



Plataforma de aquisição de dados para avaliação da qualidade do ar interior: Desenvolvimento e aplicação

Matheus de Oliveira Prestes

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por

Professor Doutor Getúlio Igrejas

Professor Doutor Manuel Feliciano

Professor Doutor Laércio Mantovani Frare

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Bragança

2018

RESUMO

A aferição e controlo das características físicas, químicas e biológicas em ambientes interiores é de extrema relevância na avaliação da saúde pública, dada a sua associação a doenças respiratórias e cardíacas, nomeadamente no que diz respeito à fração respirável do material particulado (PM_{2,5}). É ainda comum encontrar uma qualidade do ar não homogénea nestes espaços, seja pela distribuição não uniforme das fontes de poluentes, do número de ocupantes, dos aspetos construtivos ou pelas diferentes taxas de ventilação. Uma compreensão abrangente e sistemática deste assunto envolve o estudo de fenómenos esporádicos e sazonais e implica a necessidade de escalas temporais e espaciais de monitorização nem sempre simples de se alcançarem, essencialmente, devido aos custos elevados, à baixa portabilidade e à dificuldade operacional de alguns equipamentos de medição disponíveis. Contudo, estas dificuldades promovem a expansão de dispositivos *low-cost*, com custos reduzidos e dimensões significativamente inferiores. Este trabalho teve por objetivo a construção de um equipamento capaz de contribuir para ampliar o conhecimento da qualidade do ar em ambientes interiores. O protótipo obtido incorpora sensores que quantificam a temperatura, a humidade relativa, a concentração de dióxido de carbono e as concentrações de PM_{2,5} e PM₁₀. A sua fiabilidade foi aferida através de estudos de intercomparação e análises de correlação (Índice de Concordância de Willmott (d), Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e Coeficiente de Determinação (R²)) com dados obtidos por equipamentos de elevada precisão e exatidão. Nesta avaliação foram conduzidos 4 ensaios num espaço laboratorial do Instituto Politécnico de Bragança. Cada ensaio teve uma duração de 24 horas e os registos foram obtidos com uma frequência de 1 minuto. Os resultados obtidos apresentam uma elevada correlação entre as concentrações de material particulado analisadas (PM_{2,5}), onde d= 0,918, r= 0,943 e R²= 0,889 para a situação de maior distanciamento entre os dados e d= 0,983, r= 0,994 e R²= 0,972 para a situação de maior proximidade. Para concentração de dióxido de carbono foi verificada uma correlação muito forte (> 0,9) para todas análises estatísticas conduzidas, e para temperatura e humidade relativa, apesar das correlações não apresentarem valores elevados em todas as análises, o desvio entre equipamentos não foi superior a 1,6°C para temperatura e 5,9% para humidade relativa, o que sugere a aplicabilidade do equipamento desenvolvido na verificação dos parâmetros estudados na qualidade do ar interior.

ABSTRACT

Measurement and control of physical, chemical and biological characteristics in indoor environments is considered a subject with extreme relevance in the evaluation of public health, given its association with respiratory and cardiac diseases, especially with regard to the respirable fraction of the particulate matter (PM_{2.5}). Moreover, it is still common to find an inhomogeneous air quality in these spaces, either by the unequal distribution of sources of pollutants, number of occupants, constructive aspects or by different ventilation rates. A comprehensive and systematic understanding of this topic involves the study of sporadic and seasonal phenomena and implies the need of temporal and spatial monitoring scales not always simple to achieve, mainly due to the high costs, the low portability and the operational difficulty of some available measuring equipment. These difficulties promote the expansion of low-cost devices, with reduced costs and lower dimensions. The objective of this work aimed at constructing an equipment capable to improve the knowledge about indoor air quality. The prototype incorporates sensors that quantify the temperature, relative humidity, and concentrations of carbon dioxide, PM_{2.5} and PM₁₀. Its reliability was assessed through inter-comparison studies and correlation analyzes (Willmott's Concordance Index (d), Pearson's Correlation Coefficient (r) and Determination Coefficient (R²)) with data obtained by equipment of high precision and accuracy. In this evaluation, 4 trials were conducted in a laboratory space of the Polytechnic Institute of Bragança. Each trial lasted 24 hours and the data was logged at a frequency of 1 minute. Main results show a high correlation for particulate matter (PM_{2.5}), with $d = 0.918$, $r = 0.943$ and $R^2 = 0.889$ for the worst situation and $d = 0.983$, $r = 0.994$ and $R^2 = 0.972$ for the best one. For carbon dioxide a very strong correlation (> 0.9) was identified for all statistical parameters used in the evaluation. For temperature and relative humidity, although correlations have been weaker, the bias between data from both equipments were less than 1.6°C for temperature and 5.9% for relative humidity, which suggests the good applicability of the prototype in the evaluation of the studied in indoor air quality parameters.

ÍNDICE

RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE.....	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	2
2. QUALIDADE DO AR INTERIOR E MATERIAL PARTICULADO.....	4
2.1. BREVE INTRODUÇÃO À QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	4
2.2. MATERIAL PARTICULADO EM AMBIENTES INTERIORES.....	6
2.2.1. DEFINIÇÕES.....	6
2.2.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	7
2.2.3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MECANISMOS DE FORMAÇÃO.....	8
2.2.4. FONTES DE MATERIAL PARTICULADO DE AMBIENTE INTERIOR.....	9
2.2.5. FATORES INTERFERENTES NOS NÍVEIS E NA DINÂMICA DE VARIAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO.....	12
2.2.5.1. Ventilação.....	12
2.2.5.1. Temperatura e Humidade Relativa.....	13
2.2.5.2. Condições económicas e sociais.....	13
2.2.6. PATOLOGIAS ASSOCIADAS À EXPOSIÇÃO AO MATERIAL PARTICULADO	
15	
2.2.7. PRINCÍPIOS, MÉTODOS E TECNOLOGIAS ENVOLVIDOS NA MEDIÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO.....	16
2.2.7.1. Princípios de amostragem.....	16
2.2.7.2. Métodos e tecnologias para análises quantitativas.....	17
2.2.7.3. Funcionamento e utilização de sensores de baixo custo.....	19

2.2.8. INSTRUMENTOS LEGAIS	21
3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	24
3.1. SENSORES	24
3.1.1. MATERIAL PARTICULADO	24
3.1.2. TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA	25
3.1.3. DIÓXIDO DE CARBONO	26
3.2. DISPOSITIVO DE PROCESSAMENTO DE DADOS	27
3.3. DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO, VISUALIZAÇÃO E ENVIO DE DADOS	27
3.4. ANÁLISE DE CUSTOS	28
4. APLICAÇÕES PRÁTICAS DO SISTEMA CONSTRUÍDO	30
4.1. LOCAL DE ESTUDO	30
4.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	31
4.3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO PROTÓTIPO	32
4.4. ENSAIOS DE INTERCOMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO	33
5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO PROTÓTIPO	38
5.1. MATERIAL PARTICULADO	38
5.2. TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA	44
5.3. DIÓXIDO DE CARBONO	47
6. CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO 1	64
ANEXO 2	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição da massa relativa das partículas em função do tamanho.....	8
Figura 2- Principais fontes em ambientes interiores de material particulado.....	10
Figura 3- Esquema básico do funcionamento dos equipamentos que utilizam a tecnologia de dispersão de luz	19
Figura 4- Comparação entre as concentrações de PM ₁₀ obtidas por um equipamento referência e um <i>low cost</i>	20
Figura 5- Limiares legais e estabelecidos por organizações internacionais.	22
Figura 6- Arquitetura do sistema construído	24
Figura 7- Sensores SDS011 e SEN0177 responsáveis pela quantificação de material particulado.	25
Figura 8- Sensor de temperatura e humidade relativa DHT11.....	26
Figura 9- Sensor de dióxido de carbono K30.....	26
Figura 10- Microcontrolador MEGA 2560	27
Figura 11- Equipamentos utilizados para armazenamento e visualização da informação recolhida.	28
Figura 12- Localização do espaço laboratorial onde os ensaios foram realizados.....	30
Figura 13- Equipamentos utilizados como “referência” na avaliação do protótipo.....	31
Figura 14- Fontes de poluição utilizadas nos ensaios de medição de parâmetros da QAI.....	35
Figura 15- Disposição dos equipamentos no ambiente onde ocorreram os ensaios.....	36
Figura 16- Concentrações médias horárias de PM _{2,5} obtidas pelos dois sistemas utilizados nos diferentes ensaios.....	39
Figura 17- Concentrações obtidas pelo equipamento Thermo ADR-1200S versus sensores incorporados ao sistema no ensaio 3	41
Figura 18-Média horária das temperaturas e humidades relativas observadas para os diferentes ensaios experimentais.....	45
Figura 19- Concentrações médias horárias de dióxido de carbono obtidas pelos dois sistemas, para os diferentes ensaios laboratoriais	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais poluentes presentes em ambientes interiores.....	5
Tabela 2- Características técnicas e custo dos sensores escolhidos.	25
Tabela 3- Custos associados a aquisição dos equipamentos	29
Tabela 4- Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o comportamento do protótipo	32
Tabela 5- Características principais dos ensaios realizados.	34
Tabela 6- Parâmetros estatísticos relativos às concentrações de PM _{2,5} obtidas nos diferentes ensaios	41
Tabela 7- Parâmetros estatísticos usados na avaliação do comportamento do protótipo referente à medição de PM _{2,5}	43
Tabela 8- Erros relativos médios apresentados para os sensores de material particulado em função da faixa de concentração.....	44
Tabela 9- Parâmetros estatísticos relativos à temperatura e humidade relativa	46
Tabela 10- Parâmetros estatísticos usados na avaliação do comportamento do protótipo relativamente à medição da temperatura e da humidade relativa.....	47
Tabela 11- Parâmetros estatísticos relativos às concentrações de CO ₂ obtidas nos diferentes ensaios	49
Tabela 12- Parâmetros estatísticos usados na avaliação do comportamento do protótipo referente à medição de CO ₂	49

ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar condicionado)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente negativo de temperatura)
PM	<i>Particulate Matter</i> (Material particulado)
PTS	Partículas Totais em Suspensão
QAI	Qualidade do Ar Interior
TRA	Taxa de Renovação de Ar
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (Agência de proteção Ambiental dos Estados Unidos)
WHO	<i>World Health Organization</i> (Organização Mundial da Saúde)

1. INTRODUÇÃO

Os estudos técnico-científicos e a consciencialização referentes à qualidade do ar interior (QAI) apresentaram um crescimento considerável nas últimas 4 décadas, evoluindo em termos de terminologia, manuais e guias e do enquadramento legal (ASHRAE, 2011; WHO, 2010).

A QAI consiste numa caracterização abrangente de fatores associados ao ar presente no interior de construções, podendo ser interpretado como a interação entre a concentração de poluentes, o clima e a cultura observados nestes espaços. O clima nos ambientes interiores é ainda definido com base na temperatura, humidade relativa, taxas de ventilação e outros fatores (Fernandes *et al.*, 2008).

Uma baixa taxa de renovação de ar (TRA), somada à elevada ocupação em ambientes interiores, tendem a promover uma QAI deficiente, de modo a encontrar nestes sítios elevadas concentrações de poluentes. Estes poluentes podem ser produtos químicos, gases ou organismos vivos, como bactérias e fungos. De facto, o ar que respiramos em nossas casas, nas escolas e nos escritórios pode colocar-nos em situações de risco para a saúde.

Muitos estudos apontam ainda para outros poluentes com incidência negativa na saúde pública, como é o caso das frações finas ou ultrafinas de material particulado, poluente este que pode ainda apresentar em sua composição a presença de componentes químicos ou biológicos (Logue *et al.*, 2011; WHO, 2010). A preocupação relativa à presença de material particulado nos ambientes interiores, no entanto, remonta a um histórico com pouco mais de 4 décadas, apresentando as primeiras exigências legais apenas no fim da década de 70 (Jones, 1999).

Contudo, são observadas dificuldades técnicas e financeiras relacionadas com a utilização de equipamentos de medição robustos para avaliar os parâmetros da QAI, seja pelos custos elevados, baixa mobilidade e complexidade de operação. Por conta disto, a utilização de sensores *low cost* de dimensões e custos significativamente reduzidos tem sido uma opção muito explorada. Atrai-se ainda outras vantagens a estes equipamentos: possibilidade de uma maior análise espaço-temporal, facilidade de uso e baixo consumo energético (Mukherjee *et al.*, 2017).

Trabalhos que visam a conceção e a verificação da fiabilidade destes equipamentos podem ser morosos e ainda se encontram em fase de exploração (Castell *et al.*, 2017).

O presente estudo surge neste contexto, com o objetivo de construir um protótipo funcional de um equipamento, que permita a expansão dos conhecimentos associados a parâmetros específicos da QAI, como temperatura, humidade relativa, concentração de dióxido de carbono (CO₂) e de material particulado, capaz de permitir alcançar resoluções espaço-temporais hoje inviáveis técnica e financeiramente. Etapas intermédias, como aquisição dos sensores, elaboração do algoritmo e a construção, são imprescindíveis na obtenção de um resultado positivo.

A tese está estruturada em capítulos e nos seus respetivos subcapítulos. Ao iniciar a leitura encontrar-se-á uma breve introdução que contextualiza os tópicos principais do estudo e onde se identifica os principais objetivos do trabalho. O capítulo 2, intitulado Qualidade do Ar Interior e Material Particulado, conta com informação abrangentes acerca dos objetos observados ao decorrer deste trabalho. Informações acerca do equipamento construído ao decorrer deste trabalho podem ser encontradas no capítulo 3. No capítulo 4 são descritos os ensaios realizados. Todos resultados obtidos, bem como a discussão dos mesmos, encontram-se no capítulo 5. Por fim, as conclusões são encontradas no capítulo 6.

2. QUALIDADE DO AR INTERIOR E MATERIAL PARTICULADO

Este capítulo de revisão da literatura está centrado na poluição do ar interior por partículas em suspensão. O capítulo inicia-se com uma breve introdução à problemática da qualidade do ar interior, passando depois a focar os aspetos relacionados ao material particulado, nomeadamente as suas principais características, a sua dinâmica em ambientes interiores e os seus efeitos na saúde do Homem.

2.1. BREVE INTRODUÇÃO À QUALIDADE DO AR INTERIOR

A QAI refere-se comumente às características do ar contido no interior dos edifícios e que podem influenciar a saúde, o conforto ou o desempenho no trabalho dos ocupantes. Apesar de haver uma maior consciência para os problemas da poluição do ar ambiente (exterior), o ar interior pode apresentar-se muito mais poluído (Madureira *et al.*, 2012).

As principais características da QAI incluem as concentrações de poluentes, bem como a temperatura e a humidade do ar. A taxa de ventilação é também considerada uma condição de QAI, devido à sua forte influência na concentração de muitos poluentes do ar interior (Fernandes *et al.*, 2008).

Os poluentes comumente encontrados no ar interior podem apresentar-se na forma de gases, vapores ou partículas em suspensão. Usualmente, estes poluentes têm como origem o fumo de tabaco, sistemas de combustão, libertação por fungos ou bactérias, o chumbo (presente no pó doméstico), substâncias químicas voláteis (e.g. o formaldeído e outros compostos orgânicos voláteis) emitidos por alguns produtos de construção, mobiliário e produtos de consumo. As pessoas também são fontes de poluentes do ar interior, através da libertação de gases odoríferos e dióxido de carbono (Habre *et al.*, 2013). Das contribuições externas têm-se o ozono, um componente gasoso reativo da poluição do ar externo, e partículas muito pequenas.

Um grupo de estudos da Organização Mundial da Saúde definiu em 2006 uma gama de 10 poluentes tidos como prioritários, com base em parâmetros por eles estipulados (WHO,

2010). Por outro lado, um estudo conduzido por membros do Departamento de Ambiente Interno Norte Americano apontou 9 poluentes como sendo prioritários, tendo parâmetros semelhantes ao estudo anteriormente mencionado, porém com uma área de estudo menos abrangente (Logue *et al.*, 2011). Vale ressaltar que 5 poluentes foram identificados em ambos estudos, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. A fração fina de material particulado, objeto central deste estudo, é um dos poluentes de maior relevância na maior parte dos ambientes interiores.

Tabela 1- Principais poluentes presentes em ambientes interiores

Indoor Environment Department	World Health Organization
Benzeno	Benzeno
Naftaleno	Naftaleno
Dióxido de azoto	Dióxido de azoto
PM_{2,5}	PM_{2,5} e PM₁₀
Formaldeído	Formaldeído
Acetildeído	Monóxido de Carbono
Acroleína	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
1,3 Butadieno	Radão
1,4 Diclorobenzeno	Tricloroetileno
	Tetracloroetileno

Fonte: Adaptado de (Logue *et al.*, 2011; World Health Organization, 2010)

Segundo a USEPA (2016), a baixa qualidade do ar interior está entre os cinco principais riscos ambientais. A exposição a poluentes do ar interior pode causar tonturas e dores de cabeça em quadros mais simples à alergias e asma em quadros mais complexos. Apesar dos problemas relacionados a QAI deficiente estarem amplamente documentados e disponíveis, muitos projetos de construção de edifícios são feitos sem levar em consideração as consequências potencialmente graves resultantes da exposição de curto ou longo termo a níveis deficitários de QAI. De acordo com a ASHRAE (2009), na maioria dos casos, a QAI ainda não é um fator prioritário na fase de projeto ou uma preocupação na fase de gestão de edifícios em relação à função, custo, espaço, estética e outros atributos.

