



Sistema de Monitorização e de Controlo de Qualidade do Ar Interior: Construção, Validação e Aplicação

Samuel Fernandes

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por
Manuel Feliciano
Getúlio Igrejas

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Bragança
2015



Sistema de Monitorização e de Controlo de Qualidade do Ar Interior: Construção, Validação e Aplicação

Samuel Queijo Fernandes

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança
para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental*

Orientado por
Manuel Feliciano
Getúlio Igrejas

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Bragança
2015

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar o meu especial apreço a todos os que colaboraram e me apoiaram ao longo desta etapa do meu percurso académico, uma etapa muitos altos e baixos, mas muita enriquecedora em termos profissionais e pessoais.

Ao orientador da tese Professor Doutor Manuel Feliciano, que acreditou no projeto que eu próprio propus e me aceitou como seu orientando, pela confiança depositada em mim ao longo da elaboração da tese, pela autonomia que me facultou, e ainda por toda a sapiência que me transmitiu nos últimos anos.

Ao coorientador da tese Professor Doutor Getúlio Igrejas, pela disponibilidade demonstrada desde o contacto inicial, pela dedicação e compreensão na orientação do projeto desenvolvido numa área que para mim era desconhecida, e por todos os ensinamentos a nível pessoal e profissional.

Ao Professor Doutor Artur Gonçalves, pela disponibilidade em participar nos ensaios desenvolvidos e pelo incentivo no desenvolvimento e melhoria do projeto.

Ao Engenheiro e Mestre Filipe Rodrigues, por todo o conhecimento transmitido, pelo apoio disponibilizado, e ao meu amigo e colega, Jorge Jesus, pelas palavras de motivação nas situações de maior desânimo, pela disponibilidade prestada e por todos os bons momentos que passamos juntos. A ambos o meu muito obrigado pela disponibilidade na participação nos ensaios desenvolvidos.

À minha família, por todo o apoio incondicional prestados ao longo do meu percurso académico e por toda a compreensão nestes últimos meses que antecederam o final da tese.

Aos funcionários dos Serviços de Imagem do IPB, pela total disponibilidade em ajudar nas mais diversas situações e pelo equipamento disponibilizado.

Por fim, a todos os que de forma direta ou indireta desempenharam um papel importante na elaboração do presente estudo.

A todos vós a minha sincera gratidão.

RESUMO

A crise do petróleo, ocorrida no início da década de 70, promoveu o avanço da eficiência térmica dos edifícios, através da utilização de novas metodologias e técnicas de construção. O desenvolvimento construtivo trouxe implicações negativas para as taxas de renovação do ar, que diminuíram em média de 1 para 0,50 rph (Renovações de Ar por Hora), e consequentemente para a saúde dos ocupantes dos espaços interiores. Deste modo, criar medidas e mecanismos de melhoria da qualidade do ar interior tornou-se num dos desafios prioritários da política ambiental de muitos dos países desenvolvidos.

O presente estudo teve por objetivo principal a construção, validação e aplicação de um sistema de monitorização e controlo da qualidade do ar interior, de baixo custo e de fácil instalação. O sistema integra sensores específicos que permitem a medição dos parâmetro de qualidade do ar interior (dióxido de carbono, monóxido de carbono, temperatura e humidade relativa), uma unidade de aquisição, processamento e controlo e, ainda, um mecanismo de ventilação dinâmico baseado nas concentrações de dióxido e/ou monóxido de carbono. Além disso, está equipado com um mini LCD e um módulo WiFi que permite o envio e a consulta dos dados em tempo real através da internet.

A validação do sistema envolveu a calibração dos sensores e a realização de ensaios de comparação das respostas dos sensores do sistema com a resposta de outros sensores previamente calibrados e de fiabilidade comprovada. Ambas as metodologias demonstraram que o sistema é bastante fiável e robusto. Para avaliar o desempenho do sistema em situações concretas, foram realizados quatro ensaios distintos, em três espaços (gabinetes) com diferentes características e localizações. Cada ensaio teve a duração de um dia de trabalho e foi realizado tendo em conta uma determinada tipologia de ventilação: 1) sem ventilação (apenas a que ocorreu por infiltração); 2) ventilação voluntária natural, através da abertura de portas e/ou janelas; 3) ventilação mecânica simples, através da insuflação de ar para o interior dos espaços; 4) ventilação mecânica simples, através da extração de ar dos espaços interiores.

Os ensaios realizados em condições de ausência de ventilação evidenciaram que as concentrações de CO₂ excederam, com relativa facilidade, os limiares de proteção legais, mostrando que é importante aumentar as taxas de ventilação dos espaços interiores. Os ensaios realizados em condições de ventilação natural ou ventilação mecânica simples, por insuflação de ar novo ou por extração de ar, mostraram claramente que as diferentes formas de ventilação foram eficientes na criação e manutenção de condições aceitáveis de QAI. Os ensaios revelaram ainda que a ventilação mecânica proporcionou menores perdas térmicas e assegurou melhores condições de conforto térmico em comparação com a ventilação natural, além de não requerer a intervenção dos ocupantes.

O protótipo construído revelou-se eficaz no controlo da qualidade do ar interior de espaços escolares, de baixa volumetria e de reduzida ocupação, e poderá ser facilmente adaptado a espaços de maior volumetria e com outro tipo de função.

Palavras-chave:

Atmosferas interiores, dióxido de carbono, monóxido de carbono, monitor, arduíno, edifícios escolares, ventilação.

ABSTRACT

The oil crisis of early seventies promoted advances on the thermal performance of buildings, arising from the use of new construction methodologies and techniques. These constructive developments brought negative implications on the air change rates of indoor spaces, which decreased on average from 1 to 0.50 ACH (Air Change Rates), and, consequently, on the human health. Thus, creating measures and mechanisms to improve indoor air quality has become one of the priority challenges of environmental policy in many developed countries. This study aimed at developing, validating and testing a low cost and an easy to install indoor air quality monitoring and control system. The system includes specific sensors for measuring indoor air quality parameters (carbon dioxide, carbon monoxide, air temperature and relative humidity), an acquisition, processing and control unit, and a demand controlled ventilation mechanism based on the concentrations of dioxide and/or carbon monoxide. Moreover, it is equipped with a mini LCD screen and a Wi-Fi card to provide the data over the internet in real time.

The system validation was performed by calibrating and intercomparing the different sensors with other sensors. To assess system performance in practical situations, four distinct experiments were also carried out in three different spaces (office rooms) with regard to dimensions, occupancy and location. The experiments lasted about one workday each and were performed under different ventilation conditions: 1) without ventilation (only that occurring by infiltration); 2) with voluntary natural ventilation, by opening windows and/or doors; 3) with simple mechanical ventilation by insufflating air inside indoor spaces; 4) with simple mechanical ventilation by exhausting air from indoor spaces.

Experiments conducted under conditions of no ventilation showed that CO₂ concentrations easily exceeded the legal protection threshold, demonstrating how important is to increase the ventilation rates of the indoor spaces. Results from the other experiments clearly indicate that natural voluntary ventilation and simple mechanical ventilation by blowing fresh air or exhausting saturated air were effective in assuring acceptable levels of indoor air quality. It was also noticeable that mechanical ventilation provided smaller thermal losses and ensured better thermal comfort conditions when compared to natural ventilation, with the advantage of not requiring any involvement of occupants.

The developed prototype has proved to be reliable, feasible and effective in controlling indoor air quality of school spaces with low volumes and low occupancies and it can be easily adapted to larger spaces and spaces with different functions and characteristics.

Keywords:

Indoor atmospheres, carbon dioxide, carbon monoxide, monitor, arduino, school buildings, ventilation.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AES	Padrão de Criptografia Avançada (<i>Advanced Encryption Standard</i>)
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
ADC	Conversor Analógico para Digital (<i>Analog to Digital Converter</i>)
CI	Controlador Interno
CMOS	Semicondutor de Metal-óxido Complementar (<i>Complementary metal oxide semiconductor</i>)
CSS	Linguagem de programação <i>JavaScript</i> e <i>Cascading Style Sheets</i>
CSV	Ficheiro de dados separados por vírgula
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (<i>Environmental Protection Agency</i>)
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto (<i>Hypertext Transfer Protocol</i>)
I2C	Tipologia de circuito <i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICSP	In Serial Circuit Programming
IDE	Ambiente de Desenvolvimento (<i>Integrated Development Environment</i>)
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto (<i>HyperText Markup Language</i>)
IoT	Internet das Coisas
IP	<i>Protocolo de Internet</i> (Internet Protocol Address)
QAI	Qualidade do Ar Interior
M2M	Máquina a Máquina (<i>Machine to Machine</i>)
MET	Atividade Metabólica Equivalente
MTx	Main Terminal
NDIR	Sensor de Infravermelho não Dispersivo (<i>Nondispersive Infrared Sensor</i>)

SÍMBOLOS

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Microgramas por metro cubico
Bit	Dígito binário
BQ	Bequerel
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COV's	Compostos Orgânicos Voláteis
DC	Corrente continua
HR	Humidade relativa
KOH	Hidróxido de potássio
KHCO ₃	Bicarbonato de potássio
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
kPa	Kilopascals
L/s	Litros por segundo

NOx	Óxidos de Azoto
m ³	Metro cubico
m ³ /h/pessoa	Metros cúbicos por hora por pessoa
PMx	Material particulado
r.p.m.	Rotações por minuto
V	Volte

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
<i>Abstract</i>	iii
Lista de Siglas e Abreviaturas	iv
Símbolos	iv
Índice	vi
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Quadros	x
1 Introdução.....	1
2 Qualidade do Ar interior	4
2.1 Breve Resenha Histórica.....	4
2.2 Poluentes e Fontes contaminantes de Atmosferas Interiores.....	6
2.3 Efeitos da QAI na saúde e no conforto Humano	11
3 Prevenção e Controlo de Problemas de QAI.....	16
4 Métodos de Ventilação.....	18
4.1 Ventilação Mecânica.....	19
4.2 Ventilação Natural	21
5 Enquadramento Legal	24
6 Construção e Validação do Sistema de QAI	28
6.1 Descrição Geral.....	28
6.2 Constituição do Sistema de QAI.....	31
6.2.1 Sensor de Dióxido de Carbono	31
6.2.2 Sensor de Monóxido de Carbono.....	33
6.2.3 Sensor de Humidade Relativa e Temperatura do Ar.....	35
6.2.4 Unidade de Processamento e Controlo	37
6.2.5 Sistema de controlo do ventilador.....	39
6.2.6 Ventilador.....	40
6.2.7 Mini Display LCD	42

6.2.8	Módulo WiFi.....	43
6.2.9	Servidor e página web.....	44
6.3	Calibração/Validação dos Instrumentos de Medição.....	46
6.3.1	Validação do sensor de dióxido de carbono.....	47
6.3.2	Validação do sensor de monóxido de carbono.....	50
6.3.3	Validação do sensor de temperatura e humidade relativa.....	51
7	Aplicações Práticas do Sistema de QAI.....	54
7.1	Descrição dos ensaios realizados	54
7.2	Avaliação dos níveis de dióxido de carbono	55
7.3	Avaliação da temperatura e da humidade relativa do ar interior	61
8	Conclusão.....	70
	Referências Bibliográficas.....	73
	Anexos	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Ventilação mecânica inadequada (lado esquerdo), ventilação adequada (lado direito). Adaptado de (Wang <i>et al.</i> , 2005).....	20
Figura 4.2 Sistemas básicos de distribuição de ar: (A) ventilador de parede; (B) ventilador de cobertura; (C) sistemas combinados, com toma de ar na parede e telhado. Adaptado de (Wang <i>et al.</i> , 2005).	21
Figura 4.3 Ilustração da dinâmica da ventilação Natural. Adaptado de (EcoMENA, 2015)22	
Figura 6.1 Monitorização e controlo do processo de qualidade do ar interior. A – Sensores; B – Processador e Controlador; C – Atuador; D – Ventilador; E – WiFi.	30
Figura 6.2 Protótipo do monitor e controlador de qualidade do ar interior.....	31
Figura 6.3 Sensor de CO ₂ K-30 10,000ppm. Adaptado de (CO2meter, 2015)	32
Figura 6.4 Sensor de monóxido de carbono CMM5042. Adaptado de (FIGARO, 2015) ...	33
Figura 6.5 Relação da concentração de CO e tensão elétrica (V). Adaptado de (FIGARO, 2015).....	34
Figura 6.6 Sensor de humidade relativa e temperatura SHT15. Adaptado de (Sparkfun, 2010).....	35
Figura 6.7 Arduino Mega2560. Adaptado de (Arduino, 2015).....	38
Figura 6.8 Ambiente de Desenvolvimento Integrado (A), Terminal de Comunicação entre o Arduino e o Computador(B).....	39
Figura 6.9 Ventilador Cata B-10	41
Figura 6.10 Display de Cristal Liquido. Adaptado de (Inmotion, 2015).....	42
Figura 6.11 Placa wireless CC3000. Adaptado de (Adafruit, 2014)	43
Figura 6.12 Página Web	46
Figura 6.13 Verificação inicial do sensor de dióxido de carbono K-30. (esquerda) com padrão de CO ₂ 375 ppm; (direita) com padrão de CO ₂ de 1250 ppm.	48
Figura 6.14 Verificação do sensor K-30 em função da sonda Gray Wolf IQ-610.....	49
Figura 6.6.15 Reta de calibração do sensor K-30 obtida por comparação com a sonda IQ-610	49
Figura 6.16 Verificação do sensor de monóxido de carbono. (esquerda) com padrão de CO 95 ppm; (direita) com padrão de CO de 2 ppm.	50

