativa(s) apropriada(s) para os treinamentos fornecidos:

- Instalação, operação e manutenção do sensor de ar
- Acesso aos dados
- Recursos e funções do portal da web
- Procedimentos e métodos de calibração
- Protocolos de colocação
- Outro. Especifique _____

Atendimento ao Cliente

Assinale a(s) alternativa(s) apropriada(s) para o suporte oferecido ao cliente:

- Atendimento de plantão
Forneça informações de contato

- Assistência 24 horas
Forneça informações de contato

- Revisão e análise de dados





Uso Integrado de Sensores de Baixo Custo
para Fortalecer a Gestão da Qualidade do Ar