Uma melhoria na QAI em edifícios pode, por isso, implicar no beneficiamento do bem-estar dos ocupantes. Uma boa QAI carrega ainda numerosos e valiosos benefícios, como a melhora da saúde e a produtividade dos ocupantes, redução do absenteísmo, elevação dos

níveis de aprendizagem e o desempenho dos alunos, entre muitos outros aspetos (Lennox, 2016). As concentrações dos poluentes são também dependentes de diversos fatores, como as concentrações observadas no exterior, das taxas de emissão intrínsecas as fontes internas e das taxas de remoção dos poluentes, seja através da ventilação natural ou mecânica (com ou sem filtração) seja por processos naturais, como a deposição de poluentes.

2.2. MATERIAL PARTICULADO EM AMBIENTES INTERIORES

2.2.1. Definições

O material particulado (PM) é basicamente definido como uma mistura complexa de elementos, composta por partículas sólidas extremamente pequenas e/ou gotículas de líquidos, que se difundem no ar e podem vir a ser inalados juntamente com a porção gasosa deste (USEPA, 2015).

Tomasi e Lupi (2016) usam uma definição similar para o aerossol atmosférico, diferenciando-a apenas pelo acrescento de algumas informações, como a exclusão da água pura deste conjunto e a condição de que a partícula deve possuir um tempo mínimo de suspensão na atmosfera de 1 hora. Dockery e Pope (1994), por sua vez, definem este termo como sendo não somente as partículas, mas também todo o ambiente gasoso envolvente. Boucher (2015), no entanto, denomina como partículas de aerossol apenas as partículas suspensas na atmosfera, excetuando desta definição a porção gasosa.

Os efeitos adversos na saúde pública, no ambiente e no clima apresentam uma dependência com as características físicas e químicas deste poluente (Van Dingenen *et al.*, 2004). Devido à heterogeneidade e à singularidade de cada partícula, se faz então necessária a classificação destas, que pode ser definida com base em diversas propriedades, como características físicas, composição química, mecanismos de formação ou outra característica que possa vir a ser útil para a área de estudo (Boucher, 2015).

2.2.2. Características físicas

As características físicas das partículas dispersas na atmosfera são importantes fatores que se correlacionam de maneira muito efetiva com a saúde humana, como a área de superfície (Biswas *et al.*, 2008) e o tamanho, que pode variar de alguns nanômetros até vários micrômetros (Obaidullah & Bram, 2012).

Quando levado em conta a dimensão de cada partícula, é usual a utilização dos diâmetros aerodinâmicos equivalentes. Tal propriedade não se refere simplesmente ao diâmetro geométrico e isto se dá por conta das formas irregulares comumente encontradas em cada partícula. Dessa maneira, emprega-se então a utilização desta propriedade, onde se atribui à partícula em questão o diâmetro geométrico de uma esfera de densidade unitária ($1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) que apresenta a mesma velocidade de sedimentação (Dockery e Pope, 1994; Ruzer e Harley, 2005).

A utilização dos diâmetros aerodinâmicos equivalentes como critério de classificação é tida como a mais conveniente pela sua influência nos mecanismos de dispersão, respiração e associação às componentes químicas e fontes das partículas. Pode-se após a classificação das partículas promover a separação destas em intervalos, que são definidos por PM_x , sendo as letras capitulares siglas do inglês *particulate matter* e “x” um índice em μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), que consiste num diâmetro aerodinâmico máximo do intervalo, onde pelo menos 50% das partículas devem apresentar diâmetro aerodinâmico inferior a este valor (ESMAP, 2011; WHO, 2000).

No entanto, outras denominações de classes quanto ao tamanho podem surgir, mas são facilmente adaptadas às classes PM_x . As partículas ultrafinas, por exemplo são equivalentes a partículas $\text{PM}_{0,1}$, partículas finas $\text{PM}_{2,5}$, partículas grosseiras PM_{10} e partículas totais em suspensão (PTS) PM_{30} (Hinds, 1999; Slezakova *et al.*, 2013).

Em áreas referentes aos efeitos do material particulado na saúde pública é comum ainda encontrar a terminologia *partículas inaláveis*, que nada mais são do que aquelas suficientemente pequenas para penetrar no sistema respiratório, correspondendo às PM_{10} (Brown *et al.*, 2013). A Figura 1 ilustra a contribuição em massa relativa do material particulado presente na atmosfera em função do diâmetro aerodinâmico, ou seja, a

contribuição percentual (mássica) de PM de um diâmetro aerodinâmico específico no total da massa de partículas amostradas.

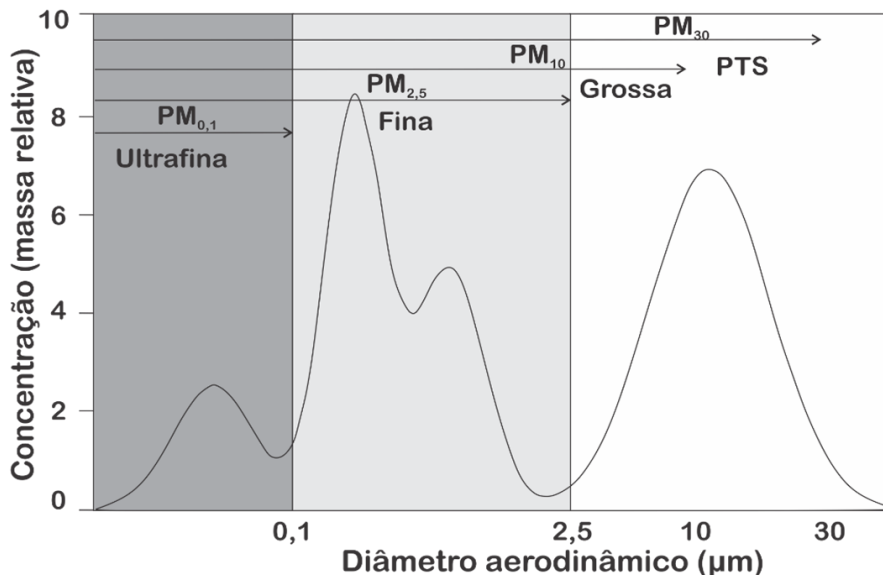


Figura 1- Distribuição da massa relativa das partículas em função do tamanho.
Fonte: Adaptado de Slezakova *et al.*, (2013)

2.2.3. Composição química e mecanismos de formação

Assim como as características físicas, a composição química de uma amostra de material particulado pode auxiliar na determinação da fonte e dos impactos potenciais no ambiente e na saúde humana (Putaud *et al.*, 2004). De entre a vasta abundância de componentes suspensos na atmosfera se pode comumente encontrar frações de componentes orgânicos (volátil ou particulado), inorgânicos ou biológicos (Turnbull e Harrison, 2000).

As amostras, no entanto, tendem a apresentar diferenças significativas em relação ao espaço e tempo. Um estudo conduzido na cidade de Riyadh da Arábia Saudita, por exemplo, identificou material particulado com 21,5% de metais na sua composição. Composições diferentes foram registradas em aerossóis de cidades vizinhas ou até mesmo em duas estações diferentes na mesma cidade (Alharbi, Shareef, & Husain, 2015). Uma mesma análise, porém numa sala de aulas de uma escola primária em Munique apresentou elevadas concentrações de minerais e cálcio (Fromme *et al.*, 2008).

A composição química pode ser correlacionada com os impactos na saúde humana, conforme acima mencionado. Entre os anos de 2000 e 2007 foi constatado um declínio na concentração de material particulado fino em 545 municípios dos Estados Unidos da América,

que apresentou uma relação direta ao acréscimo da expectativa de vida local. A correlação apresentou, no entanto, melhores relações quando analisada a redução das concentrações de PM com composições químicas específicas, nomeadamente daquelas que apresentavam a presença de sulfato, amónio e iões de sódios (Dominici *et al.*, 2015).

Ainda se pode classificar as partículas de acordo com os seus mecanismos de formação, sendo consideradas partículas primárias as que são emitidas diretamente por fontes naturais ou antropogénicas e que possuem as suas características originais ainda preservadas, as secundárias, no entanto, são as que resultam de interações de poluentes primários durante o seu período de permanência na atmosfera, sofrendo alterações nas suas propriedades físico-químicas originais (Godish, 2004).

As reações podem dar-se por meio da evaporação de espécies de vapor presentes nas moléculas dispersas ou ainda através da condensação sobre a superfície das partículas. Em condições de elevada humidade relativa as partículas podem absorver o vapor d'água enquanto em cenários de baixa humidade pode ocorrer o dessecamento das partículas através de uma nova volatilização da porção aquosa (Albuquerque, 2010).

A colisão entre partículas pode ocasionar a coagulação, que consiste na transformação de duas ou mais destas numa única de massa e volume igual à soma das parcelas, reduzindo desta forma o número de pequenas partículas e aumentando a porção de partículas maiores (Landgrebe e Pratsinis, 1990).

Por conta destes mecanismos, se atribui à classe de materiais particulados finos duas subclasses, chamadas fase de nucleação e de acumulação. A primeira corresponde a partículas que possuem diâmetros aerodinâmicos inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ e apresentam curto período de vida, devido à sua elevada reatividade e serem amplamente alteradas através da coagulação de partículas da fase de acumulação, que apresentam diâmetros entre $0,1$ e $2,5 \mu\text{m}$ (Slezakova *et al.*, 2013).

2.2.4. Fontes de material particulado de ambiente interior

A ocupação humana ocorrida em regiões de baixas temperaturas é algo recente quando observado na escala evolutiva. Segundo Sundell (2004), locais como o norte da Europa, Japão e América do norte passaram a contar com a presença do Homem entre 40 e 10 milénios atrás,

tendo de se adaptar nas vestimentas, hábitos e inclusive utilizar fontes de calor para permitir a sobrevivência. Como reflexo, a utilização de lareiras abertas tornou-se comum desde então, constituindo ainda hoje uma das maiores fontes de poluição de ambientes interiores em regiões menos desenvolvidas (Sundell, 2004; WHO, 2016). Sabe-se que os impactes causados por esta atividade são percebidos há mais de 5 séculos (Anderson, 2009).

Outras diversas atividades realizadas corriqueiramente nos ambientes interiores são também responsáveis pela geração de contaminantes. A utilização de uma chama de fogão a gás, ativação de sistemas de controlo de temperatura (principalmente os que utilizam combustão gases ou biomassa), fumar, utilização de produtos de higiene pessoal e de limpeza (Afshari *et al.*, 2005).

Contribuições significativas estão também associadas a ressuspensão de partículas e a produção direta pelos seres humanos pela perda de partículas de pele e de roupa (Licina *et al.*, 2017). Fontes menos usuais podem apresentar também grandes riscos, como: Tinturas novas, papéis de parede e carpetes (Mendell, 2007).

As principais contribuições dos espaços interiores podem ser observadas na Figura 2.



Figura 2- Principais fontes em ambientes interiores de material particulado.
Fonte: Adaptado de USDE (2016)

2.4.4. Contribuição das fontes de material particulado de ambientes exteriores

Como já referido anteriormente, uma porção do material particulado existente nos ambientes interiores provém do ambiente exterior, onde se estima que, globalmente, 25% das $PM_{2,5}$ presente nas regiões urbanas são emitidas pelo tráfego automóvel, juntando-se aos 15% das atividades industriais e 20% da combustão doméstica. Cerca de 22% são ainda atribuídos a fontes antropogénicas não especificadas e apenas 18% como contribuição natural (Karagulian *et al.*, 2015). No entanto, apesar de um mesmo poluente poder ser encontrado em ambientes exteriores e interiores, o aerossol interior e o aerossol exterior podem apresentar diferenças significativas entre si (Chatoutsidou *et al.*, 2015).

Num estudo de Abt *et al.* (2000) foi constatado que entre 63 e 92% das partículas entre 0,02 e 0,3 μm eram oriundas de fontes exteriores. Em contrapartida, Kopperud *et al.*, (2004) identificaram que em dias ativos numa vivenda familiar, isto é, com realização de atividades de limpeza, movimentação frequente dos ocupantes, as fontes interiores foram responsáveis por um valor entre 60 e 90% da concentração de $PM_{2,5}$, sendo apenas o restante atribuído a fontes externas.

Com os resultados encontrados por Madureira *et al.* (2012) observou-se uma maior concentração de PM grosseiras nos ambientes interiores estudados (salas de aula) quando comparado com as concentrações deste mesmo poluente em ambiente exterior próximo. Uma relação inversa pode ser observada para a fração fina do poluente, que apresentou maior concentração no ambiente exterior. Observou-se ainda que nos ambientes interiores estudados, a fração predominante de material particulado pertencia à classe $PM_{2,5-10}$.

No estudo de Braniš *et al.* (2009) foi identificada uma elevada influência das concentrações de $PM_{2,5}$ do ambiente exterior nas do ambiente interior. A mesma relação não foi observada para PM_{10} , onde as concentrações interiores apresentaram melhores correlações com o número de ocupantes.

2.2.5. Fatores interferentes nos níveis e na dinâmica de variação do material particulado

2.2.5.1. Ventilação

Pode ser estabelecida uma conexão entre a QAI e a insuficiência, ou ausência, de ventilação no ambiente. Um valor imprescindível para discussões acerca deste assunto é a TRA ou número de renovações por hora (RPH), os quais se referem à quantidade de vezes em que o ar interior é substituído pelo exterior num determinado espaço (Guo *et al.*, 2008). Uma baixa TRA pode implicar uma elevação na concentração de poluentes em ambientes interiores (Sundell, 2004).

Em localidades de baixas temperaturas a TRA enfrenta um problema de consumo energético. Devido ao facto do ar externo apresentar baixas temperaturas, faz-se com que seja necessário o aquecimento do mesmo, assim, ao propiciar uma alta TRA, se eleva também o consumo energético (Sun *et al.*, 2015).

Com o intuito de propiciar o conforto térmico e uma redução nos custos, sejam eles construtivos ou no sistema de troca de calor propriamente dito, Bekö *et al.* (2011) identificaram um comportamento de redução significativa na TRA em construções realizadas entre os anos de 1961 e 1976. Estas taxas voltam a aumentar depois da popularização de códigos de construção que exigiam uma taxa de ventilação mínima. Construções anteriores a estes anos ainda são destacadas pelos autores por possuírem grandes espaços internos, propiciando ambientes mais arejados.

Buscando encontrar uma relação satisfatória entre ventilação natural, QAI e conforto térmico em dormitórios de estudantes em Pequim, Lei *et al.* (2017) avaliaram fatores como dióxido de carbono, oxigénio, temperatura e humidade relativa de acordo com aberturas de janela variando de 0,011 m² a 0,11 m². Pode observar-se que uma taxa de ventilação adequada não corresponde sempre à maior possível, mas sim àquela que pode reduzir a concentração de poluentes, sem interferir significativamente na temperatura ou humidade relativa do ambiente. No entanto, os autores ainda ressaltam que quando o espaço per capita é inferior a 6,5 m³ nos dormitórios, a QAI não pode alcançar o nível desejado apenas com a abertura de janelas.

Devido a dificuldades técnicas em quantificar diretamente as taxas ventilação de um dado espaço, são frequentemente encontradas aproximações construídas com base nas concentrações do dióxido de carbono. De facto, o dióxido de carbono tem sido comumente medido como um procedimento simples de avaliação da ventilação, dado que as suas concentrações em ambientes interiores estão negativamente correlacionadas com as taxas de renovação de ar fresco observada no ambiente (Santamouris *et al.*, 2008).

2.2.5.1. Temperatura e Humidade Relativa

A temperatura e a humidade relativa do ar exercem influência na QAI. Apesar dos ambientes interiores serem caracterizados como microambientes, estes não se encontram isolados no ecossistema em que estão inseridos (Kapwata *et al.*, 2018).

Estes fatores, que são imprescindíveis para o conforto dos ocupantes, possuem demasiada relevância na saúde destes através do desencadeamento de efeitos adversos, quer seja de maneira direta quer seja indireta. Como exemplo, se tem o número de infeções respiratórias e a sua elevada correlação com as oscilações da humidade relativa em ambientes interiores (Arundel *et al.*, 1986; Frankel *et al.*, 2012), enquanto a temperatura pode desencadear em casos extremos a morte (Healy, 2003).

É ainda possível verificar a influência destes parâmetros na concentração de poluentes. Correlações significativas foram verificadas entre as condições climáticas em ambientes interiores e a concentração de material particulado, nomeadamente no que se diz respeito à temperatura e humidade relativa nesses espaços (Lam *et al.*, 2016).

Fromme *et al.* (2007) encontraram correlações positivas entre as concentrações de PM_{2,5} e humidade relativa durante o verão, no entanto foram verificadas correlações negativas durante o inverno.

2.2.5.2. Condições económicas e sociais

As preocupações nos dias de hoje, no entanto, não se dão exclusivamente pelo facto do aumento nas concentrações dos poluentes, mas também devido ao aumento do tempo que as pessoas atualmente passam inseridos em edifícios. Estima-se que atualmente o tempo que se

passa em casa, no trabalho, na escola ou na realização de qualquer outra atividade realizada em ambientes interiores, corresponde a 90% de todo o dia. O tempo de permanência nestes ambientes é ainda dependente de outros fatores, como a cultura local, tipos de trabalho e outras características. (Abraham e Li, 2014; Coombs *et al.*, 2016).

As particularidades das concentrações de material particulado encontradas em ambientes interiores estendem-se ainda às características económicas e sociais em que este ambiente se situa, onde apesar de generalizações necessárias em trabalhos a nível global, áreas distintas económica ou culturalmente tendem a apresentar concentrações, poluentes e fontes divergentes entre si (Arcus-Arth *et al.*, 2009).