Figura 6.17 Calibração da Humidade Relativa do sensor SHT15. (esquerda) com padrão de humidade 73,5%; (direita) com padrão de humidade 22,5%.	51
Figura 6.18 Verificação da humidade relativa lida pelos sensores SHT15 e Tinytag Plus 2-TGP-4204	52
Figura 6.19 Reta de calibração do sensor de Humidade Relativa SHT15 obtida por comparação com a resposta do sensor Tinytag	53
Figura 6.20 Verificação da temperatura lida pelos sensores SHT15 e Tinytag Plus 2-TGP-4204	53
Figura 7.1 Variação das concentrações de dióxido de carbono em função do número de ocupantes nas Salas A, B e C (da esquerda para a direita).....	56

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 Poluentes de atmosferas interiores e respectivas fontes (Wang <i>et al.</i> , 2005).....	7
Quadro 2.2 Potenciais efeitos dos poluentes de atmosferas interiores na saúde humana. Adaptado de (CEPA, 2013; Erdmann <i>et al.</i> , 2002)	12
Quadro 2.3 Efeitos de diferentes concentrações de CO ₂ no ser humano. Adaptado de (EPA 2000).....	13
Quadro 2.4 Efeitos resultantes da exposição humana aa elevadas concentrações de monóxido de carbono. Adaptado de (Fierro <i>et al.</i> , 2001; Raub e Benignus, 2002; WHO, 2000)	14
Quadro 5.1 Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, [m ³ /(hora.pessoa)]. Retirado de (Portarian.º353-A, 2013)	26
Quadro 5.2 Limiares de proteção e margens de tolerância. Adaptado de (Portarian.º353-A, 2013; 2006).....	27
Quadro 6.1 Relação da humidade relativa com a temperatura. Retirado de GrayWolf (2011)	51

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar no interior (QAI) em habitações, escritórios, escolas, creches, lares de idosos, hospitais ou outros edifícios públicos ou privados é um fator essencial e determinante para uma vida saudável e para o nosso bem-estar. De facto, passamos grande parte do tempo das nossas vidas nestes locais, muitas vezes expostos a atmosferas pouco ou nada saudáveis (Bluyssen *et al.*, 2010; Clausen *et al.*, 2009; Dales *et al.*, 2008; Farrow *et al.*, 1997; Frontczak *et al.*, 2012; Madureira *et al.*, 2015). A realidade mostra que um vasto conjunto de substâncias perigosas emitidas pelos materiais de construção e de mobiliário, por equipamentos e/ou por ações conduzidas no interior dos edifícios, tais como a queima de combustíveis, levam ao aparecimento de um amplo espectro de problemas de saúde, desde situações frequentes de desconforto e de interferência no desempenho cognitivo, associadas a exposições a atmosferas com substâncias libertadas pelo próprio metabolismo humano (e.g. bioodores, dióxido de carbono) (Eide *et al.*, 2013; Melikov e Dzhartov, 2013; Usha *et al.*, 2012), a situações mais graves que em alguns casos podem mesmo ser fatais (Burroughs e Shirley, 2013; Chan *et al.*, 2015; Hardin *et al.*, 2003; OEHHA, 2000; Samet *et al.*, 1988).

A qualidade do ar interior não é um problema recente. A literatura da antiguidade clássica faz várias referências à contaminação de atmosferas interiores (Burroughs, 2013) e sabe-se que o despertar da preocupação crescente com a higiene dos espaços interiores teve a sua génese na revolução industrial (Sundell, 2004). Mais recentemente, com a crise petrolífera mundial da década de setenta (Séc. XX), foram adotadas novas metodologias de construção que tornaram os edifícios mais estanques com o objetivo de reduzir as perdas energéticas. Porém, essa construção com claras vantagens do ponto de vista energético, levou a uma redução acentuada das taxas de ventilação natural e, conseqüentemente, ao aumento da acumulação do ar poluído no interior (Gül, 2011; Milica, 2009; Wang *et al.*, 2005). Além disso, a grande procura de materiais sintéticos e químicos para construção e decoração incrementou as fontes de poluição de atmosferas interiores (Levin e Associates, 1989; Mitchell e Braun, 2013; Sundell, 2004).

Estas alterações construtivas associadas ao aparecimento de problemas na saúde humana alertaram a comunidade científica e sensibilizaram a sociedade, em geral, para os problemas da QAI, a par da eficiência energética nos edifícios. Atualmente, a exposição a ar

interior é uma das causas mais relevantes de morbilidade e mortalidade, pelo que não surpreende que muito recentemente a EPA e a Science Advisory Board (SAB) tenham a poluição do ar interior entre os cinco principais riscos ambientais para a saúde pública (Zhang e Xu, 2004). Garantir uma boa qualidade do ar interior (QAI) deve ser, por isso, um objetivo de qualquer projeto de construção e de gestão de qualquer edifício, de modo a alcançar-se um ambiente interno saudável e produtivo.

Várias tecnologias podem ser utilizadas de forma eficiente na monitorização e na gestão de QAI, incluindo utilização de sensores de CO₂, ventilação controlada em função dos níveis de contaminantes, ventilação com recuperação de energia, sistemas de ar dedicados, irradiação UV germicida, deslocamento de ventilação, e distribuição de ar aquecido, pressurização diferencial dos espaços, entre outras (Chan *et al.*, 2015; Destailats *et al.*, 2014; Mendell *et al.*, 2015; Sherman, 2014). Estas e outras opções são, no entanto, dispendiosas, e a sua implementação em edifícios novos não é concretizável de uma forma imediata. Em edifícios existentes, não dotados com estas tecnologias, torna-se especialmente difícil o controlo da qualidade do ar interior por parte dos ocupantes, muitas vezes por falta de conhecimentos, e noutros casos por falta de equipamento adequado para o efeito. Nestas situações recorrer a tecnologias simples, económicas e fáceis de implementar como o acionamento de insufladores/extratores, em função dos níveis de alguns dos parâmetros mais relevantes em QAI, como o CO₂, entre outros, pode ser uma excelente solução (Schell e Inthout, 2001).

O presente estudo teve como objetivo principal construir e validar um sistema de monitorização e controlo de qualidade do ar interior de baixo custo, com boa fiabilidade e de fácil utilização. Este sistema, além de possibilitar a medição em contínuo de quatro parâmetros de QAI (dióxido de carbono, monóxido de carbono, humidade relativa e temperatura), integra um mecanismo de controlo da qualidade do ar que consiste no acionamento de um insuflador/extrator, com base nos níveis de dióxido de carbono, usado amplamente como indicador de ventilação, e/ou nos níveis de monóxido de carbono, enquanto contaminante de levada perigosidade em muitos ambientes interiores. Adicionalmente, os dados recolhidos pelo sistema são enviados em tempo real para um servidor web, permitindo a disponibilização dos mesmos numa página web de fácil utilização

por parte do utilizador. O sistema integra ainda um mecanismo de alerta que envia uma mensagem para o telefone do utilizador e/ou para a página web.

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos. O primeiro é o da introdução, onde se apresenta uma breve contextualização e os objetivos gerais do estudo. O segundo capítulo desenvolve a problemática da qualidade do ar interior, começando por uma breve resenha histórica, , sumaria as principais fontes e poluentes presentes em atmosferas interiores, e, ainda, descreve os principais efeitos resultantes da exposição a atmosferas interiores. O capítulo 3 apresenta alguns métodos utilizados para prevenir e controlar os problemas relacionados com a QAI. No capítulo 4 são apresentados alguns dos métodos de ventilação natural e mecânica usados atualmente. No capítulo 5 apresenta-se sucintamente o enquadramento legal relativo à temática de QAI. O sexto capítulo descreve os aspetos relacionados com o principal objetivo deste estudo - a construção, operação e validação do sistema de monitorização e controlo de QAI. No capítulo 7, são descritos os ensaios preliminares que realizados com o sistema em condições reais, dando-se também alguma ênfase à apresentação e discussão dos principais resultados. Finalmente, no capítulo 8, tecem-se as as principais conclusões.

2 QUALIDADE DO AR INTERIOR

2.1 BREVE RESENHA HISTÓRICA

Ao contrário do que se pode pensar, uma breve incursão pela história mostra que os problemas de QAI têm acompanhado o Homem ao longo de vários séculos, uma vez que é um problema que está intimamente ligado à presença do ser humano em espaços fechados. De facto, a qualidade do ar interior (QAI) começou a degradar-se a partir do momento em que os homens pré-históricos levaram o fogo para dentro das suas habitações, por forma a cozinhar os alimentos e a aquecer os abrigos (Wang *et al.*, 2005). A partir desse momento, começaram a ser introduzidas elevadas quantidades de poluentes nas atmosferas interiores das habitações, tais como material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azoto, dióxido de enxofre e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (WHO, 2010).

Além do fogo, muitas outras fontes de contaminação do ar interior foram aparecendo na vida dos Homens. Historiadores Egípcios encontraram anotações sobre uma doença respiratória causada pelo pó de silicato proveniente do corte de rochas, antes do ano 1500 A.C. (Burroughs e Shirley, 2013). Cerca de mil anos depois, acerca de 2500 anos, Hipócrates descreveu nos seus registos os efeitos do ar na saúde (Falagas *et al.*, 2010). Plínio, o (Velho), nos primórdios dos tempos Romanos, instou os pedreiros e mineiros que extraíam amianto a utilizar mascarar no trabalho (Baughman e Arens, 1996; Burroughs e Shirley, 2013).

Ao longo da época medieval não existiram grandes avanços na melhoria da qualidade do ar. Os epidemiologistas encontraram algumas associações entre os locais de trabalho altamente poluidores e os efeitos provocados na saúde dos trabalhadores (Ramazzini, 1743). O facto de as pessoas viverem em cidades superlotadas (e.g. Londres) aumentava a incidência de doenças respiratórias como a asma, e o aumento da incidência de cancro no escroto em muitos jovens limpadores de chaminés (Pott, 1778) vieram demonstrar a importância da qualidade do ar na saúde humana (Sundell, 2004). Ainda na Idade Média, notou-se que o ar era melhor nas altas catedrais do que nos baixos edifícios. Hoje em dia, sabemos que um quarto alto possui uma reserva adicional de ar novo (ar limpo), ou seja, tem disponível um maior volume de ar por pessoa.

Em 1600, o Rei Carlos I de Inglaterra aprovou uma lei que exigia que todas as novas casas tivessem um pé direito de pelo menos 10 pés (3 metros). A lei também exigia que as

janelas fossem mais altas do que largas. No geral, a lei visava uma melhor ventilação que iria conduzir o fumo para uma parte alta da casa ou para o seu exterior. Quase dois séculos depois, em 1777, o fundador da química moderna, Antoine Laurent de Lavoisier, estabeleceu que o oxigénio está ligado ao CO₂ pela respiração e que o impacto na qualidade do ar é rapidamente observável em espaços fechados com muitos ocupantes.

Acredita-se que a preocupação com a Qualidade do Ar Interior (QAI) remonta à época da revolução “higiénica” por volta do ano 1850 e manteve-se até aos anos 60 do século XX. É a partir deste momento que a temática QAI passa a ter uma relevância inferior nas questões ambientais, apresentando uma importância diminuta face à Qualidade do Ar Exterior (QAE), utilização de energia e edifícios sustentáveis, em muito devido ao “Silent Spring” de Rachel Carson escrito em 1962 e seguido por numerosos escritores (Sundell, 2004).