Chengappa *et al.*, (2007) analisaram a qualidade do ar em aproximadamente 25000 residências familiares na região de Bundelkhand, na Índia. Constatou-se que nesta região a principal fonte de poluentes internos era a queima de biomassa com pouco ou nenhum processamento somado ao local de queima, comumente sem projeto e pouco eficiente, sendo este na maioria das vezes a única fonte de calor para o preparo de alimentos ou aquecimento da residência.

Outro estudo conduzido por Ezzati *et al* (2000) se procurou entender o impacto destas fontes na região do Quênia, analisando 38 residências locais e os seus métodos de produção de calor para o preparo de alimentos. Apenas com a substituição dos fogões preexistentes por outros de cerâmica mais eficientes, obteve-se uma redução de 48% na concentração de PM durante a fase de chamas e de 77% na fase brasas. Obteve-se ainda resultados melhores com a substituição da lenha por carvão mineral, porém a troca acarretaria na elevação de custos, o que não é viável para a região.

A visão de que apenas países desenvolvidos e suas indústrias acarretariam uma má qualidade de ar foi refutada e pode comprovar-se que países em desenvolvimento também apresentam importantes fontes de poluição, como a queima de biomassa, fonte bastante comum de calor nestas regiões. Além disso, poluentes de regiões mais poluídas podem dispersar-se e prejudicarem zonas adjacentes (Akimoto, 2003).

2.2.6. Patologias associadas à exposição ao material particulado

O esforço empregue no controlo das concentrações do poluente totaliza mais de 4 décadas, onde em 1970 a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) já divulgava emendas atribuindo priorização na avaliação e controle de material particulado PM₅, visto que até então se acreditava que esta fração se correlacionava melhor com as patologias decorrentes da exposição a material particulado (Wedding *et al.*, 1977).

Atualmente, a definição de material inalável pode ser, frequentemente, encontrada em estudos que visam analisar os efeitos adversos do material particulado no corpo humano (ESMAP, 2011). Numa revisão bibliográfica de dezenas de trabalhos realizada em 2006, Pope e Dockery evidenciaram o risco mais elevado, na maior parte dos estudos, quando analisada a fração de material particulado fino. Harrison e Yin (2000) explicam que este comportamento se dá por conta da eficiência de penetração desta fração de material particulado na região alveolar do sistema respiratório.

Para confirmação da relação inversamente proporcional entre a integridade física humana e a exposição a concentrações nocivas do poluente, vários estudos avaliaram os efeitos decorrentes do acréscimo nas concentrações do poluente (Mentese *et al.*, 2015; Neidell, 2004; Pope e Dockery, 2006; Slezakova *et al.*, 2013; Sundell, 2004). A taxa de mortalidade, por exemplo, apresentou-se 1% maior quando a concentração do poluente se elevou em 10 µg.m⁻³. Quando considerada a taxa de mortalidade exclusiva por disfunções cardiovasculares, a relação foi ainda mais significativa, onde a taxa aumentou para 1,4% (Dockery e Pope, 1994).

Doenças que acometem o sistema respiratório, bem como o risco de cancro de pulmão, também apresentaram forte dependência de fatores como o tabagismo e exposição a poluentes no ar (Cohen e Pope, 1995). Anos mais tarde, a Organização Mundial da Saúde, por meio da Agência Internacional para a Investigação do Cancro (IARC), veio a público confirmar o potencial carcinogénico da poluição do ar ambiente. Na mesma nota, é citado o material particulado como o poluente de maior expressividade encontrado no ar ambiente e, ainda que avaliado separadamente, foi também classificado como agente carcinogénico para o Homem (IARC, 2013).

As emissões e concentrações do poluente em espaços fechados são de grande relevância, uma vez que que níveis consideravelmente superiores foram encontrados para estes ambientes interiores em relação ao exterior quando analisado o fator de transferência de inalação, taxa essa que consiste na relação entre a massa de poluente inalada por um indivíduo em exposição e a massa de poluente emitida por uma determinada fonte de poluição (Lai *et al.*, 2000).

2.2.7. Princípios, métodos e tecnologias envolvidos na medição do material particulado

A determinação das concentrações de material particulado pode ser realizada por diferentes metodologias. O método de referência envolve a recolha de partículas *in situ*, usualmente com recurso ao princípio de filtração, seguindo-se a determinação da massa de partículas recolhida no laboratório (*off-line*) por gravimetria. Nas últimas décadas, têm surgido uma diversidade de métodos alternativos que permitem a medição direta no local de estudo, ou seja, as análises são realizadas no próprio local (*on-line*) fornecendo informações instantâneas ao utilizador permitindo obter mais informação e mais conhecimento e menor esforço (Kulkarni *et al.*, 2011).

2.2.7.1. Princípios de amostragem

A amostragem de material particulado pode realizar-se por 4 diferentes técnicas, basicamente, sendo elas: recolha inercial, filtração, gravitação e precipitação eletrostática. A recolha inercial tem como princípio físico de funcionamento a diferença mássica entre o material particulado e o fluido em que ele se encontra inserido. As partículas, num intervalo específico de tamanho, tendem a atingir um obstáculo posicionado estrategicamente, de modo a permitir o fluxo da fase gasosa, enquanto estas permanecem aderidas ao obstáculo (US EPA, 2008).

As recolhas realizadas por meio de filtração consistem na passagem do aerossol em meios filtrantes, onde tendem a se agarrar por inúmeros fenómenos físicos como impacção inercial, interceção direta, deposição por difusão, atração eletrostática e atração gravitacional.

O fenómeno predominante na aderência das partículas depende do tamanho das partículas, material do filtro, velocidade do gás e outros fatores (Hering *et al.*, 1995).

A técnica gravitacional é, de entre as formas de amostragem, a que apresenta menor complexidade. Consiste basicamente na colocação de um recipiente aberto que usualmente permanece por períodos prolongados exposto ao ar, onde serão depositados naturalmente poluentes. Todavia, a utilização desta técnica, pouco utilizada nos dias atuais, devido a exposição a intempéries, o que ocasiona evaporação da porção líquida, ou, em períodos de pluviosidade, a incorporação de humidade na amostra.

Por fim, com maior empregabilidade na remoção de poluentes, se tem a precipitação eletrostática, que se baseia na excitação elétrica das partículas as quais tendem então a agarrar-se a eléctrodos posicionados de maneira estratégica com o intuito de recolherem estas partículas (USEPA, 2008).

2.2.7.2. Métodos e tecnologias para análises quantitativas

A quantificação do material particulado pode ocorrer pelo número de partículas, massa ou tamanho das partículas. A análise de uma, ou mais, destas propriedades do poluente é definida em função do objetivo de estudo. É comum, e mais usual, nos depararmos com a quantificação da concentração de partículas na atmosfera em massa, inclusive, sendo esta a métrica utilizada por grande parte dos instrumentos legais, servindo de limiar para fontes poluidoras e limites de exposição, correlacionando ainda esta quantificação de acordo com respetivas classes de tamanho (Obaidullah & Bram, 2012).

O método de referência para a quantificação de material particulado é descrito pelas normas EN 12341 (1999) e 14907 (2005), as quais utilizam da gravimetria como princípio. Este método consiste basicamente na mensuração do caudal de ar passado por um meio filtrante onde as partículas se aderem e a pesagem deste filtro se procede no momento anterior e após a amostragem. De acordo com a massa de partículas aderidas ao filtro, ou seja, a diferença de massa entre a pesagem final e inicial e o respetivo caudal que fluiu pelo sistema se tem a concentração média de partículas no ar ao longo de um período.

A execução da quantificação da concentração de material particulado através do método de referência implica uma série de desvantagens, como a necessidade de preparo

prévio de filtros (secagem e pesagem) e de longos períodos de amostragem, bem como o desconhecimento das concentrações ao longo do tempo, conhecendo apenas uma média para todo o período desprezando as contribuições horárias (Kim *et al.*, 2004)

Estas mesmas normas apresentam ainda técnicas reconhecidas como equivalentes, que são aquelas a apresentar elevada fidedignidade se comparadas ao método de referência. Estas tecnologias equivalentes permitem a análise *in situ*, de modo a permitir análises com maior resolução temporal e menor número de procedimentos realizados (Jovašević-Stojanović *et al.*, 2015).

Os equipamentos que realizam a quantificação da concentração mássica do material particulado *in situ* baseiam-se em tecnologia ótica, gravimétrica ou de atenuação beta. Equipamentos que utilizam tecnologia ótica contam com emissores e recetores sensíveis de luz. As partículas ao atravessarem o feixe de luz causam a absorção ou refração da energia luminosa emitida, de modo a alterar diretamente a energia a ser recebida pelo recetor. A razão entre a energia emitida e a recebida é o valor matemático responsável pelo fornecimento da concentração de material particulado no ambiente de estudo (USEPA, 2008).

Monitores de atenuação beta possuem em meio aos seus componentes um emissor de radiação, o qual é responsável pela projeção destas partículas betas sobre um filtro onde o PM fica retido, a fração de radiação não absorvida pelo poluente é mensurada por um recetor e é então convertida em uma concentração correspondente (Kulkarni *et al.*, 2011).

Os equipamentos gravimétricos capazes de aferir a concentração de material particulado *in situ* contam com balanças integradas, que realizam a aferição da massa das partículas instantaneamente, de modo a reduzir os procedimentos quanto a realização desta mesma aferição com base em métodos laboratoriais (Jovašević-Stojanović *et al.*, 2015).

Equipamentos que utilizam da tecnologia ótica com o princípio da dispersão de luz, são amplamente utilizados, dado seus custos reduzidos e fornecimento de dados instantâneos, comumente encontrados na monitorização em tempo real. Consiste basicamente na emissão de um feixe de luz, o qual as partículas tendem a refletir em diversos ângulos, esta angulação está relacionada, entre outros fatores, com a massa da partícula. Um recetor de luz posicionado na angulação α tende a determinar a massa por meio da intensidade de luz refletida neste ângulo (Kulkarni *et al.*, 2011). Um esquema básico do funcionamento destes equipamentos pode ser verificado na Figura 3.

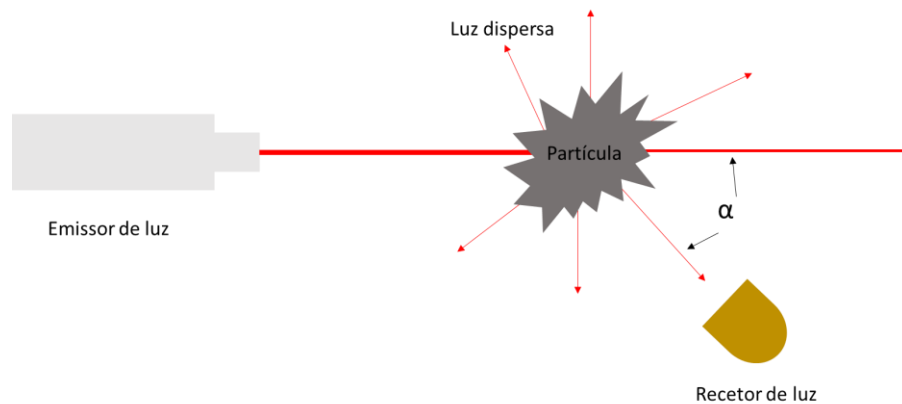


Figura 3- Esquema básico do funcionamento dos equipamentos que utilizam a tecnologia de dispersão de luz

2.2.7.3. Funcionamento e utilização de sensores de baixo custo

Outros dispositivos que têm ganho grande destaque recentemente, seja nos esforços para conceção, ou pela ampla utilização por entusiastas e académicos. As razões que explicam esse fenómeno são várias desde o custo, portabilidade ou facilidade de obtenção e uso contribuem positivamente para a ampliação no uso destes (Mukherjee *et al*, 2017).

Também conhecidos como dispositivos *Low cost*, estes dispositivos recebem tal denominação pelos baixos preços quando comparados aos dispositivos convencionais (Snyder *et al.*, 2013). Podem ser obtidos como um módulo único, já confeccionado industrialmente e pronto para o uso ou proceder-se à aquisição dos sensores e de um microcomputador e realizar por si só a montagem e programação do sensor.

Estes sensores apresentam funcionamento com base em tecnologias similares aos equipamentos referência ou equivalentes. Os sensores semicondutores promovem interação do poluente para o qual foi concebido e um semicondutor de células eletroquímicas ou de óxido de metal, onde o contacto entre estes resulta numa alteração da resistência do componente, dado este que posteriormente é convertido na concentração do poluente (Bârsan *et al.*, 2013). Aqueles denominados óticos, quantificam um composto por meio da absorção de luz, seja nos comprimentos visíveis, infravermelho ou da quimiluminescência (Snyder *et al.*, 2013).

Outra vantagem associada a equipamentos como estes, é a possível exportação de dados em tempo real, que pode ainda ser mediada por placas que contam com comunicação

em redes sem fio, possibilitando a obtenção de dados remotamente. Medições em tempo real proporcionam uma alta resolução temporal, tornando possível a distinção de diferentes fontes e reduzindo significativamente os custos, quando desprezados os diversos ensaios necessários isentos desta tecnologia (Chung *et al.*, 2001).

A utilização desta gama de sensores, no entanto, deve ser assegurada quanto ao seu rigor e precisão. O estudo de Castell *et al.* (2017) relata a experiência como promissora, após a obtenção de dados que apresentam tendência muito próxima das informações obtidas por um equipamento de referência. Os resultados obtidos pelo autor podem ser conferidos na Figura 4.

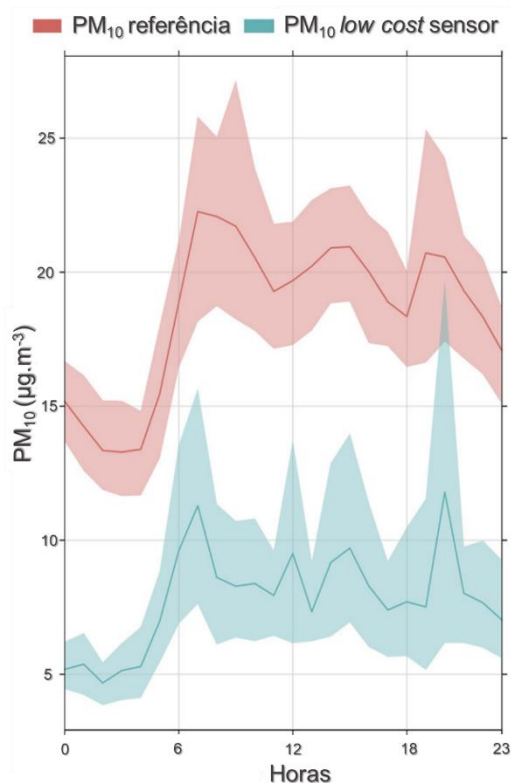


Figura 4- Comparação entre as concentrações de PM₁₀ obtidas por um equipamento referência e um *low cost*.
Fonte: Adaptado de Castell *et al.* (2017)

Para a verificação da precisão e exatidão destes equipamentos recorre-se a calibrações ou compara-se a sua resposta com a de um instrumento referência ou suficientemente fiável. Importa todavia referir que devido à dificuldade de produzir uma concentração conhecida e exata de material particulado, a calibração de equipamentos de medição de material

particulado, em dois ou mais pontos (*zero* e *span*) é uma prática pouco usual (Wang *et al.*, 2015).

2.2.8. Instrumentos legais

São crescentes as manifestações legais que buscam a melhoria na QAI nos últimos anos. Na União Europeia, por exemplo, todos os países membros possuem legislações vigentes que buscam limitar ou proibir o fumo em locais públicos fechados, parte desta conquista alcançada pode ser devido a Resolução do Parlamento Europeu, de 26 de novembro de 2009 que exorta todos os membros da UE a adotar legislações referentes a este assunto.

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) também contribuiu para a consciencialização sobre a QAI, publicando em 2009 um manual com informações gerais acerca do assunto, mas contando também com informações mais técnicas e específicas que podem auxiliar na execução de medições, seja quanto ao ambiente, poluentes ou até mesmo equipamentos.

Todo ambiente interior em território nacional, no entanto, deve também atender os parâmetros estabelecidos pela portaria nº 353 publicada em 4 de dezembro de 2013. Responsável por estabelecer o limiar para os principais poluentes da QAI, incluindo os biológicos, regula ainda a ventilação destes locais, que conforme mencionado anteriormente, impacta significativamente a concentração de poluentes.

A portaria estabelece como limiar de proteção para a fração PM₁₀ o valor de 50 µg.m⁻³, e para a fração fina (PM_{2,5}) de 25 µg.m⁻³. Em caso de dificuldades associadas a realização das medições, pode ainda ser consultado o documento de 2015 disponibilizado pela APA, que contém informações relevantes quanto ao número e locais de amostragens, métodos de medição, tratamento dos resultados e outras informações adicionais.

Algumas legislações e padrões para ambientes exteriores são aplicáveis também em ambientes interiores, devido à inexistência de legislações específicas, como acontece na União Europeia através da diretiva 2008/50/CE que apresenta como limiares 50 µg.m⁻³ e 20 µg.m⁻³ para PM₁₀ e PM_{2,5}, respetivamente. Vale a pena ressaltar que o valor de 20 µg.m⁻³ para PM_{2,5} substituiu o valor de 25 µg.m⁻³, que foi até o ano de 2015 o limiar admissível. Nos Estados

Unidos acontece o mesmo e têm-se como limiares $150 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $35 \mu\text{g.m}^{-3}$ para PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$, respetivamente.