A crise energética amplamente associada à diminuição de produção de petróleo em 1970 (Wang *et al.*, 2005) levou a que as pessoas repensassem a forma como estavam a utilizar os recursos energéticos. Os fabricantes e construtores desenvolveram novos materiais e métodos de construção, focando-se sobretudo num maior isolamento das habitações por forma a manter a energia térmica gerada por maiores períodos de tempo no interior do espaço onde era produzida. Este facto traduziu-se numa menor renovação do ar no interior das habitações o que, conseqüentemente, aumentou a exposição dos ocupantes a concentrações mais elevadas de poluentes das atmosferas interiores (Gül, 2011; Milica, 2009). Esta característica verifica-se até aos dias de hoje em grande parte das habitações e essencialmente nas regiões de clima continental e temperado.

Segundo Sundell (2004), os primeiros estudos de investigação com o intuito de avaliar a Qualidade do Ar Interior (QAI) foram levados a cabo pelo professor de higiene Heyman (1829-1889) no instituto Karolinska. Esse investigador realizou um extensivo estudo de monitorização de parâmetros de QAI, incluindo a medição de CO₂, em escolas de Estocolmo, com diferentes sistemas de ventilação, tendo constatado que nas escolas sem quaisquer medidas de promoção de ventilação, isto é, escolas com uma elevada estanqueidade, os níveis de CO₂ foram superiores a 5000 ppm. Passado mais de um século após a morte de Elias Heyman são alguns Dos estudos que reportam situações similares de níveis bastante elevados de CO₂, em salas de aulas com baixas taxas de ventilação (e.g. Rodrigues, 2013; Hou, 2015). Tal facto levanta algumas questões filosóficas e éticas

relacionadas com a saúde pública do porquê de em 126 anos não terem sido tomadas medidas adequadas que permitissem a redução dos níveis de CO₂ nas escolas e, conseqüentemente, de outros contaminantes.

Nos tempos modernos, os factos científicos estão a ser investigados, tanto quanto possível, mas como já foi referido anteriormente há um novo desafio para a qualidade do ar interior.

2.2 POLUENTES E FONTES CONTAMINANTES DE ATMOSFERAS INTERIORES

Os principais problemas relacionados com a poluição do ar interior encontram-se relacionados com a acumulação de poluentes em elevadas concentrações, resultantes da presença de fontes de emissão e/ou de uma ventilação inadequada. Por esta razão, as fontes de contaminação ou de desconforto num edifício ou num espaço fechado ou em sistemas mecânicos desse edifício devem ser identificadas e, sempre que possível, eliminadas ou controladas.

Os poluentes do ar interior são emitidos diretamente a partir de inúmeras fontes encontradas no interior dos edifícios, como fogões, aquecedores, fumo do tabaco, materiais de construção e produtos químicos de controlo de pragas. No Quadro 2.1, apresentam-se as principais fontes e os contaminantes associados a essas fontes. As principais categorias de fontes contaminantes de atmosferas interiores envolve processos de combustão, a libertação de substâncias tóxicas pelos materiais usados na construção dos edifícios e/ou pelos materiais do recheio da habitação, a utilização de produtos químicos de limpeza e ainda pela existência de condições favoráveis ao desenvolvimento de agentes biológicos.

As fontes poluentes também podem ser de origem externa, como o substrato rochoso que pode estar na origem de radão em atmosferas interiores, bem como o tráfego rodoviário, as centrais termoelétricas, os incêndios, a indústria que podem ser responsáveis por uma enorme variedade de contaminantes atmosféricas que acabam por entrar nos edifícios com relativa facilidade.

Quadro 2.1 Poluentes de atmosferas interiores e respetivas fontes (Wang *et al.*, 2005).

Poluentes	Fontes interiores	Níveis médios
CO₂	Fogões e aquecedores sem ventilação, fumo de tabaco, atividade metabólica	Com fontes no interior, os níveis são podem ir até aos 0,45%
CO	Fogões e aquecedores sem ventilação, fumo de tabaco, gases de automóveis quando se encontram em espaços fechados (e.g., garagens).	Se existirem fontes interiores os níveis no interior são superiores
Poluentes Orgânicos, COV's, Formaldeído	Materiais de construção, mobiliário, acabamentos interiores (colas, solventes, conservantes de madeira), fumo do tabaco, desinfetantes, purificadores de ar, roupa lavada a seco, queima de combustíveis, atividade metabólica.	COV's no interior; algumas centenas de µg/m ³ . Os níveis interiores podem ser cinco vezes mais elevados do que no exterior Formaldeído no interior; de uma dezena a centenas de ppb, maior do que no exterior
Material Particulado	Fogões, aquecedores, fumo de tabaco	Comumente 50 µg/m ³ , raramente acima de 200 µg/m ³
Microbiológicos	Lugares molhados ou húmidos dentro de casa, tapetes, humidificadores degradados, desumidificadores, ar condicionado, roupa de cama e pragas domésticas.	Níveis exteriores superiores aos interiores. Ácaros; níveis interiores superiores aos exteriores
NO_x	Fogões e aquecedores a petróleo e gás em espaços mal ventilados, fumo de tabaco	Níveis interiores inferiores aos exteriores, 0,5-30 ppm
Radão	Terra, solo por de baixo do edifício, materiais de construção, agua subterrânea	Interior: 1,3 pCi/L, ao ar livre: 0,4 pCi /L

O dióxido de carbono é um constituinte da atmosfera terrestre, por vezes designado como poluente, porém não apresenta problemas, a menos que as concentrações sejam elevadas (>30000 ppm) (MDPH, 2005). A ocorrência do CO₂ no ambiente deve-se a processos naturais e antropogénicos. Em relação aos processos naturais é possível destacar a respiração dos seres vivos, os incêndios florestais, as erupções vulcânicas e os processos ocorridos nos oceanos. No que concerne a processos antropogénicos, os que mais se destacam são: a queima de biomassa e de combustíveis fósseis nas habitações, os processos de queima industrial e processos de combustão interna presentes na maior parte dos meios de transporte. No interior dos edifícios, o CO₂ provém essencialmente da respiração dos ocupantes e de determinados processos de queima, sempre que os equipamentos não possuam uma correta extração do ar.

As concentrações de dióxido de carbono no interior dos edifícios dificilmente apresentam valores que coloquem em risco a saúde humana, no entanto tem sido amplamente utilizado como indicador de qualidade do ar e de eficiência de ventilação (Hui *et al.*, 2008). O aumento da concentração de dióxido de carbono no interior dos edifícios evidencia uma deficiente ventilação do espaço e, conseqüentemente, uma deficiente qualidade do ar interior. Níveis de dióxido de carbono baixos indicam que os espaços interiores se encontram bem ventilados e, portanto, apresentam à partida uma boa qualidade do ar interior.

O monóxido de carbono emitido para a atmosfera é resultante na sua grande maioria de emissões antrópicas resultantes de queima incompleta de combustíveis de carbono. Pequenas quantidades são também produzidas de forma endógena no corpo humano.

A acumulação de monóxido de carbono no interior de edifícios deve-se essencialmente à deficiente ventilação do ar, sendo que o nível de perigosidade pode ser rapidamente atingido dependendo da quantidade de combustível queimada, da eficiência e da velocidade de queima (WHO, 2010). Como o monóxido de carbono é inodoro e incolor, os ocupantes não conseguem detetar a presença deste gás no ambiente envolvente, se não utilizarem equipamento específico capaz de mensurar as concentrações de monóxido de carbono.

Os compostos orgânicos voláteis são substâncias que existem na forma gasosa ou podem passar ao estado gasoso à temperatura e humidade ambiente (Burroughs e Shirley, 2013). São compostos que podem provir dos processos de queima, do fumo de tabaco dos

materiais utilizados na construção dos edifícios e acabamentos interiores (Hodgson e McIlvaine, 2002). O fumo do tabaco é uma das principais causas de compostos orgânicos voláteis como o benzeno, diclorometano, cetona, amónia, tolueno, hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e álcoois (Burroughs e Shirley, 2013). Os espaços utilizados para armazenamento de tintas, óleos, gasolina e lacas, com ventilação insuficiente, são também potenciais fontes de COV's (WHO, 2010).

O formaldeído é o principal composto volátil orgânico encontrado nos processos de construção, em numerosos produtos domésticos, em processos de cozedura, velas e incensos (Burroughs e Shirley, 2013; Wang *et al.*, 2005). A emissão de formaldeído a partir dos materiais de construção aplica-se aos novos edifícios, uma vez que a emissão deste contaminante ocorre ao longo de vários meses, principalmente se se verificarem condições de elevada temperatura e humidade relativa no interior dos edifícios (WHO, 2010).

Os óxidos de azoto são formados a partir de várias combinações de oxigénio e azoto a elevadas temperaturas durante os processos de combustão. Quanto maior a temperatura de combustão, maior quantidade de monóxido de azoto é gerada (Burroughs e Shirley, 2013; Cheremisinoff, 2002; WHO, 2010). As fontes de emissão de óxidos de azoto em ambientes interiores são o fumo do tabaco, a queima de combustíveis variados em fogões, fornos, aquecedores, esquentadores e lareiras mal ventiladas. Geralmente 90-95% dos óxidos de azoto são emitidos sob a forma de monóxido de azoto, apenas 5-10% são emitidos como dióxido de azoto, existindo variações substanciais, dependendo do tipo de fonte (WHO, 2010). No ambiente exterior, o monóxido de azoto é oxidado rapidamente a dióxido de azoto, sendo, por isso, usualmente denominados por óxidos de azoto (NO_x) e considerados poluentes primários (Cheremisinoff, 2002; WHO, 2010). O principal agente de produção de óxidos de azoto antropogénico em ambientes exteriores é o tráfego rodoviário (Cheremisinoff, 2002). Em espaços interiores os processos de oxidação dos óxidos de azoto são geralmente mais lentos (WHO, 2010), visto que a radiação solar incidente nesses espaços é menor.

O material particulado afeta mais pessoas do que qualquer outro poluente atmosférico (WHO, 2014), dividindo-se em duas frações PM₁₀ denominadas de "partículas grosseiras" e PM_{2,5} denominadas de "partículas finas". O tamanho das partículas encontra-se diretamente relacionado com os problemas de saúde que podem causar. O material particulado é

geralmente emitido a partir de produtos de combustão (Gül, 2011), nos quais estão incluídos ácidos constituídos por nitratos e sulfatos, produtos químicos, orgânicos e metais (EPA, 2015). O material particulado pode ainda ser proveniente das partículas do solo e de outras ações mecânicas exercidas pelo vento ou pelo Homem sobre outros materiais. As principais fontes emissoras de material particulado dizem respeito ao tráfego rodoviário, queima de biomassa, transporte de poeira pelo vento, movimentação de solos que apresentem baixo teor de humidade, indústrias cimenteiras e vulcões. Nos espaços interiores o material particulado encontra-se associado ao pó de giz, limpeza deficiente das superfícies, aerossóis, fumo do tabaco, fogões não ventilados e fungos.

Os agentes biológicos englobam as bactérias, pelos, pólenes, fungos e vírus (GHK, 2013; Schirmer *et al.*, 2011). As condições ambientais ou o microclima criado no interior dos edifícios apresentam variações de temperatura e humidade menores comparativamente ao exterior (Lacey e West, 2006), o que propicia o desenvolvimento rápido de fungos e bactérias principalmente nos locais onde se verifique uma atmosfera com temperaturas elevadas e rica em humidade.

Os fungos podem desenvolver-se em locais que foram inundados, molhados, com elevados níveis de condensação, telhas, placas de gesso, isolamentos e fissuras que têm contacto com o exterior (Burroughs e ShirlEy, 2013). Os microrganismos tendem a desenvolver-se em móveis e carpetes que foram danificados com a água e água parada nos sistemas de ventilação (Burroughs e ShirlEy, 2013; Cheremisinoff, 2002; Ji, 2011).

Os pelos são provenientes principalmente de animais como os cães, gatos, etc. Os pólenes ocorrem nas árvores e plantas em floração, situadas essencialmente no exterior dos edifícios, sendo o pólen transportado para o interior dos edifícios através do vento.

Os vírus não sobrevivem durante longos períodos de tempo na ventilação, sistemas de ar condicionado e não se replicam facilmente. As infeções sazonais como os resfriados ou a gripe são geralmente sazonais e são transmitidos pessoa-a-pessoa na forma de aerossol ou de bio-fluídos (GHK, 2013).