Apesar de não apresentarem carácter legal, diversas outras entidades contribuem com informações técnicas e científicas que auxiliam autoridades a delimitarem limiares para o material particulado. A Associação Americana de Engenheiros de Aquecimento, Ventilação e Ar condicionado (ASHRAE) no seu documento 189.1-2009, que fornece informações a serem consideradas na construção de edifícios, menciona concentrações de poluentes a serem atendidas. A associação, no entanto, especifica valores idênticos à legislação norte americana $150 \mu\text{g.m}^{-3}$ para PM_{10} e $35 \mu\text{g.m}^{-3}$ para $\text{PM}_{2,5}$. A WHO, por sua vez, adota parâmetros mais rígidos, $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ para PM_{10} e $25 \mu\text{g.m}^{-3}$ para $\text{PM}_{2,5}$. A figura 5 sintetiza todas informações abordadas neste tópico.

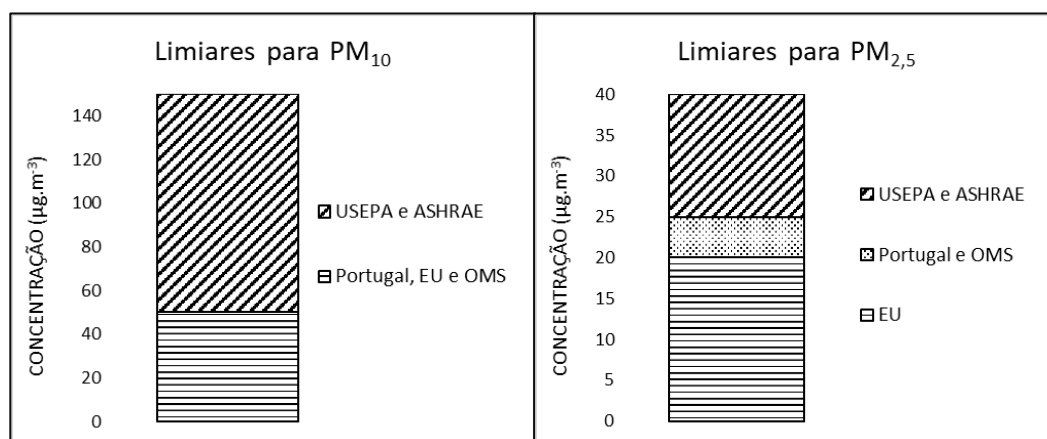


Figura 5- Limiares legais e estabelecidos por organizações internacionais.
Fonte: Adaptado de (Ambiente, 2013; ASHRAE, 2011; UE, 2008; WHO, 2010)

3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Ao longo deste capítulo serão referidos os aspetos técnicos e financeiros do sistema construído, bem como dos equipamentos que foram utilizados na sua validação. A Figura 6 apresenta a arquitetura do sistema desenvolvido, com indicação dos componentes selecionados para cada bloco funcional do dispositivo.

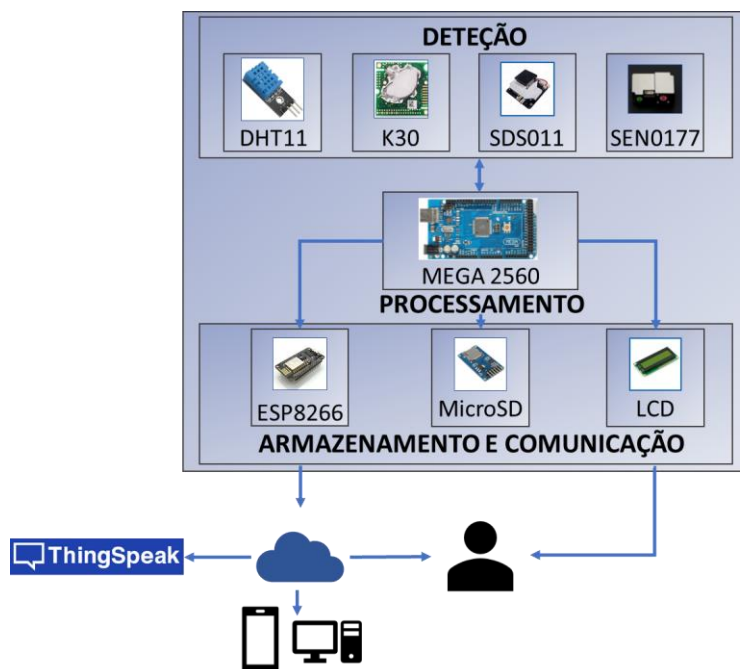


Figura 6- Arquitetura do sistema construído

Fonte: Adaptado de (Electrofun, s/d, s/d-b; Hack' Spark, s/d; Mouser, s/d -a, s/d -b)

3.1. SENSORES

3.1.1. Material particulado

A seleção dos sensores responsáveis pela quantificação das concentrações de material particulado teve por base a análise e comparação de uma gama de sensores disponíveis comercialmente. As características analisadas foram: custo, gama de medição, diâmetro do material particulado detetado e a resolução. Estas características, para os sensores selecionados, estão quantificadas na Tabela 2.

Tabela 2- Características técnicas e custo dos sensores escolhidos.

	SEN0177	SDS011
Intervalo de medição concentração ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	0 - 500	0 - 999,9
Intervalo de medição diâmetro (μm)	0,3 - 1; 1 - 2,5; 2,5 - 10	0,3 - 2,5; 2,5 - 10
Resolução mínima (μm)	0,3	0,3
Vida útil estimada (anos)	5	1
Preço (€)	41,89	43,20

Fonte: Adaptado de (Hk-a, 2015; Nova, 2015)

Os sensores escolhidos, SEN0177 e SDS011 (Figura 7), utilizam tecnologia de dispersão de luz para a quantificação do material particulado e podem realizar a medição em tempo real. Além disso, permitem separar a fração de $\text{PM}_{2,5}$ da PM_{10} com uma resolução mínima de $0,3 \mu\text{m}$, considerada adequada ao tipo de utilização que se pretende para este equipamento.



Figura 7- Sensores SDS011 e SEN0177 responsáveis pela quantificação de material particulado.

Fonte: Adaptado de (Nova, 2015)(Hk-a, 2015).

3.1.2. Temperatura e humidade relativa

Para a medição da temperatura e da humidade relativa do ambiente selecionou-se o sensor DHT11, figura 8, que integra, simultaneamente, um sensor de temperatura e de humidade relativa. O sensor de temperatura é baseado num termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*) capaz de realizar medições na gama dos 0° aos 50°C com exatidão de $\pm 2^\circ\text{C}$ (D-robotics UK, 2010).

A humidade relativa (20% a 90% com exatidão de $\pm 5\%$) é obtida por meio de um sistema composto por uma fina camada de polímero onde as partículas de água presentes no ar aderem e é realizada a quantificação por meio de dois elétrodos (D-robotics UK, 2010). Apesar do erro associado à medição, quer da temperatura, quer da humidade, ser relativamente elevado, tendo em vista o tipo de aplicação, é irrelevante pois estas variáveis não têm um impacto significativo na avaliação da qualidade do ar interior. Desta forma justifica-se a escolha deste sensor essencialmente pela facilidade de interface à plataforma de desenvolvimento usada e ao seu custo reduzido.

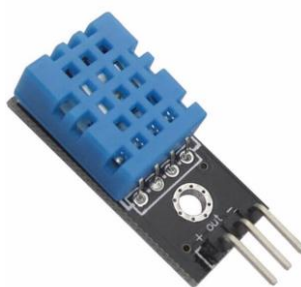


Figura 8- Sensor de temperatura e humidade relativa DHT11.

Fonte: (D-robotics UK, 2010)

3.1.3. Dióxido de carbono

Por se tratar de um importante parâmetro na determinação nas taxas de renovação do ar, decidiu-se integrar um sensor de dióxido de carbono no protótipo. O componente selecionado para a quantificação deste constituinte do ar foi o K30 10%, que possui um intervalo de medição de 0 a 10000 ppm e uma exatidão de $\pm 30 \text{ ppm} \pm 3\%$ da leitura (SenseAir, 2015) e cujo aspeto pode ser visto na figura 9.



Figura 9- Sensor de dióxido de carbono K30

Fonte: (SenseAir, 2015)

3.2. DISPOSITIVO DE PROCESSAMENTO DE DADOS

O processo de aquisição, processamento e envio dos dados foi realizado com recurso à plataforma de prototipagem rápida Arduino Mega 2560 (figura 10). A plataforma integra um microcontrolador programável, fabricado pela empresa Atmel, que possui 86 pinos de entrada/saída, nos quais se incluem as linhas destinadas à aquisição de sinais analógicos, as linhas de comunicação para interface a periféricos e as linhas de entrada/saída digitais. Conta ainda com 8 quilobytes de memória RAM e 256 quilobytes de memória flash (Atmel *et al.*, 2015).

A seleção do microcontrolador teve por base as suas características técnicas e o custo. O número de conexões fornecidas pelo dispositivo foi também um aspeto de fundamental importância, dado o número de módulos a serem conectados simultaneamente.



Figura 10- Microcontrolador MEGA 2560

Fonte: (Atmel *et al.*, 2015)

3.3. DISPOSITIVOS DE ARMAZENAMENTO, VISUALIZAÇÃO E ENVIO DE DADOS

Os dados recolhidos e já devidamente processados pelo microcontrolador são encaminhados para 3 dispositivos distintos: display LCD, módulo micro SD e módulo WiFi. O primeiro, (figura 11 A), permite a visualização local e em tempo de real das aquisições instantâneas. O módulo microSD, (figura 11 B), é usado para armazenamento local de toda a informação recolhida e serve de elemento de salvaguarda de dados em eventuais perdas de comunicação com o servidor remoto ou para possibilitar a utilização do equipamento em locais sem cobertura de rede WiFi.

Para a comunicação com o servidor remoto de recolha de dados optou-se pela utilização do módulo ESP8266, que apresenta um custo reduzido em comparação às demais opções disponíveis no mercado (figura 11 C). Além disso, o módulo pode ser facilmente conectado à plataforma Arduino, o que reduz o tempo de desenvolvimento.

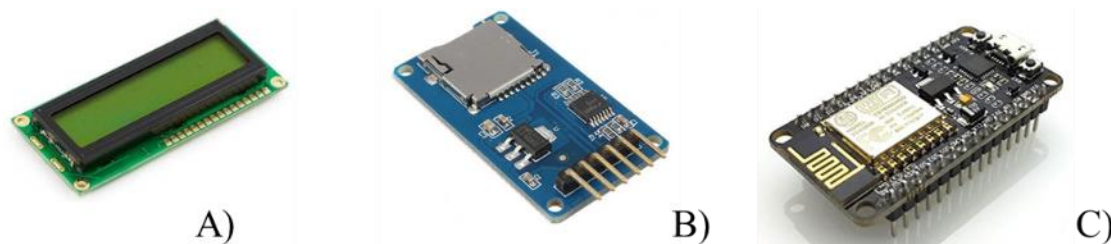


Figura 11- Equipamentos utilizados para armazenamento e visualização da informação recolhida.
A) Display LCD; B) Módulo de escrita e leitura em cartão micro SD; C) Módulo de comunicação sem fio.
Fonte: Adaptado de (Electrofun, s/d; FingerPointEngg, 2018; Instructables, 2017)

A plataforma de recolha de dados usada foi a ThingSpeak®. Esta plataforma, desenvolvida pela Mathworks, permite a conexão a múltiplos dispositivos, de forma gratuita, armazenando a informação recolhida em servidores remotos, que poderá ser consultada de forma remota e ágil a partir de um qualquer terminal com acesso à internet (ThingSpeak, 2013).

3.4. ANÁLISE DE CUSTOS

Para se acelerar o processo de aquisição do material necessário, os componentes foram adquiridos em território nacional, o que acarretou uma elevação dos custos. Na Tabela 3 podem ser verificados os custos associados à aquisição dos elementos que compõem o protótipo, onde a primeira coluna conta com os valores praticados para a realização deste trabalho e a segunda os melhores valores encontrados em lojas online. Os itens K30 e o módulo micro SD existiam na instituição, pelo que não foi necessária à sua aquisição, indicando para estes casos os valores mais baixos encontrados em território nacional.

Tabela 3- Custos associados a aquisição dos equipamentos

Equipamento	Preço adquirido (€)	Melhor preço encontrado (€)
Sensor material particulado SEN0177	41,89	40,40
Sensor material particulado SDS011	43,20	20,62
Adafruit HUZZAH ESP8266 Breakout Board	8,46	8,46
Placa de desenvolvimento ATmega 2560	29,75	9,99
Display LCD 16x2	10,45	3,00
Sensor T e RH	5,02	2,03
Módulo Micro SD	6,00	1,71
Sensor CO ₂ K30	72,99	72,99
Fonte de alimentação 2A 9V	6,72	3,90
Total	224,48	163,10

4. APLICAÇÕES PRÁTICAS DO SISTEMA CONSTRUÍDO

Neste capítulo descrevem-se aplicações práticas que foram realizadas para avaliar o comportamento do protótipo de medição, destacando-se o ambiente de estudo, o equipamento usado, a descrição dos ensaios experimentais de intercomparação, assim como os parâmetros estatísticos de avaliação dos resultados.

4.1. LOCAL DE ESTUDO

O protótipo desenvolvido foi aplicado na avaliação de vários parâmetros QAI da atmosfera interior de um espaço laboratorial do Instituto Politécnico de Bragança, identificado na Figura 12. Na figura é ainda possível verificar a presença de vegetação na envolvente do ambiente de estudo que bloqueia a radiação solar direta no edifício.



Figura 12- Localização do espaço laboratorial onde os ensaios foram realizados.
Fonte: Adaptado de (Notícias do Nordeste, 2018)

O laboratório em questão não apresenta janelas, apenas uma porta principal e conta com um volume de 117 m³. O revestimento das paredes, teto e piso é constituído de betão com uma camada superficial de pintura.

No ambiente interior de estudo encontram-se armazenados vários equipamentos utilizados pelos grupos de trabalho da área do ambiente e da silvicultura. Atualmente, o laboratório apresenta número reduzido de utilizadores. Durante os ensaios, os ocupantes foram os que tiveram envolvidos na execução deste trabalho, tendo permanecido quase sempre em atividades sedentárias como execução de tarefas em computadores portáteis, realizadas em locais relativamente afastados da zona central do espaço, onde se instalaram os equipamentos.

4.2. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Além do protótipo de QAI construído e descrito anteriormente, foram utilizados outros equipamentos disponíveis no mercado, existentes no Departamento de Ambiente e Recursos Naturais da Escola Superior Agrária de Bragança. Em particular, utilizou-se o monitor ADR-1200S, desenvolvido pela fabricante Thermo Scientific[®] e a sonda IAQ-610 do fabricante GrayWolf[®] (Figura 13).



Figura 13- Equipamentos utilizados como “referência” na avaliação do protótipo: A) Thermo Scientific ADR-1200S e B) GrayWolf IAQ610.

Fonte: Adaptado de (GrayWolf, 2014; Thermo Scientific, 2008).

O primeiro foi usado para medir a concentração de material particulado. Este equipamento utiliza a tecnologia de fotometria por dispersão de luz para quantificar a massa de partículas contidas por unidade de volume de ar. O instrumento é capaz de operar mesmo em ambientes de concentrações extremas de material particulado, com concentrações que podem variar na gama dos 0,001 mg.m⁻³ aos 400 mg.m⁻³ e uma exatidão de ± 5% (ThermoScientific, 2008).

O segundo instrumento referido foi utilizado na medição de parâmetros QAI como a temperatura (gama: -25° a 70°, com uma exatidão de ± 0,3°C), humidade relativa (gama: 0 a 100%, com uma exatidão de ± 2% para humidades relativas inferiores a 80%), dióxido de carbono (gama: 0 a 10000 ppm, com uma exatidão de ± 3% da leitura).

4.3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO PROTÓTIPO

Para a avaliação estatística do comportamento dos dados obtidos através do protótipo relativamente ao comportamento dos dados obtidos através dos equipamentos usados como “referência” utilizaram-se 4 parâmetros, os quais encontram-se identificados na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar o comportamento do protótipo

Parâmetro	Equação	Valor ideal
Índice de concordância de Willmott	$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (P_j - R_j)^2}{\sum_{j=1}^n (P_j - \bar{R} + P_j - \bar{P})^2}$	1
Coefficiente de correlação de Pearson	$r = \frac{\sum_{j=1}^n (R_j - \bar{R}) \cdot (P_j - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (R_j - \bar{R})^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_j - \bar{P})^2}}$	1
Coefficiente de determinação	$R^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (R_j - \bar{R}) \cdot (P_j - \bar{P})}{\sqrt{\sigma_R - \sigma_P}}$	1
Erro Quadrático Médio	$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (P_j - R_j)^2}{n}}$	0

Onde: P refere-se a dados obtidos pelo protótipo, P_j a dados obtidos no instante i pelo protótipo e σ_P o desvio padrão dos valores obtidos pelo protótipo.

R refere-se a dados obtidos pelos equipamentos de “referência”, R_j a dados obtidos no instante i pelos equipamentos de “referência” e σ_R o desvio padrão dos valores obtidos pelos equipamentos de “referência”.

O índice de concordância proposto por Willmott *et al.* em 1985 possui como função calcular a aproximação entre dois modelos. Os valores encontrados estão, obrigatoriamente,

compreendidos entre 0 e 1, onde 0 representa a ausência de qualquer relação e 1 uma relação perfeita.

O coeficiente de correlação de Pearson foi proposto por Karl Pearson ainda no século 19 e diz respeito ao grau de associação entre duas variáveis, sendo possível obter para este parâmetro valores entre -1 e 1. Os valores -1 e 1 indicam uma relação negativa perfeita e uma relação positiva perfeita, respetivamente. Relações perfeitas negativas são aquelas em que o crescimento de uma variável é acompanhado pelo decréscimo de igual amplitude de uma outra. Relações perfeitas positivas indicam a variação das duas variáveis com igual amplitude e direção. A proximidade ao 0 indica a ausência de relação entre os dados analisados (Rodgers e Wander, 1988).