O radão é um produto originado a partir do decaimento do urânio, encontrado em solos constituídos por rochas graníticas (GHK, 2013). As rochas contêm tipicamente concentrações de urânio de 1-3 ppm. O teor de urânio existente num solo é aproximadamente o mesmo do teor da rocha que lhe deu origem. As concentrações de radão no ar/solo variam

normalmente entre 10000 Bq/m³ até 100000 Bq/m³ (WHO, 2010). O radão proveniente das rochas move-se para as bolsas de ar do solo ou da água que posteriormente são libertas para o ambiente exterior ou para o interior das habitações (Kasuga, 1990), através de fissuras fraturas nas fundações e impermeabilização deteriorada das fundações (Cheremisinoff, 2002; Dudzinska, 2011). Na maioria dos edifícios, apenas 1% do ar ambiente é proveniente do solo, sendo que o restante advém do ambiente exterior (Wang *et al.*, 2005; WHO, 2010), no entanto edifícios com fundações degradadas e elevada permeabilidade do solo podem levar a que o ar interior proveniente do solo represente 10% da sua totalidade (Cheremisinoff, 2002). Nestes casos, mesmo que os níveis de radão no solo sejam moderados, os níveis no interior dos edifícios podem ser elevados se não existir ventilação adequada. Como as rochas graníticas são também muitas vezes utilizadas na construção de edifícios (Wang *et al.*, 2005), se não existir qualquer tipo de isolamento das rochas ou ventilação adequada dos espaços, as concentrações de radão podem aumentar para níveis perigosos para a saúde humana.

2.3 EFEITOS DA QAI NA SAÚDE E NO CONFORTO HUMANO

Os efeitos da contaminação atmosférica na saúde humana têm sido objeto de estudo intenso nos últimos anos (Darling *et al.*, 2012; Khazaii, 2014; Russo *et al.*, 2015; Singh e Jamal, 2011; Sousa *et al.*, 2012; St-Jean *et al.*, 2012). A exposição a poluentes presentes em atmosferas interiores, como material particulado, benzeno, formaldeído, entre outros, tem sido associada à prevalência de vários sintomas, doenças e, conseqüentemente, ao aumento das taxas de morbidade e mortalidade (Hansel *et al.*, 2013; Jonathan *et al.*, 2013; Sarnat *et al.*, 2013). O Quadro 2.2 sumaria os efeitos dos poluentes sobre o ser humano. Os principais sintomas conhecidos decorrentes da exposição a uma qualidade do ar interior deficiente são: dores de cabeça, fadiga, falta de ar, congestão nasal, tosse, espirros, irritação dos olhos, nariz e garganta, tonturas e náuseas (IOM, 2011).

Quadro 2.2 Potenciais efeitos dos poluentes de atmosferas interiores na saúde humana. Adaptado de (CEPA, 2013; Erdmann *et al.*, 2002)

Poluente	Potenciais efeitos na saúde humana
CO₂	Sonolência, falta de motivação para efetuar tarefas, falta de concentração, dores de cabeça, fadiga
Agentes biológicos (poeira domestica, bolor, bactérias, vírus, pelos de animais).	Reações alérgicas, sintomas de asma, irritação dos olhos e da garganta, febre do humidificador, gripe e outras doenças infecciosas.
Monóxido de carbono	Dores de cabeça, angina, dificuldade na concentração, morte quando em elevadas concentrações
Óxidos de azoto	Irritação dos olhos, nariz, garganta e pulmões, aumento das infeções respiratórias em crianças
Compostos Orgânicos	Irritação dos olhos, nariz e garganta, dores de cabeça, perda de coordenação, danos no fígado, rins e cérebro, vários tipos de cancro
Material particulado	Irritação dos olhos, nariz e garganta, agravamento da asma, aumento das doenças respiratórias, cancro do pulmão, doenças cardiovasculares, morte prematura

Os vários sintomas relacionados com a qualidade do ar interior podem levar a que um edifício seja diagnosticado com a Síndrome do Edifício Doente (SED), visto tratar-se de um grupo de sintomas não-específicos com uma ligação temporal a um edifício particular, mas sem nenhuma causa específica ou óbvia (Greer, 2007) ou uma condição ambiental relacionada com o aumento da prevalência de sintomas não específicos entre a população ocupante de determinados edifícios, geralmente sem sinais clínicos e medidas objetivas de sintomas (Milica, 2009).

Vários autores relatam a existência de uma relação entre a SED e o aumento do CO₂ em edifícios ventilados indevidamente. Seppänen *et al.* (1999) realizaram um estudo em 22 edifícios de escritórios com sintomas da SED, tendo concluído que, em metade dos edifícios, o aumento dos níveis de CO₂ estavam relacionados positivamente com um aumento estatístico significativo na prevalência de um ou mais sintomas de SED. Apte *et al.* (2000)

constatarem que em edifícios onde não existe ventilação natural e se recorre a ventilação mecânica, sem que exista uma avaliação/monitorização dos parâmetros de qualidade do ar, existe uma associação positiva, estatisticamente significativa, entre CO₂ e sintomas SBS, com um aumento em 70%, visto que o fluxo de ar gerado fica aquém das necessidades dos ocupantes.

O dióxido de carbono pode ser considerado um gás tóxico e um asfixiante dependendo das concentrações a que os seres vivos, nomeadamente os heterotróficos são expostos. O CO₂ atua tanto como um estimulante ou como um depressor do sistema nervoso central (EPA, 2000). O Quadro 2.3 apresenta sumariamente os efeitos do CO₂ no ser humano. A inalação de CO₂ acima de uma determinada concentração pode causar batimento cardíaco rápido, dor de cabeça, transpiração em excesso, tonturas, depressão mental, distúrbios visuais, agitação perda de consciência e no extremo pode levar à morte.

Quadro 2.3 Efeitos de diferentes concentrações de CO₂ no ser humano. Adaptado de (EPA 2000)

Concentração CO₂ (ppm)	Tempo	Efeitos
2000	Várias horas	Dor de cabeça e dispneia
3000	1 hora	Leve dor de cabeça, excesso de transpiração e dispneia
4000-5000	Alguns minutos	Dor de cabeça, tonturas, aumento da pressão arterial, desconforto e dispneia
6000	1-2 minutos < 16 minutos 1-2 minutos	Distúrbios na visão e audição Dor de cabeça e dispneia Tremores
7000-10000	Alguns minutos 1,5 minutos – 1 hora	Próximo da inconsciência Dor de cabeça, aumento da frequência cardíaca, falta de ar, tonturas, aumento da respiração
10000-15000	1 minuto até vários minutos	Tonturas, sonolência, espasmos musculares graves, Inconsciência
17000-30000	1 minuto	Perda de atividade controlada e intencional, perda de consciência, convulsões, coma, morte

O monóxido de carbono em concentrações acima das 9 ppm apresenta efeitos negativos sobre o corpo humano, como pode ser observado no Quadro 2.4. O envenenamento

por CO em concentrações elevadas é uma causa comum de morte a nível mundial. Existem relatos de casos e estudos empíricos sobre envenenamento por CO, encontrando-se estes amplamente examinados (Li *et al.*, 2015). Em Portugal, um estudo realizado por Borrego *et al.* (2008) demonstrou que entre o ano de 2000 e 2007 foram registados 621 internamentos por intoxicação por monóxido de carbono, verificando-se um pico de incidência nos meses de Inverno (Ginja *et al.*, 2008). Apesar de em Portugal a intoxicação por monóxido de carbono ser pouco frequente, mas não menosprezável, nos Estados Unidos da América, entre o ano de 1999 e de 2000, foram registadas 6136 mortes por envenenamento de monóxido de carbono (Sircar *et al.*, 2015).

Quadro 2.4 Efeitos resultantes da exposição humana aa elevadas concentrações de monóxido de carbono.
Adaptado de (Fierro *et al.*, 2001; Raub e Benignus, 2002; WHO, 2000)

Concentração CO (ppm)	Efeitos sobre o corpo humano
10	Sem qualquer sintoma
70	Nenhum efeito apreciável, exceto falta de ar aquando de esforços vigorosos, possível aperto na testa e dilatação dos vasos sanguíneos cutâneos.
120	Falta de ar nos esforços moderados e dor de cabeça ocasional pulsante nas têmporas
220	Dor cabeça, facilmente irritável, fadiga, perturbado, possíveis tonturas, distúrbios na visão
350-550	Dor de cabeça, confusão, colapso, fadiga
800-1220	Inconsciência, convulsão intermitente, falha respiratória, a exposição continuada pode levar à morte
1950	Fatal (rapidamente)

A elevada perigosidade do CO reside no facto de este possuir uma afinidade com a hemoglobina 200 a 270 vezes maior do que o oxigénio (Li *et al.*, 2015), promovendo uma difusão rápida de CO, em detrimento do oxigénio, através dos alvéolos pulmonares, capilares, membranas da placenta (WHO, 2000) e da corrente sanguínea. Deste modo, uma pequena concentração no ar que respiramos irá causar níveis tóxicos de carboxihemoglobina (COHb) (Blumenthal, 2001).

O CO no corpo humano produz efeitos neurológicos, neuro-comportamentais, e cardiovasculares (WHO, 2000). A exposição a baixas concentrações de CO tem efeitos a nível da redução da precessão visual, destreza manual, aprendizagem, desempenho na condução de veículos e atenção (Raub e Benignus, 2002).

Os poluentes que constituem o grupo dos compostos orgânicos voláteis, no qual se incluem os aromas dos perfumes, podem causar irritação da pele, das mucosas oculares, da garganta, das vias respiratórias superiores, aumento da frequência respiratória, exacerbação de asma, alergias e sintomas gripais. A exposição a produtos resultantes de combustão, compostos orgânicos voláteis, material particulado e elevadas concentrações de monóxido de carbono encontram-se relacionados com problemas cardiovasculares e fadiga (Hall *et al.*, 2003). Tais poluentes encontram-se ainda associados a efeitos sobre sistema nervoso central, como dores de cabeça, fadiga, falta de coordenação motora e visão turva (Burroughs e Shirley, 2013).

Os agentes biológicos que circulam nos sistemas de ventilação degradados são inúmeros, podem dispersar-se rapidamente ao longo do edifício, alguns indivíduos suscetíveis a certos contaminantes biológicos do ar podem desenvolver doenças de hipersensibilidade, incluindo pneumonite por hipersensibilidade e febre relacionada com os aparelhos humidificadores (GHK, 2013). A doença do legionário pode ocorrer a partir de dispersão de um aerossol proveniente de torres de refrigeração, sistemas AVAC, humidificadores e desumidificadores que contenham a bactéria *Legionella* (Hall *et al.*, 2003).

3 PREVENÇÃO E CONTROLO DE PROBLEMAS DE QAI

Atualmente existem diversas estratégias de prevenção e controlo dos problemas de qualidade do ar em espaços interiores. A mitigação dos problemas de QAI em edifícios públicos ou privados requer o envolvimento da gestão e dos funcionários. Os ocupantes de edifícios devem ser educados sobre as causas e as consequências de QAI degradada e das ações que devem tomar por forma a melhorar e a manter uma boa qualidade do ar interior (Burroughs e Shirley, 2013).

As estratégias de prevenção passam pela eliminação da fonte se possível, boas práticas relativas à ventilação e higienização dos espaços, correta implementação dos planos de gestão e manutenção dos edifícios, como a introdução de alterações dos hábitos dos ocupantes, substituição de alguns materiais utilizados na decoração ou de produtos de limpeza ou o ajustamento das taxas de ventilação dos espaços interiores (APA, 2015). O controlo da exposição é outra forma que poderá ser adotada em muitas situações.

O controlo das fontes de poluentes é o mais eficiente em tratar os problemas de qualidade do ar interior, uma vez que poderá permitir a erradicação das fontes por completo ou a criação de mecanismos que permitam a diminuição da libertação de poluentes ou o direcionamento dos mesmos para locais onde não afetem a saúde humana.

A eliminação das fontes poderá consistir na proibição de fumar em espaços interiores onde não existe extração adequada, alterar a localização das fontes de poluição para locais que apresentam uma melhor ventilação, selecionar produtos que apresentem um menor potencial de contaminação da atmosfera interior e ajustar as atividades dos ocupantes. O armazenamento dos produtos químicos não deverá ser negligenciado, devendo-se aumentar a estanqueidade ou ventilar devidamente os espaços onde se armazenam, por forma a diminuir a concentração de poluentes. Relativamente aos agentes biológicos, após a desinfeção das áreas contaminadas por fungos e bactérias, é essencial efetuar um bom controlo da humidade e aplicação de substâncias sintéticas, por forma a criar condições inóspitas à sua propagação (Cheremisinoff, 2002).

A ventilação é muitas vezes utilizada para corrigir ou prevenir os problemas de qualidade do ar interior. A ventilação é definida como um processo de introdução ou remoção de ar novo num espaço fechado de forma natural ou mecânica (Wang *et al.*, 2005), com vista

a remover ou diluir as cargas exaladas pelos ocupantes, libertadas pelos materiais de construção e/ou emitidas pelas atividades desenvolvidas nesses espaços. Esta abordagem pode ser utilizada em edifícios que apresentam más condições de ventilação (Cheremisínoff, 2002), quando as fontes poluentes não podem ser alteradas ou removidas e quando não é possível identificar a fonte específica de poluição. A ventilação é um dos fatores com maior influência na QAI, sendo, por isso, umas das causas mais citadas e, simultaneamente, o tipo de controlo mais frequentemente prescrito. Trata-se de um procedimento de controlo eficaz, mas não é a solução mais adequada para o problema, uma vez que apenas permite a diluição ou a remoção temporária dos poluentes (Burroughs e Shirley, 2013).

O método mais eficaz no que concerne à diminuição de poluentes interiores passa pela eliminação das fontes de poluentes, sendo que esta estratégia poderá ser aplicada aos materiais de construção, visto não ser possível o impedimento da frequência de pessoas no interior das habitações e, neste caso, a ventilação sendo ela natural ou mecânica é a solução mais plausível.

O caudal de ar necessário para assegurar a melhoria da qualidade do ar interior é variável, dependendo do volume dos espaços, das várias tipologias de atividades desenvolvidas no interior dos espaços fechados, como atividades físicas, processos de limpeza, preparação de alimentos, atividades de lazer; da existência ou não de processos industriais, como, armazenamento de produtos químicos, utilização de impressoras em escritórios, entre outros. No entanto uma taxa mínima de fluxo de ar é essencial por forma a garantir uma boa qualidade de ar. A norma EN 15251:2007 estabelece um mínimo de 7-10 L/s por pessoa, nomeadamente nos edifícios constituídos por escritórios, escolas, hospitais, habitações e espaços interiores de lazer (Kosonen *et al.*, 2011). A Portaria.º353-A, 2013 estabelece valores mínimos compreendidos entre 4 e 27 L/s e por pessoa, em função da taxa de metabolismos dos ocupantes.

4 MÉTODOS DE VENTILAÇÃO

Como já foi referido anteriormente, a ventilação é o processo de renovação do ar de um determinado espaço fechado, com vista a diluir a concentração de contaminantes presentes nas atmosferas interiores e, conseqüentemente, promover o conforto, a produtividade e a saúde dos ocupantes dos edifícios. É ainda utilizada para controlar as condições de temperatura ambiente e humidade. Apesar destas funções benéficas, os sistemas de ventilação podem constituir uma fonte de riscos para a saúde, se não forem adequadamente projetados, instalados, mantidos e operados, podendo permitir a entrada de substâncias nocivas que degradam o ambiente interior. Uma situação comum associada aos sistemas de ventilação tem a ver com o crescimento de microrganismos e emissões de COV's e PM_x, causadas pela acumulação de partículas e humidade nos sistemas de ventilação mecânicos. Como já foram referido anteriormente, associados à fraca eficiência da ventilação e aos problemas com manutenção e limpeza de sistemas de ventilação mecânicos, podem ocorrer problemas respiratórios e doenças infecciosas nos ocupantes.

A ventilação dos edifícios de habitação e serviços tornou-se essencial, principalmente nos edifícios com elevada estanqueidade, tornando este fator determinante no custo inicial do projeto e, posteriormente, no seu correto funcionamento e na sua manutenção. Como tal, tornou-se fundamental implementar estratégias de controlo da renovação do ar interior para garantir uma boa qualidade do ar. A ventilação de espaços fechados pode ser feita de várias formas, que se resumem a pelo menos três categorias principais: ventilação mecânica, natural e híbrida. A ventilação pode ser voluntária, com introdução de ar vindo do exterior de forma natural ou mecanicamente induzida, ou involuntária, com introdução de ar exterior por frinchas/frestas das janelas ou portas (infiltração).

Estima-se que cerca de 50% dos custos energéticos num edifício sejam para sistemas de ventilação mecânica, porém, devido às crescentes preocupações com as alterações climáticas, ao aumento do consumo energético global e à crise económica mundial, torna-se cada vez mais importante encontrar soluções que satisfaçam as exigências dos ocupantes, mas que ao mesmo tempo sejam saudáveis e economicamente mais viáveis. Desta forma, a ventilação natural é cada vez mais tida em conta como forma de diminuir os custos e os impactos ambientais.

4.1 VENTILAÇÃO MECÂNICA

Existem diversos tipos de sistemas de ventilação mecânica, podendo englobar um ou dois sistemas de condutas, com volume, temperatura e humidade do ar insuflado constantes ou variáveis. A ventilação mecânica é baseada na exigência de que a taxa de ventilação é mantida em todas as condições climatéricas, sem envolver os ocupantes do edifício. Os sistemas mecânicos são frequentemente divididos em duas tipologias: os sistemas simples que envolvem a utilização de um ou mais ventiladores, para insuflação ou extração de ar; os sistemas mais complexos, como os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), que proporcionam a injeção e acondicionamento de ar novo. Neste capítulo, será dada especial ênfase aos sistemas simples.

Os sistemas AVAC são destinados a manter o conforto ambiental, permitindo controlar a humidade, temperatura, fluxo de ar e pressão nos espaços interiores. Devido aos elevados custos de construção, funcionamento e manutenção, os sistemas AVAC são geralmente utilizados nos hospitais, serviços e em determinadas indústrias. Em alguns casos, devido aos elevados custos de manutenção, começam a degradar-se proporcionando o crescimento de microrganismos e fungos que se dispersam rapidamente ao longo dos sistemas de ventilação chegando facilmente aos ocupantes.

Os sistemas de ar condicionado processam e tratam o ar que é fornecido aos espaços interiores. Além de assegurarem as condições de humidade e temperatura desejáveis, possibilitam também a filtragem do ar proveniente do exterior. Contudo, os sistemas de ar condicionado apresentam elevados custos de construção, manutenção, e funcionamento, não regulam o fluxo de ar com base no CO₂, e quando ficam sujos ou degradados, devido à falta de manutenção, podem transformar-se num território fértil para os bioaerossóis (Gomes, 2002; Shirmer et al., 2011).

No que concerne aos sistemas simples, estes possibilitam a insuflação ou extração de ar com recurso a equipamento mecânico geralmente elétrico, constituído por um ventilador com um determinado número de pás e um motor que o faz girar quando acionado. Em locais onde se realiza a insuflação e o ar exterior apresente uma elevada concentração de material particulado, existe a possibilidade de adicionar um elemento filtrante ao ventilador, de modo a entrar ar mais limpo de impurezas no espaço.

A localização do(s) ventilador(es) é fundamental para o aumento da eficiência de remoção dos poluentes no interior do edifício. A quantidade, a velocidade do escoamento e a distribuição de ar devem também ser devidamente ajustados, por forma a obter os melhores resultados.

Na Figura 4.1 ilustram-se duas situações distintas em termos de localização do ventilador.

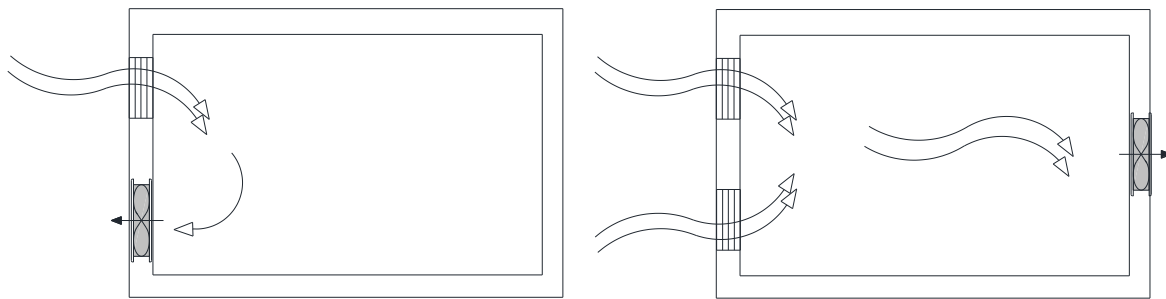


Figura 4.1 Ventilação mecânica inadequada (lado esquerdo), ventilação adequada (lado direito). Adaptado de (Wang *et al.*, 2005)

No lado esquerdo da figura, o ventilador encontra-se localizado no mesmo plano da única janela existente no espaço. Apesar de a quantidade de ar renovado por unidade de tempo poder ser a mesma do esquema representado do lado direito, apenas uma pequena parte do espaço poderá ver o seu ar renovado ou devidamente renovado. Além disso, esta configuração, em que a entrada e a saída de ar ocorrem em zonas próximas, poderá levar a que o ar extraído entre novamente no espaço interior. No lado direito da figura, mostra-se uma configuração que aumenta a eficiência de renovação de ar, permitindo que os poluentes gasosos presentes no espaço interior sejam removidos de forma mais rápida comparativamente à situação ilustrada pelo esquema do lado esquerdo da figura. A probabilidade do ar extraído e dos poluentes voltarem a entrar novamente no espaço diminui significativamente, visto que as janelas e o ventilador se encontram em planos diferentes e em lados opostos.

A Figura 4.2 apresenta os sistemas básicos recomendados para o aumento da eficiência e de redução de custos quer para edifícios grandes ou pequenos. Em todas as configurações constata-se que o ventilador de parede ou o ventilador de cobertura se encontram do lado oposto ao da janela, permitindo a entrada de ar ao longo do espaço, proporcionando deste modo uma renovação de ar completa e mais eficiente.

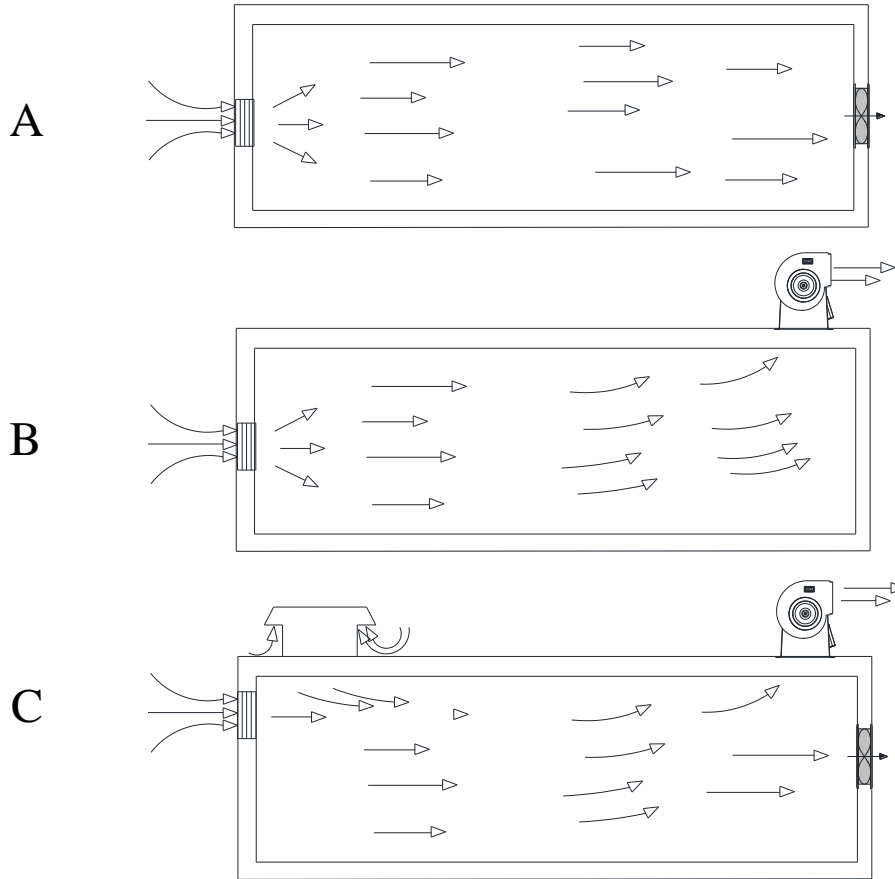


Figura 4.2 Sistemas básicos de distribuição de ar: (A) ventilador de parede; (B) ventilador de cobertura; (C) sistemas combinados, com toma de ar na parede e telhado. Adaptado de (Wang *et al.*, 2005).