Os erros quadráticos médios foram calculados para obter informações referentes à resposta do protótipo para diferentes gamas de concentração de PM, bem como a amplitude dos desvios observados para os parâmetros de estudo deste trabalho.

4.4. ENSAIOS DE INTERCOMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO

Os ensaios experimentais realizados consistiram basicamente na medição de vários parâmetros de QAI utilizando, em simultâneo, o protótipo construído e os equipamentos descritos na secção anterior. No total, foram realizados 4 ensaios de 24 horas de duração. As variáveis foram registadas com uma resolução temporal de 1 minuto, correspondendo a um total de 5760 medições.

Em cada ensaio procurou-se criar atmosferas interiores diferentes e variáveis no tempo, de modo a avaliar o comportamento do protótipo para diferentes condições ambientais. Esse objetivo foi conseguido através da utilização de fonte de poluição do ar e pela alteração voluntária da taxa de renovação do ar. Desta forma, foi possível criar dinâmicas de variação para alguns dos parâmetros de QAI estudados, e avaliar a resposta dos sensores às variações positivas e negativas das variáveis estudadas, em particular das concentrações de material particulado.

Na Tabela 5 apresentam-se as principais características dos ensaios realizados relativamente a fatores determinantes das condições de QAI, como perturbações infligidas e número de ocupantes no espaço.

Tabela 5- Características principais dos ensaios realizados.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Volume do espaço (m³)	117	117	117	117
Tempo de medição (h)	24	24	24	24
Aberturas (portas, janelas)	1 porta	1 porta	1 porta	1 porta
Número de alterações voluntárias de RPH	0	2	1	0
RPH (h⁻¹)	0	1,239/ 0,737	2,028	0
Tempo de abertura (h)	0	1,5	0,33	0
Número de ativações da fonte de poluição	2	2	1	1
Número de ocupantes (mínimo/máximo)	0/ 3	0/ 3	0/ 3	0/4

Como fontes de poluição foram utilizadas a combustão de tabaco tradicional e de tabaco em cachimbo de água, como ilustrado Figura 14. As ativações referentes aos ensaios 1 e 2 referem-se a combustão de um único cigarro em dois momentos distintos, enquanto as referentes aos ensaios 3 e 4 contaram com a utilização do cachimbo de água por 1h e 0,25h respectivamente.



Figura 14- Fontes de poluição utilizadas nos ensaios de medição de parâmetros da QAI.

A inserção da combustão do tabaco tradicional ocorreu nos ensaios 1 e 2 e nos ensaios 3 e 4 utilizou-se a combustão do tabaco em cachimbo de água. O ensaio 3 teve como objetivo criar um ambiente com uma concentração $PM_{2,5}$ elevada e, desta forma, avaliar os limites de medição dos sensores usados. Por outro lado, a concentração de PM criada neste contexto corresponderá a casos extremos que servirão de padrão para análise da capacidade de medição do dispositivo em ambientes reais padronizados que, na larga maioria dos casos, ocorrerá sempre em ambientes com concentrações inferiores a estes valores.

A título de informação, em residências os valores costumam ser significativamente inferiores, sendo que alguns estudos referem uma concentração máxima de $20 \mu g.m^{-3}$ para estudos realizados durante a primavera (Monn e Becker (1999)). Apesar destas concentrações poderem, no entanto, apresentar elevada variabilidade sazonal ou de acordo com a laboração de atividades específicas, a margem de leitura do protótipo pode ser considerada suficiente para análises nestes ambientes. No estudo de Song *et al.* (2015), que teve por objetivo a análise das concentrações de $PM_{2,5}$ em dias de inverno, época em que o uso de equipamentos de combustão de biomassa para aquecimento é potencializada e as taxas de ventilação são reduzidas, as concentrações não foram superiores a $600 \mu g.m^{-3}$.

Realizada a análise dos valores máximos efetivos da gama de medição de cada ensaio, procedeu-se a um novo ensaio (4), desta vez com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema sob concentrações próximas a este valor, porém não superior. Dada a dificuldade de produção de uma concentração exata de material particulado através de uma fonte qualquer, 6 amostragens tiveram de ser excluídas, tal como no ensaio anterior.

Alterações voluntárias no número de renovações por hora (RPH) foram também infligidas nos ensaios 2 e 3. Neste caso, teve-se como propósito verificar a resposta dos componentes perante uma alteração brusca nas concentrações de $PM_{2,5}$ e de dióxido de carbono.

A amostragem das partículas $PM_{2,5}$ pelo monitor ADR1200S foi assegurada com a incorporação de uma cabeça de amostragem com diâmetro de corte de $2,5 \mu m$. A calibração deste equipamento (em particular a determinação do zero do aparelho) foi realizada no início de cada ensaio.

Os equipamentos utilizados durante os ensaios (sonda IAQ 610, monitor ADR-1200S e o sistema construído) foram posicionados sobre uma mesa no centro do ambiente, de forma a ficarem com as tomadas de ar próximas umas das outras. A disposição dos devidos equipamentos pode ser visualizada na Figura 15.



Figura 15- Disposição dos equipamentos no ambiente onde ocorreram os ensaios.

5. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO PROTÓTIPO

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da aplicação prática do sistema desenvolvido. A interpretação e justificativas cabíveis aos resultados encontrados serão explanadas com base na literatura.

5.1. MATERIAL PARTICULADO

A Figura 16 apresenta a variação das concentrações médias horárias de $PM_{2,5}$ registadas pelos dois sensores integrados ao protótipo e pelo monitor ADR-1200S, para os 4 ensaios realizados. As horas indicadas na figura correspondem às horas decorridas de ensaio.

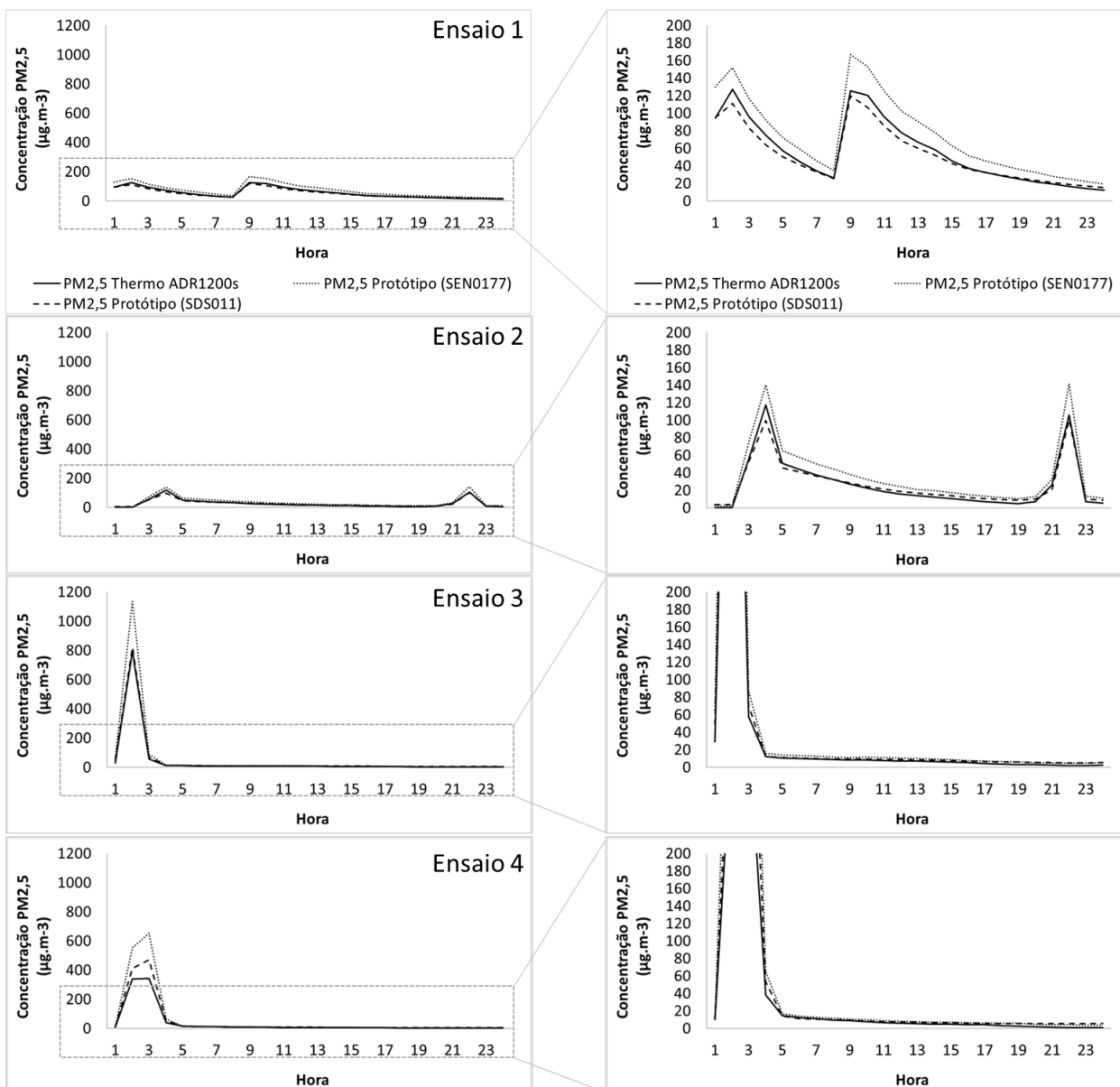


Figura 16- Concentrações médias horárias de PM_{2,5} obtidas pelos dois sistemas utilizados nos diferentes ensaios

Numa primeira análise, podemos constatar que foram criadas atmosferas interiores com uma ampla gama de concentrações de PM_{2,5} e com uma dinâmica de variação distinta ao longo do tempo. A utilização voluntária de fontes de poluição e as alterações propositadas das TRA são facilmente identificadas no perfil temporal das concentrações.

De facto, as fontes de poluição causaram aumentos substanciais nos níveis de PM_{2,5}, em todos os ensaios e particularmente nos ensaios 3 e 4, nos quais se recorreu ao cachimbo de água como fonte de poluição. Do mesmo modo, a abertura da porta para assegurar taxas de

ventilação mais elevadas, está igualmente bem ilustrada na figura, dado que as maiores taxas de redução das concentrações de $PM_{2,5}$ foram registadas nos ensaios com valores de RPH mais elevados.

Como se pode observar, foi no ensaio 3 que se registou a maior redução da concentração de partículas, a qual foi de 90% entre as horas 2 e 3, em resultado da alteração propositada da ventilação do espaço. Esta alteração de maior magnitude da RPH justifica-se pelo gradiente de temperatura entre o ambiente interior e o exterior, no momento da abertura da porta, que ocorreu no período noturno (USEPA, 2005).

No ensaio 4, ainda que não inseridas alterações voluntárias no número de RPH, uma redução na concentração de $PM_{2,5}$ de magnitude semelhante ao ensaio 3 pode ser observada. As reduções encontradas nestes ensaios está também relacionada aos componentes do PM produzido pela fonte utilizada, onde 55% destes componentes correspondem a vapor d'água, que é de fácil condensação quando em contato com superfícies (Saleh e Shihadeh, 2008).

Numa segunda análise, observa-se que os sensores de $PM_{2,5}$ estiveram expostos a concentrações médias horárias que variaram entre $0 \mu\text{g.m}^{-3}$ e aproximadamente $650 \mu\text{g.m}^{-3}$, tendo por base as leituras das concentrações de $PM_{2,5}$ do equipamento ADR-1200S. Independentemente do ensaio, constata-se que os sensores de $PM_{2,5}$ integrados no protótipo responderam de forma bastante similar ao equipamento usado como “referência”, em particular nos períodos durante os quais as concentrações de $PM_{2,5}$ não se aproximavam de $0 \mu\text{g.m}^{-3}$ ou convergiam para valores elevados, próximos do valor limite da gama de medição dos sensores.

Este comportamento está bem evidenciado na Figura 17, onde é possível verificar que os sensores do protótipo sensíveis a $PM_{2,5}$ (SDS011 e SEN0177) não acompanharam a variação dos níveis de partículas sempre que estes excederam os valores de $999,9 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $1200 \mu\text{g.m}^{-3}$ respetivamente. Importa mencionar que o valor máximo da gama de medição observado para o sensor SEN0177 foi significativamente superior ao valor de $500 \mu\text{g.m}^{-3}$, indicado pelo fabricante do componente (Hk-a, 2015).

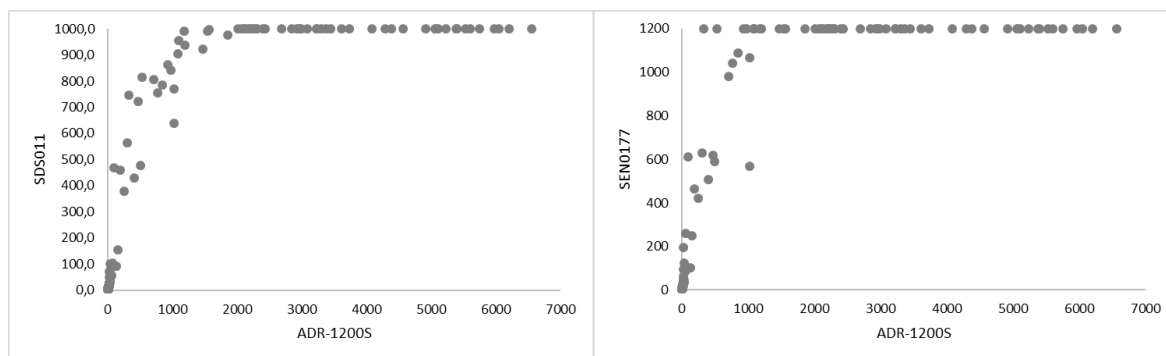


Figura 17- Concentrações obtidas pelo equipamento Thermo ADR-1200S versus sensores incorporados ao sistema no ensaio 3

A tabela 6 apresenta uma análise comparativa tendo por base alguns parâmetros estatísticos- mínimos, máximos, médias, desvio padrão e coeficiente de assimetria. Esta análise teve por base todos os dados recolhidos durante o ensaio (concentrações médias de 1 minuto) e desta forma as análises realizadas passam a apresentar características quantitativas.

Tabela 6- Parâmetros estatísticos relativos às concentrações de PM_{2,5} obtidas nos diferentes ensaios

Ensaio	Equipamento	Mínimo ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Máximo ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Média ($\mu\text{g.m}^{-3}$)	Desvio padrão	Assimetria
1	ADR-1200S	0,000	274,000	54,444	40,872	1,201
	SDS011	2,300	313,400	50,577	35,915	1,552
	SEN0177	0,000	368,000	71,638	50,705	1,291
2	ADR-1200S	0,000	308,000	26,471	39,360	3,066
	SDS011	3,200	213,300	26,864	34,166	3,055
	SEN0177	1,000	314,000	36,679	49,135	3,061
3	ADR-1200S ^(a)	2,000	6560,000	137,282	702,219	6,228
	SDS011 ^(a)	4,500	999,900	52,263	197,242	4,388
	SEN0177 ^(a)	4,000	1200,000	63,682	240,939	4,384
	ADR-1200S ^(b)	2,000	979,000	12,254	58,483	12,556
	SDS011 ^(b)	4,500	862,700	15,265	66,889	10,500
	SEN0177 ^(b)	4,000	1200,000	19,077	89,288	11,081
4	ADR-1200S ^(a)	0,000	1405,000	38,620	143,310	5,299
	SDS011 ^(a)	5,500	999,900	47,987	161,181	4,381
	SEN0177 ^(a)	2,000	1200,000	62,999	221,276	4,401
	ADR-1200S ^(b)	0,000	959,000	33,739	121,717	4,964
	SDS011 ^(b)	5,500	990,900	44,224	150,567	4,567
	SEN0177 ^(b)	2,000	1200,000	58,235	209,106	4,631

Onde: (a) refere-se a dados obtidos antes da exclusão das concentrações superiores a $999,9 \mu\text{g.m}^{-3}$ e (b) após a exclusão

De um modo geral é possível observar que uma gama alargada de medição foi de facto alcançada, onde as concentrações apresentaram valores entre $0 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $6560 \mu\text{g.m}^{-3}$. Quando realizada uma breve análise das médias é possível verificar que estas apresentam também disparidades entre si.

Os coeficientes de assimetria apresentam, em todos ensaios e equipamentos, valores positivos, o que representa uma maior incidência de concentrações inferiores à média aritmética em todos os casos (Sutton, 1993). Os elevados desvios padrão encontrados para os ensaios devem-se a perturbações voluntárias causadas a nível das concentrações de $\text{PM}_{2,5}$ através do acionamento das fontes de poluente, que promoveu a elevação das concentrações encontradas no ambiente inicial.

No ensaio 1 a segunda perturbação foi a responsável pela obtenção do valor máximo observado para o ensaio, uma vez que no momento desta ativação, o ambiente ainda não havia retornado as condições iniciais observadas por conta da primeira perturbação. Neste primeiro ensaio não foram promovidas alterações propositais na RPH, atribuindo as reduções da concentração de material particulado à deposição das partículas ou à fuga de ar contaminado (You *et al.*, 2012).

Para o ensaio 2, que apresentou 2 ativações da fonte de poluição (horas 3 e 21) e alterações voluntárias do número de RPH (horas 4 e 22) se observou um desvio padrão ligeiramente inferior ao encontrado no ensaio imediatamente anterior, que se deve ao fato da obtenção de concentrações elevadas por um menor período de tempo, dada a redução brusca nas concentrações ocasionadas pela alteração no número de RPH.