No esquema A da Figura 4.2 recorre-se à utilização de um ventilador de parede, o que em muitos espaços aumenta a simplicidade de aplicação, visto que nem todos os blocos interiores possuem um contacto direto com o telhado nem a existência da introdução de condutas de ar interior. O esquema B apresenta a aplicação de um ventilador de cobertura, utilizado sobretudo em espaços interiores que possuam contato direto com o telhado e nos quais, por algum motivo, não seja possível a introdução de um ventilador de parede. O esquema C representa a utilização de um sistema combinado de uma toma de ar e ventilação através do telhado, com janela(s) e ventilador(es) de parede, potenciando o aumento da eficiência e a rapidez na remoção dos poluentes, assim como um aumento do volume interior onde se verificará a renovação de ar.

4.2 VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural ocorre devido às forças da termodinâmica, sendo afetada pela pressão e temperatura (Fordham, 2000; Khan *et al.*, 2008; Li e Delsante, 2001). O ar frio

encontrado nos pontos de alta pressão tende a deslocar-se para os pontos de baixa pressão onde o ar é mais quente (Allocca *et al.*, 2003; Li e Delsante, 2001; Wong *et al.*, 2002). Regra geral, o ar frio do exterior entrará para o interior do edifício e irá ocupar o espaço onde anteriormente se encontrava o ar quente, uma vez que este por ser mais quente tende a deslocar-se de forma ascensional e a sair pelas janelas, portas, chaminés ou outros orifícios que se encontrarem na parte superior dos edifícios (Chen, 2009; Heiselberg, 2000; Larsen e Heiselberg, 2008).

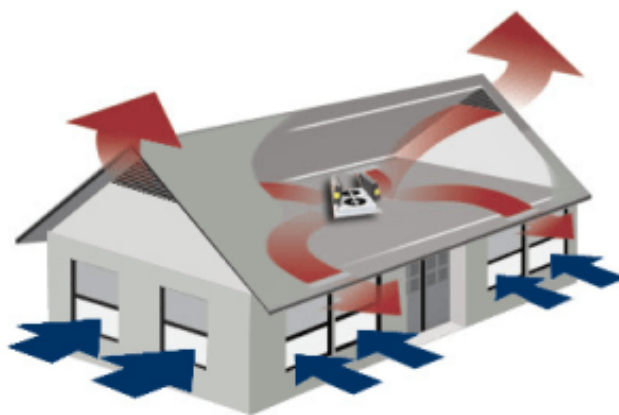


Figura 4.3 Ilustração da dinâmica da ventilação Natural. Adaptado de (EcoMENA, 2015)

A ventilação natural é importante, uma vez que promove a renovação do ar no interior dos edifícios e, de certo modo, é gratuita visto não existir a necessidade de se utilizarem equipamentos mecânicos que utilizam energia elétrica (Balocco, 2002; Simonson, 2005).

No entanto, a ventilação natural não é o método mais indicado na renovação do ar interior face ao objetivo de aumentar a eficiência energética, principalmente em meses de Inverno, visto que a abertura de uma janela ou de uma porta promove a entrada ou saída de um grande volume de ar num curto espaço de tempo (Liping e Hien, 2007; Simonson, 2005; Wallner *et al.*, 2015). Como nestes meses se pretende manter a temperatura interior mais elevada do que a temperatura exterior, a rápida movimentação de massas de ar provenientes do exterior podem levar a uma diminuição da temperatura e a um aumento da humidade, podendo traduzir-se na criação de condições de maior desconforto térmico. Estas aberturas não controladas podem perturbar o equilíbrio do ar e de pressurização, características que são necessárias para ambientes interiores de boa qualidade. A ventilação natural também não assegura usualmente a filtração do ar antes de entrar no edifício (Burroughs e Shirley, 2013). Deste modo, as atmosferas interiores de edifícios localizados em centros de elevada

concentração de poluentes (e.g. cidades poluídas), principalmente de material particulado e de compostos orgânicos, apresentam concentrações mais elevadas desses poluentes.

5 ENQUADRAMENTO LEGAL

À semelhança do que sucedeu noutros países europeus, a QAI começou por ser uma preocupação no âmbito da segurança e higiene no trabalho em ambientes industriais. Apenas no início deste século, em 2002, o Ministério do Ambiente tomou a iniciativa de implementar a primeira legislação referente à QAI nos edifícios não-industriais. No entanto, essa regulamentação permaneceu inativa até ser reintegrada em 2006 pela transposição nacional da Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002. Esta diretiva estabeleceu que os estados membros da União Europeia deviam implementar um sistema de certificação energética, de forma a informar o cidadão sobre a qualidade térmica dos edifícios, aquando da construção, da venda ou do arrendamento dos mesmos. Exigia, também, que o sistema de certificação abrangesse igualmente todos os grandes edifícios públicos e edifícios frequentemente visitados pelo público.

A transposição da diretiva ocorreu através de um pacote legislativo composto por três Decretos-Lei:

- O Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) que transpunha parcialmente para a ordem jurídica a Diretiva n.º 2002/91/CE, relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- O Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de abril, Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE). Em complemento a este decreto, surgiu a Nota Técnica NT-SCE-02 de 2009 com a metodologia para a realização das auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito da aplicação RSECE.
- O Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

Mais recentemente, o SCE, o RSECE e o RCCTE foram revogados pelo Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto, em resposta à publicação da Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010 (Energy Performance of Buildings Directive - EPBD), relativa ao desempenho energético dos edifícios.

No que concerne à qualidade do ar interior, este novo diploma legal considera de elevada relevância a manutenção dos valores mínimos de caudal de ar novo por espaço e dos limiares de proteção para as concentrações de poluentes do ar interior, de forma a salvaguardar os mesmos níveis de proteção de saúde e de bem-estar dos ocupantes dos edifícios. Além disso, privilegia a ventilação natural em detrimento da ventilação mecânica com vista a otimização dos recursos, eficiência energética e diminuição de custos. Outro aspeto introduzido por este Decreto-Lei prende-se com a eliminação da obrigatoriedade da realização de auditorias de QAI, mantendo no entanto, a necessidade do controlo das fontes de poluição e a adoção de medidas preventivas, tanto ao nível da conceção dos edifícios, como do seu funcionamento, dando cumprimento aos requisitos legais para a redução de possíveis riscos para a saúde pública.

Os valores mínimos de caudal de ar novo assim como os limiares de proteção de saúde e bem-estar dos ocupantes dos edifícios encontram-se estabelecidos na portaria 353-A/2013 de 4 de Dezembro. Esta portaria estabelece ainda “as condições de referência para os poluentes do ar interior dos edifícios de comércio e serviços novos, sujeitos a grande intervenção e existentes e a respetiva metodologia de avaliação.” Os valores de caudal mínimo de ar novo para diluição da carga poluente, em função das diferentes taxas de metabolismo dos ocupantes são os que constam no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 Caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida à ocupação, [m³/(hora.pessoa)]. Retirado de (Portarian.º353-A, 2013)

Tipo de Atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes – M (met)	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [m³/(h.pessoa)]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas.	20
Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de Refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares	24 28
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Laboratórios, Ateliês, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares	35
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0-3,0)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	49
Alta	5 (3,0-9,0)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	98

Como se pode constatar, os caudais de ar novo requeridos por pessoa estão dependentes do nível de atividade que os ocupantes desenvolvem no local onde se encontram, variando entre 16 m³/h/pessoa para espaços em que os ocupantes se encontram com um grau mínimo de atividade a quase 100 m³/h/pessoa quando a atividade desenvolvida é intensa como a que acontece em ginásios.

Os limiares de proteção em conjunto com as margens de tolerância para os poluentes físico-químicos a considerar no âmbito da referida Portaria e do RSECE, 2006 constam do Quadro 5.2.

Quadro 5.2 Limiares de proteção e margens de tolerância. Adaptado de (Portarian.º353-A, 2013; 2006)

Poluentes	Unidade	Limiar de proteção	Margem de Tolerância (MT) [%]
Partículas em suspensão (fração PM₁₀)	[µg/m ³]	50	100
Partículas em suspensão (fração PM_{2,5})	[µg/m ³]	25	100
Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COVs)	[µg/m ³]	600	100
Monóxido de Carbono (CO)	[ppmv]	9	-
Formaldeído (CH₂O)	[ppmv]	0,08	-
Dióxido de Carbono (CO₂)	[ppmv]	1250	30
Radão	[Bq/m ³]	400	-

Acrescenta-se que as concentrações em µ /m³ se referem à temperatura de 20°C e à pressão de 1 atm (101,325 kPa). Além disso, os limiares de proteção indicados dizem respeito a uma média de 8 horas e as margens de tolerância previstas são aplicáveis a edifícios existentes e edifícios novos sem sistemas mecânicos de ventilação. Finalmente, importa ainda referir que para os parâmetros CO e COV totais, se as concentrações medidas forem superiores aos limiares de proteção, a verificação da conformidade deve ser realizada com base em critérios específicos indicados na Portaria supracitada.

6 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE QAI

Como já foi referido, este estudo surge com o objetivo central de construir de um sistema de baixo custo, capaz de avaliar e controlar a qualidade do ar em determinados espaços fechados de edifícios escolares, habitacionais, entre outros. O desafio que se tinha pela frente era enorme e de grande risco face à necessidade de se poder chegar meta esperada num período de tempo relativamente curto. Efetivamente, foram vários meses de trabalho árduo, dia e noite, que envolveu várias etapas: seleção e aquisição de todos os componentes necessários; prototipagem e produção do sistema, com requisitos elevados de conhecimentos de eletrónica e de programação; e ainda a realização de testes de validação. Acrescenta-se a todas estas etapas de natureza experimental, a aquisição de conhecimentos amplos e específicos em várias áreas do conhecimento. Este capítulo é dedicado a estas várias etapas.

6.1 DESCRIÇÃO GERAL

O sistema desenvolvido monitoriza e controla alguns dos parâmetros de QAI em diferentes espaços fechados. O sistema foi equipado com diversos módulos/componentes, com funções distintas mas que no seu todo permitem estabelecer uma malha de controlo do processo de qualidade do ar interior. Destes destacam-se:

- 1) bloco sensorial que permite medir as principais variáveis do processo;
- 2) unidade de controlo que de acordo com a informação proveniente do bloco sensorial permite avaliar o estado do processo e estabelecer uma ação de controlo;
- e 3) atuador que permite atuar sobre o meio de acordo com a decisão tomada pela unidade de controlo.

O sistema mede quatro parâmetros de qualidade do ar interior: dois parâmetros químicos - o dióxido de carbono e o monóxido de carbono; e dois parâmetros físicos - a humidade relativa e a temperatura do ar. Os dados recolhidos pelos sensores são enviados para uma unidade de processamento e controlo que avalia os valores observados das variáveis químicas monitorizadas, por comparação com os valores desejados (*setpoints*). A evolução desfavorável de uma destas variáveis face aos valores limite permitidos implica uma ação de correção sobre um atuador, ventilador, que permite extrair ou introduzir novo ar de modo a manter a qualidade do ar dentro dos padrões de segurança desejáveis. O controlo do

ventilador é realizado de forma dinâmica, em função dos desvios identificados. Em particular, a decisão de atuar sobre o processo ocorre sempre que se registem concentrações de dióxido de carbono ou de monóxido de carbono superiores a 1000 ppm e a 7 ppm, respetivamente.

Adicionalmente, os dados recolhidos pelo sistema são enviados em tempo real para um servidor remoto, permitindo a disponibilização dos mesmos numa página *web* de fácil acesso por parte do utilizador. O sistema integra ainda um mecanismo de alerta que permite enviar uma mensagem para o telemóvel de um ou mais utilizadores registados e/ou para a página *web*. A Figura 6.1 ilustra esquematicamente a estratégia de controlo da QAI adotada neste estudo, na qual se estabelece um paralelismo entre a ventilação natural voluntária com abertura/fecho voluntário de uma janela e a uma ventilação mecânica simples, sem necessidade de intervenção do(s) ocupante(s).