No ensaio 3, que teve a concentração de material particulado elevada a valores superiores aos informados como valores máximos da gama de medição, pode ser observado os maiores desvios padrão dado a amplitude da elevação na concentração, o pequeno número de amostragem em altas concentrações e a redução drástica nas concentrações de $\text{PM}_{2,5}$.

A qualidade dos valores fornecidos pelo protótipo foi avaliada com base nos parâmetros estatísticos referidos no ponto 4.2, cujos resultados contam da tabela 7. Em geral, esses parâmetros mostram o bom comportamento do protótipo para a medição de material particulado fino, tendo os melhores resultados expressos na cor verde e os piores na cor vermelha.

Tabela 7- Parâmetros estatísticos usados na avaliação do comportamento do protótipo referente à medição de PM_{2,5}

Ensaio	Sensor	r	d	R ²	EQM
1	SDS011	0,979	0,978	0,940	11,447
	SEN0177	0,978	0,940	0,939	22,619
2	SDS011	0,975	0,983	0,952	9,668
	SEN0177	0,978	0,964	0,956	16,925
3	SDS011	0,947	0,968	0,898	21,722
	SEN0177	0,943	0,926	0,889	39,014
4	SDS011	0,994	0,980	0,972	37,930
	SEN0177	0,984	0,918	0,968	94,646

Uma análise rápida da tabela é suficiente para serem observados elevados valores para todos parâmetros que avaliam o comportamento. Observa-se que ainda que analisados os piores cenários os valores indicam uma forte correlação entre os equipamentos.

Quanto aos erros apresentados é possível observar que os valores possuem relação com a média, de modo a obter valores superiores para os ensaios que possuem médias superiores.

Os coeficientes de correlação de Pearson encontrados para os ensaios realizados apresentaram variação entre 0,943 (ensaio 3, sensor SEN0177) a 0,994 (ensaio 4, sensor SDS011). Para o índice de concordância de Willmott a oscilação foi entre 0,918 (ensaio 4, sensor SEN0177) e 0,983 (ensaio 2, sensor SDS011), o que indicia uma correlação muito forte entre os equipamentos, mesmo nas análises de menor proximidade ($r > 0,9$).

O coeficiente de determinação apresentou uma variabilidade entre 0,889 (ensaio 3, sensor SEN0177) e 0,972 (ensaio 4, sensor SDS011) e ainda que considerado o cenário de menor proximidade, o valor observado foi superior ao encontrado por Castell *et al.* (2017), que quando conduziu um experimento semelhante e obteve o valor de 0,84 para este parâmetro.

De maneira geral, em 3 dos 4 ensaios realizados, o sensor SDS011 apresentou desempenho superior ao sensor SEN0177. Importa ainda destacar que para todos os parâmetros, o SDS011 teve sistematicamente uma resposta mais próxima à do monitor ADR-1200S do que o SEN0177.

Além destes parâmetros, foi ainda calculado o erro quadrático médio para 5 faixas de concentração de PM_{2,5}, a fim de identificar as gamas para as quais os sensores apresentam

maior fidelidade, tendo por base a resposta do equipamento usado como “referência”. Os resultados dessa análise constam da tabela 8.

Tabela 8- Erros relativos médios apresentados para os sensores de material particulado em função da faixa de concentração

	SEN0177	SDS011
$[PM_{2,5}] \leq 5 \mu\text{g.m}^{-3}$	3,62	3,57
$5 \mu\text{g.m}^{-3} < [PM_{2,5}] \leq 25 \mu\text{g.m}^{-3}$	7,08	2,43
$25 \mu\text{g.m}^{-3} < [PM_{2,5}] \leq 50 \mu\text{g.m}^{-3}$	16,10	7,58
$50 \mu\text{g.m}^{-3} < [PM_{2,5}] \leq 100 \mu\text{g.m}^{-3}$	45,87	26,21
$100 \mu\text{g.m}^{-3} < [PM_{2,5}]$	192,36	81,51

De acordo com a análise realizada é possível identificar menores ou maiores desvios das leituras dos sensores de acordo com a faixa em que as concentrações estão compreendidas, de modo a obter resultados extremamente satisfatório para alguns destes intervalos.

O menor desvio observado refere-se às concentrações compreendidas entre $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ e $25 \mu\text{g.m}^{-3}$ para o sensor SDS011, sendo este sensor também a apresentar os menores erros quadráticos médios.

5.2. TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA

As médias horárias para a humidade relativa e a temperatura são apresentadas na Figura 18, que apresenta a evolução destas variáveis obtidas pelos diferentes equipamentos envolvidos (sensor DHT11 e sonda IAQ610 da marca GrayWolf[®]), ao longo dos ensaios conduzidos.

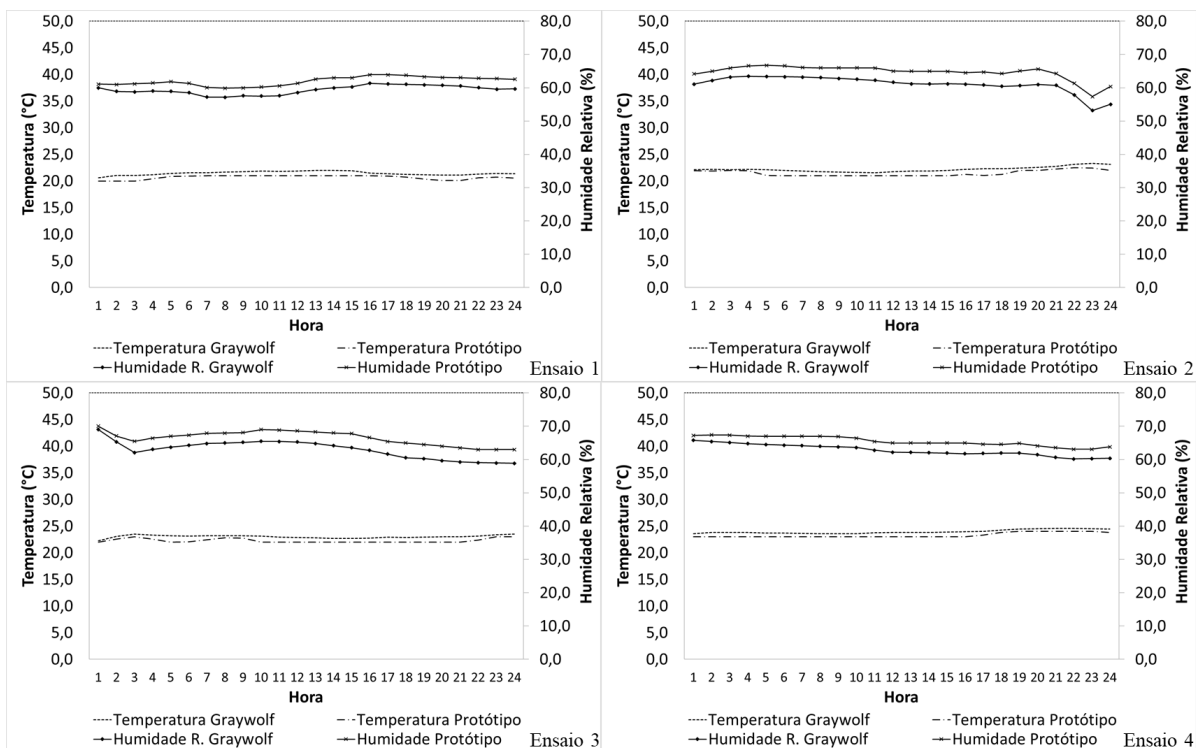


Figura 18-Média horária das temperaturas e humidades relativas observadas para os diferentes ensaios experimentais

Apesar de as variáveis representadas não apresentarem uma variação de elevada amplitude, é possível observar que ambos os dispositivos fornecem informação bastante próximas, com o protótipo a sobrestimar ligeiramente os valores de humidade relativa (5,3% desvio máximo para médias horárias) e subestimar em uma escala ainda menor a temperatura (1,2°C para as médias horárias).

Quando analisada a humidade relativa, decréscimos foram perceptíveis ao longo do dia, valores estes que voltavam a aumentar durante os períodos noturnos, comportamento este que se justifica pela relação de Clausius-Clapeyron (Lawrence, 2005).

As variações verificadas nas temperaturas ao longo de cada ensaio são pequenas e se explicam pela localização do laboratório, que possui vegetação junto às suas fachadas e não recebe radiação direta do sol, de forma a manter as temperaturas estáveis (Shashua-Bar e Hoffman, 2000) mas apresentam uma amplitude superior quando analisadas as amplitudes entre ensaios, resultado de oscilações pelas temperaturas observadas no exterior.

Itens da estatística descritiva foram também avaliados para estas variáveis com base nos dados obtidos pelo sistema construído e pela sonda IAQ610 que são apresentados na tabela 9.

Tabela 9- Parâmetros estatísticos relativos à temperatura e humidade relativa

			Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Assimetria
Ensaio 1	IAQ610	HR (%)	56,7	62,5	59,4	1,3	-0,2
		T (°C)	20,0	22,1	21,4	0,4	-0,4
	Protótipo	HR (%)	59,0	64,0	62,0	1,3	-0,1
		T (°C)	20,0	21,0	20,7	0,5	-0,8
Ensaio 2	IAQ610	HR (%)	51,7	63,8	61,1	2,5	-1,9
		T (°C)	21,4	23,5	22,2	0,5	0,9
	Protótipo	HR (%)	54,0	67,0	64,7	2,3	-2,1
		T (°C)	21,0	23,0	21,5	0,6	0,8
Ensaio 3	IAQ610	HR (%)	58,7	72,0	63,0	2,7	0,1
		T (°C)	21,4	23,6	23,0	0,3	-1,2
	Protótipo	HR (%)	62,0	70,0	66,5	2,2	-0,3
		T (°C)	21,0	23,0	22,3	0,4	1,0
Ensaio 4	IAQ610	HR (%)	60,0	67,7	62,8	1,7	0,2
		T (°C)	23,3	24,6	24,0	0,4	0,6
	Protótipo	HR (%)	63,0	68,0	65,5	1,4	-0,1
		T (°C)	23,0	24,0	23,3	0,5	0,9

As baixas amplitudes referidas as médias horárias são também observadas nas amostragens realizadas minuto a minuto. Para estes dados obteve-se um desvio máximo de 5,9% para a humidade relativa observada entre os equipamentos e de 1,6°C para as temperaturas. Para a aplicação desejada deste dispositivo as diferenças obtidas não são significativas e cumprem perfeitamente com objetivo de estudo (Fang *et al.*, 1998).

Face aos dados apresentados, é possível verificar uma amplitude máxima da humidade relativa no ensaio 3, o que se deve ao facto da ocorrência de precipitação no dia imediatamente anterior a este ensaio.

A maior amplitude observada para temperatura obtida, quando considerados os dados obtidos pela sonda IAQ610 é referente ao ensaio 3, o protótipo, no entanto, apresenta amplitudes igualmente superiores para os ensaios 2 e 3. Oscilações de menor amplitude podem ser observadas para os demais ensaios, onde a variabilidade reduzida para as humidades e temperaturas são ainda confirmadas pelo baixo desvio padrão associado a estes conjuntos de dados.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros estatísticos para verificação do comportamento dos dados obtidos pelo sistema construído para temperatura e humidade relativa quando comparados aos valores obtidos pela sonda IAQ610.

Tabela 10- Parâmetros estatísticos usados na avaliação do comportamento do protótipo relativamente à medição da temperatura e da humidade relativa

Ensaio	Parâmetro	Pearson	Willmott	R ²	EQM
1	T	0,704	0,404	0,496	0,838
	HR	0,902	0,653	0,814	2,701
2	T	0,763	0,606	0,582	0,804
	HR	0,950	0,631	0,902	3,669
3	T	0,616	0,392	0,379	0,839
	HR	0,956	0,675	0,913	3,570
4	T	0,908	0,552	0,824	0,704
	HR	0,952	0,625	0,906	2,768

Na análise dos dados obtidos é possível observar que apesar dos desvios máximos para temperatura e humidade relativa entre o protótipo e a sonda não influenciarem nos objetivos do trabalho, os comportamentos apresentam baixa correlação, sobretudo no que diz respeito a temperatura, onde nos piores cenários são encontrados $r= 0,616$; $d= 0,392$ e $R^2=0,379$. Uma melhor relação entre os comportamentos é observada para humidade relativa, de modo a obter como menores valores $r= 0,902$; $d= 0,625$ e $R^2= 0,814$.

As pequenas oscilações observadas para temperatura e humidade relativa através da sonda IAQ610 (décimas de uma unidade) ao longo dos ensaios não são apontadas pelo sensor, que pode acarretar nos baixos valores obtidos para os parâmetros de análise de comportamento utilizados, mas quando analisados os erros quadráticos médios é possível verificar que os desvios são perfeitamente aceitáveis para a aplicação do sistema, ainda que nos piores ensaios.

5.3. DIÓXIDO DE CARBONO

As concentrações médias horárias de dióxido de carbono obtidas pelo sensor K30 incorporado no sistema construído e pela sonda IAQ610 estão apresentadas na Figura 19.

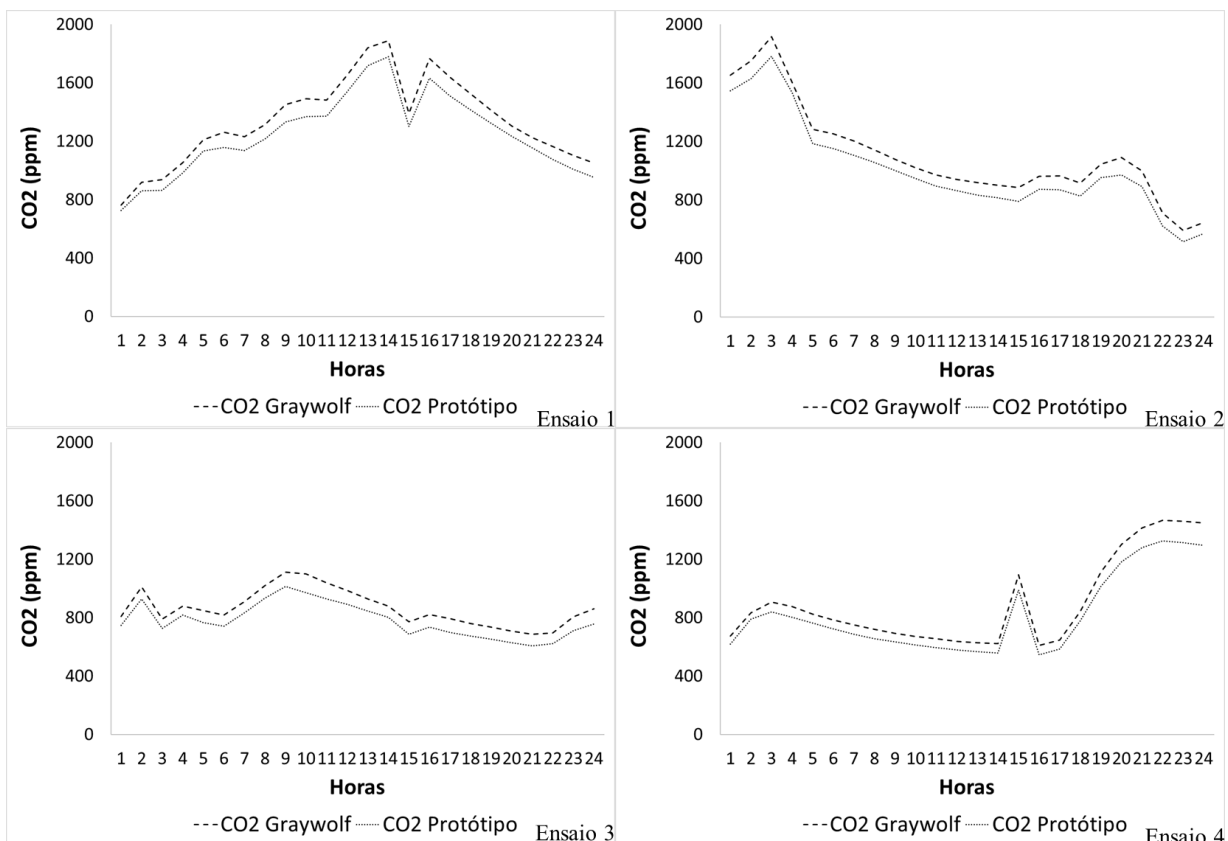


Figura 19- Concentrações médias horárias de dióxido de carbono obtidas pelos dois sistemas, para os diferentes ensaios laboratoriais

Em relação a este parâmetro de QAI observa-se um ligeiro desvio negativo da resposta do protótipo relativamente à do equipamento GrayWolf. Não obstante, ambos os equipamentos respondem de forma similar em momentos muito distintos do ensaio, inclusive nas subidas e nas descidas mais acentuadas dos níveis de CO₂.

As variações nos níveis de CO₂ resultaram sobretudo da presença humana cujo metabolismo gera emissões deste constituinte (Koerner e Klopatek, 2002) e, embora menos evidente, da utilização de um processo de combustão como fonte de poluição (Al-Dabbous *et al.*, 2018). A utilização da combustão do tabaco associada ao tempo desta reação não foi suficiente para grandes alterações na concentração do poluente, quando considerado que 3 minutos de combustão de tabaco resulta na produção de apenas 12 mg de dióxido de carbono (Tan e Lebron, 2012).

A comparação entre os parâmetros estatísticos descritivos dos dados recolhidos (médias de 1 minuto) evidencia a existência de desvios negativos superiores. Todavia, parece

evidente que o desvio resulta de um erro sistemático facilmente corrigido com a alteração do coeficiente de calibração do sensor.