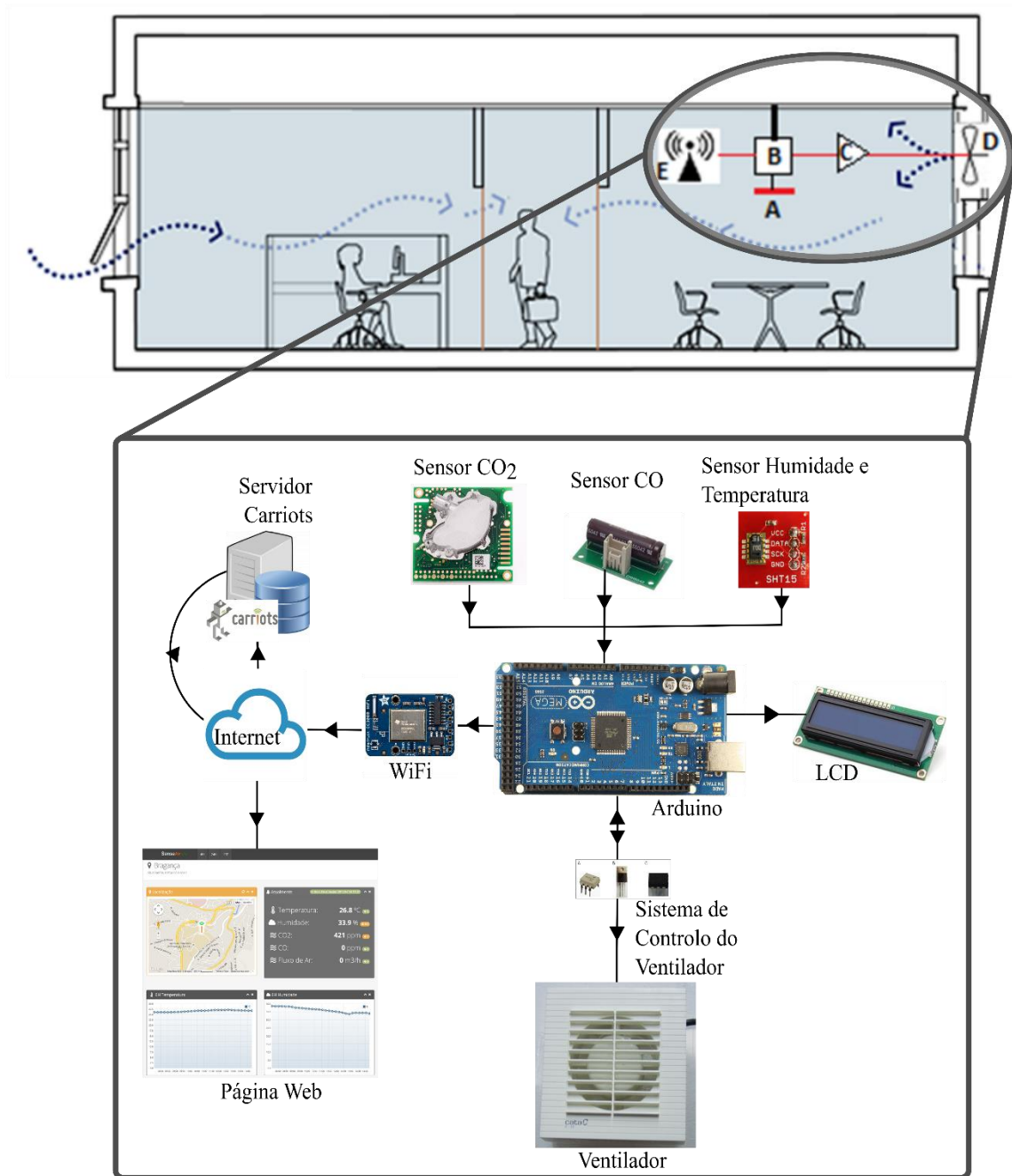


Figura 6.1 Monitorização e controlo do processo de qualidade do ar interior. A – Sensores; B – Processador e Controlador; C – Atuador; D – Ventilador; E – WiFi.

A versão atual do protótipo do sistema de monitorização e controlo da qualidade do ar interior encontra-se na figura 6.2.

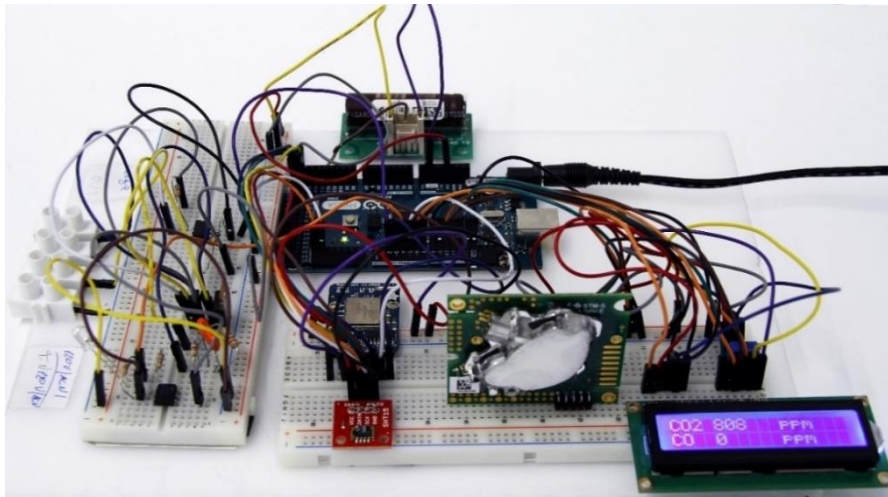


Figura 6.2 Protótipo do monitor e controlador de qualidade do ar interior.

6.2 CONSTITUIÇÃO DO SISTEMA DE QAI

Como vimos anteriormente, o sistema de monitorização e controlo da QAI é constituído por vários componentes, designadamente:

- Sensor de dióxido de carbono, sensor de monóxido de carbono, sensor de humidade relativa e sensor de temperatura do ar que constituem o bloco sensorial;
- Uma unidade de processamento e controlo, incluída na plataforma de prototipagem rápida usada - Arduino;
- Um ventilador;
- Um display para visualização da informação relevante no dispositivo;
- Um módulo WiFi para envio da informação para uma base de dados remota, possível de ser consultada em qualquer dispositivo com acesso à *internet*.

6.2.1 Sensor de Dióxido de Carbono

O sensor de dióxido de carbono K-30 integra um mecanismo de calibração automática, designado por ABC (Automatic Background Calibration). O algoritmo ABC efetua uma calibração automática do sensor de dióxido de carbono, permitindo ajustar dinamicamente a leitura do CO₂ por uma constante. O sensor armazena o valor lido mais baixo ao longo da execução e assume que esse valor é igual a um valor conhecido neste caso de 400 ppm (valor típico da concentração ao ar livre). De seguida ajusta o valor lido em função do valor do

algoritmo. É essencial manter o sensor numa atmosfera de aproximadamente 400 ppm aquando da realização da calibração (CO2meter, 2013). O modo de calibração ABC pode ser ativado/inativado pelo programador, sendo que é recomendável a sua inativação em aplicações cujas concentrações excedam de forma continuada o valor padrão da concentração de CO₂ ao ar livre. Por outro lado, o fabricante garante, em condições de funcionamento normais, a manutenção da calibração por um período de 1 ano.

O sensor K-30 (Figura 6.5) não carece de manutenção e destina-se a diferentes situações em que se pretenda proceder à aquisição de dados de dióxido de carbono. É recomendado para utilização em unidades de tratamento de ar, sensores de alarme, ventiladores de ar fresco, monitores de qualidade do ar, ar condicionado de automóveis, controlo de combustão, mecanismos automáticos de abertura de janelas, entre outros (CO2meter, 2013, 2015).



Figura 6.3 Sensor de CO₂ K-30 10,000ppm. Adaptado de (CO2meter, 2015)

O protocolo utilizado para comunicação com o Arduino é um protocolo série, através de uma porta série virtual configurada para operar a uma velocidade de 9600 bits/s. Para a comunicação com o Arduino é necessária a utilização de duas linhas, uma para transmissão de dados, Tx, e outra para receção, Rx, que permitem uma comunicação bidirecional entre o sensor e a unidade de processamento e controlo.

A biblioteca utilizada na programação do sensor de dióxido de carbono é disponibilizada pelo CO2meter (2009).

A obtenção da concentração de dióxido de carbono é efetuada do seguinte modo: o Arduino envia uma instrução ao sensor de dois em dois segundos para verificar se este está disponível e aguarda uma resposta durante um período máximo de 500 milissegundos. Se o sensor não responder durante esse período é porque existe um erro na comunicação ou no

sensor. Quando a comunicação é estabelecida, o sensor envia para o Arduíno uma matriz de 7 bits que é dividida em duas sequências: a primeira divide-se em três bits e a segunda em quatro bits. Através da Equação 6.1 é obtida a concentração de dióxido de carbono, o *val* é a variável que armazena valor obtido pela multiplicação do *high* (bit mais significativo) por 256 ao qual é somado o *low* (bit menos significativo), dependendo dos sensores o valor armazenado em *val* é ainda multiplicado por uma constante que no caso do sensor K-30 é 1.

$$val = high \times 256 + low \quad \text{Equação 6.1}$$

6.2.2 Sensor de Monóxido de Carbono

A monitorização do monóxido de carbono no interior dos edifícios é realizada com recurso ao módulo CMM5042 pré calibrado e que utiliza o sensor TGS5042 fabricado pela empresa FIGARO. É um sensor eletroquímico de baixo custo com uma gama de medição de 0 a 800 ppm. Possui uma taxa de amostragem máxima de 60 segundos e pode operar numa gama de temperatura e humidade de -5°C até +55°C e 5~95% HR, respetivamente. É constituído por dois eléctrodos, operando com uma tensão eléctrica de entrada de 2,5~5,3V DC e uma tensão eléctrica de saída variável no intervalo 0~2V DC linear em relação à concentração de CO (Figura 6.6). A estrutura interna é otimizada por forma a minimizar a evaporação da água, permitindo um tempo de vida útil de 10 anos. Apresenta uma grande estabilidade, pois o eletrólito utilizado é constituído por baixas concentrações de KOH, KHCO₃, e K₂CO₃ (FIGARO, 2015b).



Figura 6.4 Sensor de monóxido de carbono CMM5042. Adaptado de (FIGARO, 2015)

O tempo de aquecimento, isto é, o tempo de resposta do sensor sempre que é ligado a primeira vez, é inferior a 30 segundos e o tempo de resposta entre leituras é de 60 segundos (FIGARO, 2015a).

O sensor apresenta uma relação linear entre a tensão elétrica medida à sua saída e a concentração de monóxido de carbono existente no ar, como se ilustra na Figura 6.7.

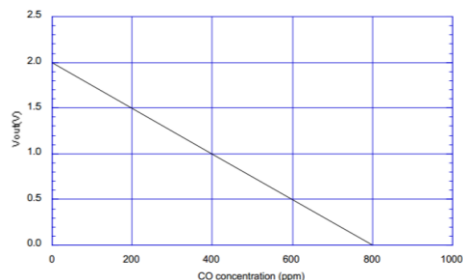


Figura 6.5 Relação da concentração de CO e tensão elétrica (V). Adaptado de (FIGARO, 2015)

O sensor TGS5042, integrado no módulo de desenvolvimento CMM5042 usado neste trabalho, é recomendado para aplicações em residências, controlo automático de ventilação, monitores de monóxido de carbono em caldeiras a gás, gasolina, gasóleo e outros combustíveis constituídos por carbono.

O sinal elétrico proveniente do sensor é conectado a uma das entradas analógicas disponíveis no Arduino e é, posteriormente, convertido num sinal digital através do conversor ADC (Analog to Digital Converter) incorporado no microcontrolador da plataforma Arduino, de modo a que as leituras possam ser usadas pela unidade de processamento e controlo (o qual é um sistema digital). O conversor ADC do Arduino é de 10 bit permitindo a leitura de 1024 níveis discretos (2^{10} combinações possíveis) representados no intervalo de 0 a 1023. Cada conversão AD (Analogico-Digital) é realizada tendo por base uma tensão de referência interna do Arduino cujo valor é 2,56V e que permite obter uma resolução analógica de 0,0032V/ppm (variação mínima da tensão analógica de entrada possível de ser representada por um valor digital distinto).