Tabela 11- Parâmetros estatísticos relativos às concentrações de CO₂ obtidas nos diferentes ensaios

Ensaio	Equipamento	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Assimetria
1	IAQ610	659,0	1929,0	1349,7	305,7	0,1
	Protótipo	629,0	2316,0	1258,3	288,8	0,2
2	IAQ610	545,0	2122,0	1102,7	337,9	1,0
	Protótipo	458,0	3570,0	1010,4	332,2	1,3
3	IAQ610	608,0	1323,0	868,7	136,4	0,6
	Protótipo	553,0	1225,0	783,4	128,5	0,6
4	IAQ610	602,0	1481,0	883,6	300,0	1,0
	Protótipo	539,0	1336,0	803,5	270,0	1,0

Nota: HR= Humidade relativa; T= Temperatura e CO₂= Concentração de dióxido de carbono.

Os resultados dos parâmetros estatísticos usados já anteriormente para uma avaliação quantitativa do comportamento do protótipo são apresentados na tabela 12 e comprovam a qualidade do equipamento na medição de CO₂. Para todos os parâmetros foram encontrados valores superiores a 0,9, indicando fortes correlações entre as concentrações obtidas pelos equipamentos.

Somado a estes resultados positivos encontrados, os erros observados apresentam também uma baixa variação, que podem desta forma serem corrigidos por meio de um simples ajuste nas leituras observadas no sistema.

Tabela 12- Parâmetros estatísticos usados na avaliação do comportamento do protótipo referente à medição de CO₂

Ensaio	Pearson	Willmott	R ²	EQM
1	0,996	0,900	0,993	101,453
2	0,990	0,976	0,979	104,530
3	0,988	0,900	0,977	88,059
4	0,999	0,978	0,998	86,104

6. CONCLUSÕES

A obtenção de elevadas escalas espaço-temporais no estudo de poluentes em ambientes interiores tem-se tornado uma realidade cada vez mais próxima, face aos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas. Com o presente trabalho procurou-se contribuir para essa realidade, com a elaboração de um protótipo de baixo custo e elevada portabilidade capaz de realizar a medição de parâmetros da QAI em tempo real. A robustez e a fiabilidade do protótipo ficaram igualmente bem demonstradas nos vários ensaios de intercomparação realizados, que envolveram o protótipo e outros equipamentos comerciais de elevada precisão e exatidão.

De um modo geral, pode afirmar-se que o protótipo permitiu reproduzir fielmente os comportamentos das concentrações de $PM_{2,5}$ e de CO_2 . Para temperatura e humidade relativa, ainda que os resultados obtidos para os parâmetros de comparação demonstrem baixa relação entre os dados informados pelos equipamentos, os erros quadráticos médios comprovam que as amplitudes dos desvios não são significativas para a aplicação pretendida do sistema.

O baixo custo, dimensões reduzidas e a facilidade de reparação dos componentes pode proporcionar a utilização do equipamento em residências familiares, escolas e instalações públicas. Informações relevantes à integridade física dos ocupantes podem ser disponibilizadas através do equipamento, como a necessidade de elevação do RPH quando detetadas elevadas concentrações dos poluentes de estudo. O acesso a estas informações é também facilitado devido a possibilidade de observação dos parâmetros por meio da plataforma ThingSpeak, que pode ocorrer através de qualquer terminal com conexão a internet.

O custo associado a construção deste sistema faz-se ainda com que seja viável a realização de amostragens em um maior número de pontos nos ambientes interiores, que pode proporcionar a ampliação dos conhecimentos quanto a dispersão do material particulado e de outras características ao longo do tempo e espaço nestes ambientes.

As dimensões do equipamento, ainda que já reduzidas, podem ser minimizadas por meio da construção de um sistema com base em uma placa de circuito impresso, que além deste benefício promoveria ainda a estabilidade da conexão dos sensores ao microcontrolador.

Com a obtenção deste sistema ainda mais compacto e estável será possível acoplar o equipamento ao corpo de um indivíduo, possibilitando a realização de estudo de exposição pessoal de grupos homogêneos ou indivíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, S., & Li, X. (2014). A cost-effective wireless sensor network system for indoor air quality monitoring applications. Em *Procedia Computer Science* (Vol. 34, pp. 165–171). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.090>
- Abt, E., Suh, H. H., Catalano, P., & Koutrakis, P. (2000). Relative contribution of outdoor and indoor particle sources to indoor concentrations. Em *Environmental Science and Technology* (Vol. 34, pp. 3579–3587). <https://doi.org/10.1021/es990348y>
- Afshari, A., Matson, U., & Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: A study conducted in a full-scale chamber. Em *Indoor Air* (Vol. 15, pp. 141–150). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00332.x>
- Akimoto, H. (2003). Global air quality and pollution. Em *Science (New York, N.Y.)* (Vol. 302, pp. 1716–1719). <https://doi.org/10.1126/science.1092666>
- Albuquerque, T. T. A. (2010). *Formação E Transporte Das Partículas Finas Inorgânicas Em Uma Atmosfera Urbana : O Exemplo De São Paulo* (Tese de Doutorado). Obtido de http://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/t_taciana_t_a_albuquerque.pdf .
- Alharbi, B., Shareef, M. M., & Husain, T. (2015). Study of chemical characteristics of particulate matter concentrations in Riyadh, Saudi Arabia. Em *Atmospheric Pollution Research* (Vol. 6, pp. 88–98). <https://doi.org/10.5094/APR.2015.011>
- Al-Dabbous, A. N., Khan, A. R., Al-Tamimi, S. A., Shalash, M., Bajoga, A. D., & Malek, M. J. (2018). Oxides of carbon, particulate matters and volatile organic compounds impact on indoor air quality during waterpipe smoking. Em *International Journal of Environmental Science and Technology* (pp. 1–6) <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1870-0>
- Anderson, H. R. (2009). Air pollution and mortality: A history. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 43, pp. 142–152) . <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.026>
- Annesi-Maesano, I., Baiz, N., Banerjee, S., Rudnai, P., & Rive, S. (2013). Indoor air quality and sources in schools and related health effects. Em *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews* (Vol. 16, pp. 491-550). <https://doi.org/10.1080/10937404.2013.853609>
- Arcus-Arth, A., Broadwin, R., & Lam, R. (2009). Impact of socioeconomic factors on

- residential indoor air quality and human health. Em *Environmental Toxicology and Human Health* (Vol. II, pp. 126–154). Obtido de <http://www.eolss.net/sample-chapters/c09/e4-12-05-01.pdf>.
- Atmel (2015). *Mega 2560: Microcontroller*. Obtido de <http://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>
- Bârsan, N., Huebner, M., & Weimar, U. (2013). Conduction mechanism in semiconducting metal oxide sensing films: Impact on transduction. Em *Semiconductor Gas Sensors* (pp. 35–63). <https://doi.org/10.1533/9780857098665.1.35>
- Bekö, G., Toftum, J., & Clausen, G. (2011). Modeling ventilation rates in bedrooms based on building characteristics and occupant behavior. Em *Building and Environment* (Vol. 46, pp. 2230–2237). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.002>
- Biswas, S., Hu, S., Verma, V., Herner, J. D., Robertson, W. H., Ayala, A., & Sioutas, C. (2008). Physical properties of particulate matter (PM) from late model heavy-duty diesel vehicles operating with advanced PM and NOx emission control technologies. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 42, pp. 5622–5634). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.007>
- Boucher, O. (2015). Atmospheric Aerosols. Em *Atmospheric Aerosols* (Vol. 1005, pp. 9–24). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9649-1_2
- Braniš, M., Šafránek, J., & Hytychová, A. (2009). Exposure of children to airborne particulate matter of different size fractions during indoor physical education at school. Em *Building and Environment* (Vol. 44, pp. 1246–1252). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.09.010>
- Brown, J. S., Gordon, T., Price, O., & Asgharian, B. (2013). Thoracic and respirable particle definitions for human health risk assessment. Em *Particle and Fibre Toxicology* (Vol. 10). <https://doi.org/10.1186/1743-8977-10-12>
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Bartonova, A. *et al.* (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. Em *Environment International* (Vol. 99, pp. 293–302). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Chatoutsidou, S. E., Ondráček, J., Tesar, O., Tørseth, K., Zdímal, V., & Lazaridis, M. (2015). Indoor / outdoor particulate matter number and mass concentration in modern offices. Em *Building and Environment* (Vol. 92, pp. 462–474). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.023>

- Chen, C. (2009). Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors. Em *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* (Vol. 42, pp. 1103–1111). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.04.004>
- Chengappa, C., Edwards, R., Bajpai, R., Shields, K. N., & Smith, K. R. (2007). Impact of improved cookstoves on indoor air quality in the Bundelkhand region in India. Em *Energy for Sustainable Development* (Vol. 11, pp. 33–44). [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60398-1](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60398-1)
- Chung, A., Chang, D. P. Y., Kleeman, M. J., Perry, K. D., Cahill, T. A., Dutcher, D., Stroud, K. *et al.* (2001). Comparison of Real-Time Instruments Used To Monitor Airborne Particulate Matter. Em *Journal of the Air & Waste Management Association* (Vol. 51, pp. 109–120). <https://doi.org/10.1080/10473289.2001.10464254>
- Cohen, A. J., & Pope, C. A. (1995). Lung cancer and air pollution. Em *Environmental Health Perspectives* (Vol. 103, pp. 219–224). <https://doi.org/10.1289/ehp.95103s8219>
- Coombs, K. C., Chew, G. L., Schaffer, C., Ryan, P. H., Brokamp, C., Grinshpun, S. A., Reponen, T. *et al.* (2016). Indoor air quality in green-renovated vs. non-green low-income homes of children living in a temperate region of US (Ohio). Em *Science of the Total Environment* (Vol. 554–555, pp. 178–185). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.136>
- D-robotics UK. (2010). *Humidity & Temperature Sensor DHT 11*. Obtido de <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.
- Daisey, J. M., Angell, W. J., & Apte, M. G. (2003). Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: An analysis of existing information. Em *Indoor Air* (Vol. 13, pp. 53–64). <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2003.00153.x>
- Dockery, D. W., & Pope, C. A. (1994). Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. Em *Annual Review of Public Health*, (Vol. 15, pp. 107–132). <https://doi.org/10.1146/annurev.pu.15.050194.000543>
- Dominici, F., Wang, Y., Correia, A. W., Ezzati, M., Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2015). Chemical composition of fine particulate matter and life expectancy: in 95 US counties between 2002 and 2007. Em *Epidemiology* (Vol. 26, pp. 556–564). <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000297>

- Electrofun. (sem data-a). Arduino Mega 2560 R3 + Cabo USB - ElectroFun. Obtido 26 de Fevereiro de 2018, de <https://www.electrofun.pt/arduino-mega>
- Electrofun. (sem data-b). Display LCD 16x2 I2C com fundo verde - ElectroFun. Obtido 26 de Fevereiro de 2018, de https://www.electrofun.pt/display/display-lcd/display-lcd-16x2-com-i2c-verde#yt_tab_products1
- Emprego, M. (2013). Portaria n.º 353-A/2013 : valores mínimos de caudal de ar novo. *02.07.00_AVACLex*, (2).
- Energy Sector Management Assistance Program. (2011). Tools for Improving Air Quality, (March). Obtido de <https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/7607-Source%20Web%28Small%29.pdf>
- Ezzati, M., Mbinda, B. M., & Kammen, D. M. (2000). Comparison of emissions and residential exposure from traditional and improved cookstoves in Kenya. Em *Environmental Science and Technology* (Vol. 34, pp. 578–583). <https://doi.org/10.1021/es9905795>
- Fang, L., Clausen, G., & Fanger, P. O. (1998). Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. Em *Indoor Air* (Vol. 8, pp. 80–90). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1998.t01-2-00003.x>
- Frankel, M., Bekö, G., Timm, M., Gustavsen, S., Hansen, E. W., & Madsen, A. M. (2012). Seasonal variations of indoor microbial exposures and their relation to temperature, relative humidity, and air exchange rate. Em *Applied and Environmental Microbiology* (Vol. 78, pp. 8289–8297). <https://doi.org/10.1128/AEM.02069-12>
- Fromme, H., Diemer, J., Dietrich, S., Cyrys, J., Heinrich, J., Lang, W., ... Twardella, D. (2008). Chemical and morphological properties of particulate matter (PM10, PM2.5) in school classrooms and outdoor air. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 42, pp. 6597–6605). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.047>
- Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., & Rüdén, H. (2007). Particulate matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 41, pp. 854–866). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.053>
- Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M. C., Gilardoni, S. *et al.* (2015). Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics* (Vol. 15, pp. 8217–

8299). <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>

Godish, T. (2004). *Air Quality*. Washington, DC: Lewis Publisher

Graywolf. (2014). *IAQ air quality meter*. Obtido de: <http://www.wolfsense.com/pdf/GrayWolf-Indoor-Air-Quality-IAQ-Meter-Brochure-lo.pdf>.

Guo, H., Morawska, L., He, C., & Gilbert, D. (2008). Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 42, pp. 757–768). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.070>

Hack' Spark. (sem data). SDS011 Nova µg/m³ Particles Sensor (PM2.5 and PM10 Particles/Dust, USB Uart included and uart+digital output). Obtido 26 de Fevereiro de 2018, de <https://hackspark.fr/en/nova-pm-sensor-dust-air-quality-detection-laser-sds011.html>

Harrison, R. M., & Yin, J. (2000). Particulate matter in the atmosphere: Which particle properties are important for its effects on health? Em *Science of the Total Environment* (Vol. 249, pp. 85–101). [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00513-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6)

Hinds, W. C. (1999). Aerosol technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Em *Journal of Aerosol Science* (Vol. 14, pp. 175). [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(83\)90049-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(83)90049-6)

Hk-a. (2015). *HK-A5 Laser PM2.5/10 Sensor*. Obtido de <https://www.sourcing-electronics.com/datasheet/3f/SEN0177.pdf>.

IARC. (2013). Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Em *Environmental and molecular mutagenesis* (Vol. 51, pp. 229–235). <https://doi.org/10.1002/em>

Instructables. (2017). *Micro SD Card for arduino*. Obtido 26 de Junho de 2018, de <http://www.instructables.com/id/Micro-SD-Card-Tutorial/>

Jones, A. P. (1999). Indoor air quality and health. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 33, pp. 4535–4564). [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00272-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00272-1)

Jovašević-Stojanović, M., Bartonova, A., Topalović, D., Lazović, I., Pokrić, B., & Ristovski, Z. (2015). On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-

- based monitoring of respirable particulate matter. Em *Environmental Pollution* (Vol. 206, pp. 696–704). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.08.035>
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 120, pp. 475–483). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087>
- Koerner, B., & Klopatek, J. (2002). Anthropogenic and natural CO₂ emission sources in an arid urban environment. Em *Environmental Pollution* (Vol. 116, pp. S45–S51). [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00246-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00246-9)
- Kopperud, R. J., Ferro, A. R., & Hildemann, L. M. (2004). Outdoor versus indoor contributions to indoor particulate matter (PM) determined by mass balance methods. Em *Journal of the Air and Waste Management Association* (Vol. 54, pp. 1188–1196). <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470983>
- Kulkarni, P., Baron, P. A., & Willeke, K. (2011). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications: Third Edition*. <https://doi.org/10.1002/9781118001684>
- Lai, A. C. K., Thatcher, T. L., & Nazaroff, W. W. (2000). Inhalation Transfer Factors for Air Pollution Health Risk Assessment. Em *Journal of the Air & Waste Management Association* (Vol. 50, pp. 1688–1699). <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464196>
- Lam, H. C. Y., Li, A. M., Chan, E. Y. Y., & Goggins, W. B. (2016). The short-term association between asthma hospitalisations, ambient temperature, other meteorological factors and air pollutants in Hong Kong: A time-series study. *Thorax* (Vol. 71, pp. 1097–1109). <https://doi.org/10.1136/thoraxjnl-2015-208054>
- Landgrebe, J. D., & Pratsinis, S. E. (1990). A discrete-sectional model for particulate production by gas-phase chemical reaction and aerosol coagulation in the free-molecular regime. Em *Journal of Colloid And Interface Science* (Vol. 139, pp. 63–86). [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(90\)90445-T](https://doi.org/10.1016/0021-9797(90)90445-T)
- Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. Em *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 86, pp. 225–234). <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Lee Rodgers, J., & Alan Nice Wander, W. (1988). Thirteen ways to look at the correlation

- coefficient. *American Statistician*. Em *The American Statistician* (Vol. 42, pp. 59–66). <https://doi.org/10.1080/00031305.1988.10475524>
- Lei, Z., Liu, C., Wang, L., & Li, N. (2017). Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter. Em *Building and Environment* (Vol. 125, pp. 240–247). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051>
- Licina, D., Tian, Y., & Nazaroff, W. W. (2017). Inhalation intake fraction of particulate matter from localized indoor emissions. Em *Building and Environment* (Vol. 123, pp. 14–22). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.037>
- Logue, J. M., Mckone, T. E., Sherman, M. H., & Singer, B. C. (2011). Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences. Em *Indoor Air* (Vol. 21, pp. 92–109). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2010.00683.x>
- Madureira, J., Paciência, I., & De Oliveira Fernandes, E. (2012). Levels and indoor-outdoor relationships of size-specific particulate matter in naturally ventilated portuguese schools. Em *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* (Vol. 75, pp. 1423–1436). <https://doi.org/10.1080/15287394.2012.721177>
- Mendell, M. J. (2007). Indoor residential chemical emissions as risk factors for respiratory and allergic effects in children: A review. Em *Indoor Air* (Vol. 17, pp. 259–277). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00478.x>
- Midouhas, E., Kokosi, T., & Flouri, E. (2018). Outdoor and indoor air quality and cognitive ability in young children. Em *Environmental Research* (Vol. 161, pp. 321–328). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.026>
- Monn, C., & Becker, S. (1999). Cytotoxicity and induction of proinflammatory cytokines from human monocytes exposed to fine (PM_{2.5}) and coarse particles (PM_{10-2.5}) in outdoor and indoor air. Em *Toxicology and Applied Pharmacology* (Vol. 155, pp. 245–252). <https://doi.org/10.1006/taap.1998.8591>
- Mouser, E. (sem data-b). *SEN0177*. Obtido 26 de Fevereiro de 2018, de <https://pt.mouser.com/ProductDetail/DFRobot/SEN0177/?qs=lqAf%2FiVYw9iC5iuSTDmyKg%3D%3D>
- Mukherjee, A., Stanton, L. G., Graham, A. R., & Roberts, P. T. (2017). Assessing the utility of low-cost particulate matter sensors over a 12-week period in the Cuyama valley of California. *Sensors (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/s17081805>

- Notícias do Nordeste. 2018. *Instituto Politécnico de Bragança (IPB) comemora o 35º aniversário*. Obtido 1 de Junho de 2018 de: <https://www.noticiasdonordeste.pt/2018/01/instituto-politecnico-de-braganca-ipb.html>.
- Nova. (2015). *Laser PM2.5 Sensor Specification*. Obtido 26 de Fevereiro de 2018, de <https://nettigo.pl/attachments/398>
- Obaidullah, M., & Bram, S. (2012). A review on particle emissions from small scale biomass combustion. *International Journal of Renewable Energy Research*, (Vol. 2, pp. 147–159) . Obtido de <http://www.ijrer.net/index.php/ijrer/article/view/147>
- Oliveira, E. F., Gustafsson, H., Seppänen, O., Crump, D. Ventura, G. S. (2008) WP3 Final Report on Characterization of Spaces and Sources. EnVIE Project, European Commission 6th Framework Programme of Research, Brussels, Belgium. Obtido de: <https://paginas.fe.up.pt/~envie/documents/finalreports/Final%20Reports%20Publishable/EnVIE%20WP3%20Final%20Report.pdf>
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. Em *Journal of the Air & Waste Management Association* (Vol. 56, pp. 709–742). <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Putaud, J.-P., Raes, F., Van Dingenen, R., Brüggemann, E., Facchini, M.-C., Decesari, S., Wiedensohler, A. *et al.* (2004). A European aerosol phenomenology—2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 38, pp. 2579–2595). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.041>
- Riley, W. J., McKone, T. E., Lai, A. C. K., & Nazaroff, W. W. (2002). Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms. Em *Environmental Science and Technology* (Vol. 36, pp. 200–207). <https://doi.org/10.1021/es010723y>
- Ruzer, L. S., & Harley, N. H. (2005). *Aerosols Handbook, Measurement, Dosimetry, and Health Effects*. New York, NY: CRC Press
- Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Assimakopoulos, V. *et al.* (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. Em *Energy and Buildings* (Vol. 40, pp. 1833–1843). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.002>
- Schauer, J. J., Rogge, W. F., Hildemann, L. M., Mazurek, M. A., Cass, G. R., & Simoneit, B. R. T. (1996). Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 30, pp. 3837–3855).

[https://doi.org/10.1016/1352-2310\(96\)00085-4](https://doi.org/10.1016/1352-2310(96)00085-4)

SenseAir. (2015). Datasheet: K-30 Sensor. Obtido 27 de Maio de 2018, de https://img.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/456729_1584920.PDF

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. Em *Energy and Buildings* (Vol. 31, pp- 221-235). [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3)

Slezakova, K., Morais, S., & Pereira, M. do C. (2013). Atmospheric Nanoparticles and Their Impacts on Public Health. Em *IntechOpen* (pp. 503–529) <https://doi.org/10.5772/54775>

Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Preuss, P. W. *et al.* (2013). The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring. Em *Environmental Science & Technology* (Vol. 47, pp. 11369–11377). <https://doi.org/10.1021/es4022602>

Song, P., Wanga, L., Hui, Y., & Li, R. (2015). PM2.5 Concentrations Indoors and Outdoors in Heavy Air Pollution Days in Winter. Em *Procedia Engineering* (Vol. 121, pp. 1902–1906). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.173>

Standard for the design of high-performance green buildings except low-rise residential buildings. (2011). *ASHRAE Standard* (Vol. 189.1-2011).

Sun, Y., Wang, P., Zhang, Q., Ma, H., Hou, J., & Kong, X. (2015). Indoor Air Pollution and Human Perception in Public Buildings in Tianjin, China. Em *Procedia Engineering* (Vol. 121, pp. 552–557). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.1032>

Sundell, J. (2004). On the history of indoor air quality and health. Em *Indoor Air* (Vol. 14, pp. 51–58). <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x>

Sutton, C. D. (1993). Computer-intensive methods for tests about the mean of an asymmetrical distribution. Em *Journal of the American Statistical Association* (Vol. 88, pp. 802–810). <https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10476345>

Tan, T. L., Lebron, G. B. (2012). Determination of Carbon Dioxide, Carbon Monoxide, and Methane Concentrations in Cigarette Smoke by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Em *Journal of Chemical Education* (Vol. 89, pp. 383–386). <https://doi.org/10.1021/ed200178s>

- ThermoScientific. (2004). *ADR-1200S*. Obtido de http://www.equipcoservices.com/pdf/manuals/thermo_adr1200s.pdf
- ThingSpeak. (2013). *Learn More - ThingSpeak IoT*. Obtido 18 de Junho de 2018, de https://thingspeak.com/pages/learn_more
- Tomasi, C., & Lupi, A. (2016). Primary and Secondary Sources of Atmospheric Aerosol. Em *Atmospheric Aerosols* (pp. 1–86). <https://doi.org/10.1002/9783527336449.ch1>
- Turnbull, A. B., & Harrison, R. M. (2000). Major component contributions to PM10 composition in the UK atmosphere. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 34, pp. 3129–3137). [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00441-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00441-0)
- União Europeia. (2008). Directiva 2008/50/CE. *Parlamento Europeu*, 28 pags. (43 artigos). Obtido de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:01:ES:HTML>
- United States Environmental Protection Agency. (2015). *Particulate matter*. Obtido de <https://www.epa.gov/pm-pollution>
- United States Environmental Protection Agency. (2008). Particulate Matter Sampling. *APTI 435: Atmospheric Sampling Course* (pp. 1–62). Obtido de [papers://dee23da0-e34b-4588-b624-f878b46d7b3d/Paper/p391](https://www.epa.gov/papers//dee23da0-e34b-4588-b624-f878b46d7b3d/Paper/p391)
- United States Environmental Protection Agency. (2005). Review of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter: Assessment of Scientific and Technical Information. Obtido de: <https://bit.ly/2uER2xt>
- United States Department of Education, (2016). New National Academies Report on Indoor Air Cites Berkeley Lab Research | *Energy Analysis and Environmental Impacts Division*. Obtido 20 de Fevereiro de 2018, de <https://eaei.lbl.gov/news/article/new-national-academies-report-indoor>
- Van Dingenen, R., Raes, F., Putaud, J. P., Baltensperger, U., Charron, A., Facchini, M. C., ... Wählén, P. (2004). A European aerosol phenomenology - 1: Physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe. Em *Atmospheric Environment* (Vol. 38, pp. 2561–2577). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.040>
- Wedding, J. B., McFarland, A. R., & Cermak, J. E. (1977). Large Particle Collection

- Characteristics of Ambient Aerosol Samplers. Em *Environmental Science and Technology* (Vol. 11, pp. 387–390). <https://doi.org/10.1021/es60127a005>
- WHO. (2000). Air quality guidelines for Europe. *Environmental Science and Pollution Research* (Vol. 3, pp. 23–23). <https://doi.org/10.1007/BF02986808>
- WHO. (2016a). Indoor air pollution - Health and Social Impacts of Household Energy. Obtido 17 de Dezembro de 2017, de http://www.who.int/indoorair/health_impacts/en/
- WHO. (2016b). Ambient air pollution. Obtido 21 de Janeiro de 2018 <http://www.who.int/airpollution/ambient/pollutants/en/>
- WHO. (2010). WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants. *Bonn, Germany: in puncto druck medien GmbH* (pp. 0–484). <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-I1>
- You, Y., Niu, C., Zhou, J., Liu, Y., Bai, Z., Zhang, J., Zhang, N *et al.* (2012). Measurement of air exchange rates in different indoor environments using continuous CO₂ sensors. Em *Journal of Environmental Sciences* (Vol. 24, pp. 657–664). [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60812-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60812-7)

ANEXO 1

Código elaborado para o funcionamento do sistema

```
//DEFINIÇÕES MÓDULO DHT11_____
#include <dht11.h>
dht11 DHT;
#define DHT11_PIN 3

//DEFINIÇÕES MÓDULO SDS011_____
#include <SDS011-select-serial.h>
float p10, p25;
int error;
SDS011 my_sds(Serial2);

//DEFINIÇÕES MÓDULO LCD_____
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 2, 4, 5, 6, 7); //(RS, E, D4, D5, D6, D7)

//DEFINIÇÕES MÓDULO SEN0177_____
#include <Arduino.h>
#define LENG 31
unsigned char buf[LENG];
int PM01Value = 0;
int PM2_5Value = 0;
int PM10Value = 0;

//DEFINIÇÕES MÓDULO CCS811_____
#include "SparkFunCCS811.h"
#define CCS811_ADDR 0x5B //Default I2C Address
CCS811 mySensor(CCS811_ADDR);

//DEFINIÇÕES MÓDULO ESP8266_____
#define SSID "Matheus"
#define PASSWORD "12345678"
char thingSpeakAddress[] = "api.thingspeak.com";
String writeAPIKey = "VCM9VJ2AXHZRNLWW";
long lastConnectionTime = 0;
boolean lastConnected = false;
```

```

int failedCounter = 0;
#include "uartWIFI.h"
WIFI wifi;
unsigned long tempo;
unsigned long sender = 0;
unsigned long intervalo = 54300;
unsigned long disp1 = 12000;

//DEFINIÇÕES MÓDULO SDcard_____
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
File medicaao;
int pinCS = 53;

//DEFINIÇÕES MÓDULO K30_____
SoftwareSerial K_30_Serial(12,13);
byte readCO2[] = {0xFE, 0X44, 0X00, 0X08, 0X02, 0X9F, 0X25};
byte response[] = {0,0,0,0,0,0};
int valMultiplier = 1;

void setup() {

    lcd.begin(16, 2);    //INICIANDO O MÓDULO LCD (COLUNAS,LINHAS)

    wifi.begin();      //INICIANDO ESP8266
    bool b = wifi.Initialize(STA, SSID, PASSWORD);
    if (!b)
    {
        DebugSerial.println("Init error");
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Erro Wifi");
        delay(3000);
    }
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Conectando Wi-Fi");
    delay(7000);
    String ipstring = wifi.showIP();
    DebugSerial.println("My IP address:");
    DebugSerial.println(ipstring);
    String wifistring = wifi.showJAP();
    DebugSerial.println(wifistring);
    lcd.setCursor(0, 1);

```



```

\tCO2 (ppm) \tTVOC (ppb)");
}

void loop() {

  int chk;
  chk = DHT.read(DHT11_PIN);

  Serial.print(DHT.humidity, 1);
  Serial.print("\t \t");
  Serial.print(DHT.temperature, 1);

  error = my_sds.read(&p25, &p10);

  if (! error) {
    Serial.print("\t \t");
    Serial.print(String(p25));
    Serial.print("\t \t");
    Serial.print(String(p10));
    Serial.print("\t \t");
  }

  sendRequest(readCO2);
  unsigned long valCO2 = getValue(response);

  sendRequest(readCO2);
  unsigned long valCO2test = getValue(response);
  if (valCO2 > (4*valCO2test)){
    valCO2=valCO2test;
  }

  if (Serial3.find(0x42)) {
    Serial3.readBytes(buf, LENG);

    if (buf[0] == 0x4d) {
      if (checkValue(buf, LENG)) {
        PM2_5Value = transmitPM2_5(buf);
        PM10Value = transmitPM10(buf);
      }
    }
  }

  static unsigned long OledTimer = millis();

```

```

if (millis() - OledTimer >= 1000)
{
  OledTimer = millis();

  Serial.print(PM2_5Value);
  Serial.print("\t\t");
  Serial.print(PM10Value);
  mySensor.readAlgorithmResults();

  Serial.print("\t\t");
  Serial.print(valCO2);
  Serial.print("\t\t");
  Serial.println(mySensor.getTVOC());
}

mySensor.setEnvironmentalData(DHT.humidity, DHT.temperature); //CORRIGINDO SINAL CCS811

if (millis() <= (disp1+3000)) {
  lcd.clear ();
  lcd.setCursor(3, 0);
  lcd.print("T( C) HR(%)");
  lcd.setCursor(5, 0);
  lcd.print(char(223));
  lcd.setCursor(4, 1);
  lcd.print(DHT.temperature);
  lcd.setCursor(10, 1);
  lcd.print(DHT.humidity);
}

if ((millis() > (disp1+3000)) && (millis () <= (disp1+6000))){
  lcd.clear ();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("CO2 (ppm)");
  lcd.setCursor(12, 0);
  lcd.print(valCO2);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print ("COV's (ppb)");
  lcd.setCursor(12, 1);
  lcd.print(mySensor.getTVOC());
}

if ((millis() > (disp1+6000)) && (millis () <= (disp1+9000))){

```

```

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("  PM2,5 PM10");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("SDS");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print(p25);
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print(p10);
}

```

```

if (millis() > (disp1+9000) && millis () < (disp1+15000)){
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("  PM2,5 PM10");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("SEN");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print(PM2_5Value);
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print(PM10Value);
disp1=millis();
}

```

```

if (millis() >= sender+intervalo) {

```

```

    String temps = String (DHT.temperature, DEC);
    String hums = String (DHT.humidity, DEC);
    String tvoc = String (mySensor.getTVOC(), DEC);
    String co2s = String (valCO2, DEC);

```

```

    tempo=(millis()/1000);
    medicaio = SD.open("medicao1.txt", FILE_WRITE);

```

```

updateThingSpeak("field1="+temps+"&field2="+hums+"&field3="+p25+"&field4="+p10+"&field5="+PM2_5Value+"&field6="+PM10Value+"&field7="+tvoc+"&field8="+co2s);

```

```

if (medicaio) {
    medicaio.print(tempo);
    medicaio.print ("\t");
    medicaio.print(hums);

```

```

medicao.print ("\t");
medicao.print(temps);
medicao.print ("\t");
medicao.print(p25);
medicao.print ("\t");
medicao.print(p10);
medicao.print ("\t");
medicao.print(PM2_5Value);
medicao.print ("\t");
medicao.print(PM10Value);
medicao.print ("\t");
medicao.print(co2s);
medicao.print ("\t");
medicao.println(tvoc);
medicao.close();

sender = millis();
disp1=millis();
}
else {
  Serial.println("Erro ao abrir o arquivo.txt");
  sender = millis();
}
}
}

char checkValue(unsigned char *thebuf, char leng)
{
  char receiveflag = 0;
  int receiveSum = 0;
  for (int i = 0; i < (leng - 2); i++) {
    receiveSum = receiveSum + thebuf[i];
  }
  receiveSum = receiveSum + 0x42;

  if (receiveSum == ((thebuf[leng - 2] << 8) + thebuf[leng - 1]))
  {
    receiveSum = 0;
    receiveflag = 1;
  }
  return receiveflag;
}
}

```

```

int transmitPM01(unsigned char *thebuf)
{
    int PM01Val;
    PM01Val = ((thebuf[3] << 8) + thebuf[4]);
    return PM01Val;
}
int transmitPM2_5(unsigned char *thebuf)
{
    int PM2_5Val;
    PM2_5Val = ((thebuf[5] << 8) + thebuf[6]);
    return PM2_5Val;
}
int transmitPM10(unsigned char *thebuf)
{
    int PM10Val;
    PM10Val = ((thebuf[7] << 8) + thebuf[8]);
    return PM10Val;
}

void sendRequest(byte packet[])
{
    while(!K_30_Serial.available())
    {
        K_30_Serial.write(readCO2,7);
        delay(25);
    }

    int timeout=0; //set a timeoute counter
    while(K_30_Serial.available() < 7 ) //Wait to get a 7 byte response
    {
        timeout++;
        if(timeout > 10)
        {
            while(K_30_Serial.available())
                K_30_Serial.read();

            break;
        }
        delay(25);
    }

    for (int i=0; i < 7; i++)

```

```

    {
        response[i] = K_30_Serial.read();
    }
}

unsigned long getValue(byte packet[])
{
    int high = packet[3];
    int low = packet[4];

    unsigned long val = high*256 + low;
    return val* valMultiplier;
}

void updateThingSpeak(String tsData)
{
    if (wifi.newMux(1, thingSpeakAddress, 80))
    {
        wifi.Send("POST /update HTTP/1.1\n");
        wifi.Send("Host: api.thingspeak.com\n");
        wifi.Send("Connection: close\n");
        wifi.Send("X-THINGSPEAKAPIKEY: " + writeAPIKey + "\n");
        wifi.Send("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
        wifi.Send("Content-Length: ");
        wifi.Send(String(tsData.length()));
        wifi.Send("\n\n");
        wifi.Send(tsData);
        Serial.println("Success");
        wifi.closeMux();
    }
    else

    {
        failedCounter++;

        Serial.println("Connection to ThingSpeak Failed (" + String(failedCounter, DEC) + ")");

        lcd.clear ();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Erro no envio dos dados");
        lastConnectionTime = millis(); } }

```