A concentração do monóxido de carbono é obtida com base na tensão elétrica lida. O sensor integra um eletrodo que ao reagir com o monóxido de carbono encontrado no ar ambiente, provoca uma diminuição da tensão elétrica. A relação entre a tensão elétrica e a concentração de monóxido de carbono observa-se Figura 6.7. O valor lido pelo Arduino é convertido numa tensão elétrica através da Equação 6.2 e posteriormente convertido num valor de concentração de monóxido de carbono através da equação 6.3. A variável *voltage*, tensão elétrica medida é o resultado da multiplicação da variável *sensorValue*, valor referente à concentração de monóxido de carbono entre 0 e 1023, com a divisão das constantes 2,56

por 1024,0 e a soma de 0,03. A concentração de monóxido de carbono co_ppm é obtida pela diferença de 2 pela variável $voltage$ e a multiplicação por 400.

$$voltage = (sensorValue \times \left(\frac{2,56}{1024,0}\right) + 0,03) \quad \text{Equação 6.2}$$

$$co_ppm = (2 - voltage) * 400 \quad \text{Equação 6.3}$$

6.2.3 Sensor de Humidade Relativa e Temperatura do Ar

O termo-higrómetro integrado no sistema foi o sensor SHT15 (Figura 6.6), fabricado pela empresa SENSORION. Este sensor é utilizado para monitorizar a temperatura e a humidade relativa do ar. É um sensor de baixo custo que apresenta uma gama de medição de temperatura -40 a 123,8°C, precisão de $\pm 0,3^\circ\text{C}$, repetibilidade $\pm 0,1$, resolução de 0,04 a 0,01°C e um tempo de resposta compreendido entre 5 e 30 segundos. A gama de medição da humidade situa-se entre os 0 e 100%HR, precisão $\pm 0,3\%$ HR, repetibilidade $\pm 0,1\%$ HR, histerese $\pm 0,1\%$ HR e um tempo de resposta de 8 segundos (SENSORION, 2015)



Figura 6.6 Sensor de humidade relativa e temperatura SHT15. Adaptado de (Sparkfun, 2010)

O SHT15 incorpora um sensor de humidade relativa e temperatura do tipo capacitivo, um conversor analógico - digital (ADC), uma memória de calibração e uma interface digital, tudo isto incluído num pequeno circuito integrado (CI) CMOS (complementary metal oxide semiconductor, semicondutor metal-óxido complementar) (SENSORION, 2015).

Cada sensor é calibrado individualmente numa câmara de precisão de humidade. Os coeficientes de calibração são programados numa memória OTP (One Time Programmable) incluída no CI. Estes coeficientes são depois usados para calibrar internamente os sinais a partir dos sensores (SENSORION, 2015).

O sensor possui um mecanismo de compensação de humidade, definido com base na temperatura sempre que esta seja significativamente diferente de 25°C. A correção da temperatura corresponde aproximadamente a 0,12%RH/°C a 50%RH (SENSORION, 2015).

Tal como referido, o sensor integra um conversor ADC que permite a conversão da informação analógica em informação digital, libertando o Arduino desta tarefa. A informação relativa à temperatura e à humidade é obtida pelo Arduino usando um protocolo de comunicação série desenvolvido pelo fabricante denominado de Sbus similar ao I2C. O Arduino integra portas de comunicação I2C na sua arquitetura interna, sendo que uma delas é usada para realizar a interface ao sensor.

A biblioteca de programação utilizada na programação do sensor de humidade relativa e temperatura é disponibilizada através da página web Github pelo utilizador jonoxer (2011).

Os valores de temperatura e humidade relativa são obtidos do seguinte modo: o Arduino envia dois pedidos ao sensor, um para a temperatura e outro para a humidade relativa através das linhas usadas para a comunicação. O sensor, por sua vez, efetua a leitura da temperatura e humidade relativa do meio envolvente, converte a informação do mundo real em um sinal de tensão elétrica que por sua vez é convertido em um sinal digital através do conversor ADC interno e enviado ao Arduino através das mesmas linhas de comunicação. O Arduino converte o sinal digital em um valor facilmente perceptível com base nas equações Equação 6.4, para a temperatura em graus Celsius:

$$_temperature = (_val \times D2) + D1 \quad \text{Equação 6.4}$$

Onde a temperatura ambiente, *_temperature*, em graus Celsius é dada pelo sinal digital lido pelo Arduino, *_val* (adimensional) multiplicado pela constante *D2* (constante para 14 Bit DEGC de 0,01). Este produto é depois somado ao *D1* (constante para 14Bit a 5V de -40,0).

Para a humidade relativa, em percentagem, recorre à Equação 6.5:

$$_linearHumidity = C1 + C2 + _val + C3 \times _val \times _val \quad \text{Equação 6.5}$$

Onde a *_linearHumidity* (Humidade relativa lida de forma linear em percentagem) é dada pelo produto de *_val por _val* e soma com *C1* (constante para 12Bit de -0,04) com *C2* (constante para 12Bit de 0,0405), *_val* e *C3* (constante para 12Bit de -0,0000028).

O valor de humidade relativa sofre ainda uma correção com base na Equação 6.6, de modo a ser obtido um valor mais preciso.

$$\begin{aligned} \text{_correctedHumidity} & \qquad \qquad \qquad \text{Equação 6.6} \\ & = (\text{_temperature} - 25,0) \times (T1 + T2 \times \text{_val}) \\ & + \text{_linearHumidity} \end{aligned}$$

Onde a variável *_correctedHumidity* (valor de humidade relativa corrigido em percentagem) é o resultado da diferença de *_temperature* (em graus Celsius) por 25,0 pelo produto o de *_val* por *T2* (constante para 14Bit a 5 V de 0,00008) com a soma de *T1* (constante para 14Bit a 5V de 0,01) e a soma de *_linearHumidity* (valor de humidade relativa sem correção).

6.2.4 Unidade de Processamento e Controlo

O desenvolvimento de *hardware* inclui de uma forma geral duas fases: prototipagem e produção. Na fase de prototipagem, como forma de acelerar o processo de desenvolvimento, são habitualmente usadas plataformas específicas de desenvolvimento. Para este trabalho selecionou-se a plataforma Arduíno em virtude de possuir as características adequadas às necessidades de implementação, nomeadamente no que ao número de linhas de entrada/saída diz respeito (linhas de controlo/comunicação usadas para interagir com os periféricos, sensores e atuadores) e por possuir um conjunto de ferramentas open-source que permitem o desenvolvimento das aplicações sem custos adicionais. Por outro lado, existe uma comunidade alargada de utilizadores que dão suporte à utilização da plataforma disponibilizando código fonte e soluções para alguns dos problemas frequentemente encontrados. O Arduíno inclui um microcontrolador programável que funciona como o componente central do sistema de monitorização e controlo. Todos os componentes comunicam com ele através de portas analógicas e/ou digitais, dependendo do princípio de funcionamento de cada um. Além disso executa as tarefas de recolha, tratamento e envio para

os servidores da informação recolhida através dos sensores e procede ao controlo da intensidade de ventilação.

O Arduino Mega 2560 (Figura 6.7) é constituído essencialmente por um microcontrolador ATmega2560 fabricado pela Atmel. Possui 54 linhas digitais de entrada/saída, 15 das quais podem ser usadas como saídas PWM (Phase Wave Modulation) para controlo da potência fornecida a uma carga/atuador, 16 entradas analógicas que permitem analisar sensores com saída analógica e converter os valores lidos em sinais digitais possíveis de serem usados por um microcontrolador digital, 4 UART's (Universal asynchronous receiver/transmitter) usadas para a comunicação com módulos externos (e.g. módulo WiFi), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma porta USB essencialmente usada para a programação do microcontrolador e para realizar operações de debug do funcionamento do dispositivo, um conector ICSP (In Serial Circuit Programming) e um botão de reset que permite reiniciar a execução do programa (Arduino, 2015).

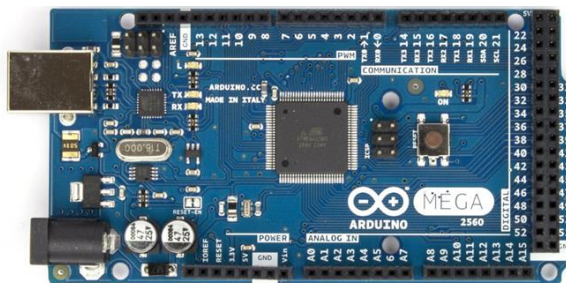


Figura 6.7 Arduino Mega2560. Adaptado de (Arduino, 2015)

O ambiente de desenvolvimento (Figura 6.8), IDE (Integrated Development Environment), consiste numa aplicação gratuita disponibilizada pelo próprio fabricante e que inclui as ferramentas necessárias à escrita e envio do software/programa para o Arduino. Permite o desenvolvimento de aplicações em linguagem C ou C++ e inclui o compilador para transformar o conjunto de instruções da linguagem de alto nível em instruções inteligíveis pelo Arduino. A IDE inclui também ferramentas de *debug* que permitem avaliar a execução do código desenvolvido em tempo real e, desta forma, avaliar o desempenho da aplicação em fase de execução. Esta função foi realizada recorrendo ao terminal do IDE (Figura 6.8 B), através do qual é possível o envio de instruções e a receção de informação entre o Computador e o Arduino.

A

```

final$
163 lcd.print("Connecting to");
164 lcd.setCursor(1, 1);
165 lcd.print(WLAN_SSID);
166 cc3000.connectToAP(WLAN_SSID, WLAN_PASS, WLAN_SECURITY);
167 Serial.println(F("Connected"));
168
169 //Wait for DHCP to complete
170 Serial.println(F("Requesting DHCP"));
171 lcd.clear();
172 lcd.setCursor(1, 0);
173 lcd.print("Requesting DHCP");
174 while (!cc3000.checkDHCP()) {
175   delay(500);
176   Serial.print(F("."));
177   dhcpTimeout ++;
178   if (dhcpTimeout == 60) {
179     Serial.println(F(""));
180     Serial.println("DHCP Timeout! Attempting to reconnect.");
181     lcd.clear();
182     lcd.setCursor(1, 0);
183     lcd.print("DHCP Timeout!");
184     lcd.setCursor(1, 1);
185     lcd.print("Connecting again");
186     dhcpTimeout = 0;
187     goto beginning;
188   }
189 }

```

B

```

-----
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Connect 1Connect 2Connect 3Connect 4Iniciar FastprintFastprint Device
-----
HTTP/1.1 200 OK
Date: Tue, 04 Aug 2015 11:27:01 GMT
Content-Type: application/vnd.carriots.api.v2+json
Content-Length: 20
Connection: close
Server: Carriots REST API
Access-Control-Allow-Origin: *
Access-Control-Allow-Credentials: true
Access-Control-Expose-Headers: Date,Server,Allow,Connection,Content-L

{ "response": "OK" }-----
Ler CO2CO2 Lido477
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c
Ler TemperaturaLer HumidadeCalc LeakyRemove <900Remove <900,2medias c

```

Figura 6.8 Ambiente de Desenvolvimento Integrado (A), Terminal de Comunicação entre o Arduino e o Computador(B).

6.2.5 Sistema de controlo do ventilador

O controlo do fluxo de ar do ventilador é efetuado com recurso dois TRIAC's: um que permite a leitura da passagem da frequência por zero; e um segundo que efetua o disparo, de modo a deixar passar a corrente elétrica a partir da frequência pretendida. Um TRIAC (Triode for Alternating Current) pode ser considerado como um dispositivo que aglomera dois tirístores ligados de forma antiparalela. O terminal de porta única é comum a ambos os tirístores. Os terminais principais MT1 e MT2 encontram-se ligados a ambas as regiões p e n do dispositivo. O fluxo de corrente através das camadas do dispositivo depende da polaridade aplicada entre os terminais principais.

Um TRIAC funciona como um interruptor de eletricidade convencional de ligar e desligar as lâmpadas por exemplo, porém diferencia-se por ser mais pequeno, apresentar uma maior rapidez de disparo e por ser controlado através de um optoacoplador. Este último é, por sua vez, controlado por um microcontrolador. O TRIAC permite ligar e desligar a corrente elétrica em uma determinada região da onda de frequência, isto é, a frequência de 50Hz tem uma onda sinusoidal que se fornecida na sua amplitude resulta na obtenção da potência máxima por parte do ventilador. No entanto, se a onda sinusoidal for interrompida num determinado ponto, após a passagem por zero, o ventilador não consegue funcionar à potência máxima, permitindo deste modo um controlo do fluxo de ar. O aumento da área da

onda sinusoidal fornecida ao ventilador aumenta a potência do ventilador, sendo que o inverso também se verifica. A leitura da passagem da frequência por zero é efetuada pelo optoacoplador H11AA1, sendo necessária para sincronizar todo o processo de disparo efetuado através do optoacoplador MOC3020, impedindo deste modo a geração de pulsos eletromagnéticos e interferências.

O optoacoplador MOC3020 é um dispositivo emissor e recetor que funciona como um interruptor, sendo ativado através de um led interno, o que desta forma permite isolar a corrente contínua proveniente do microcontrolador que irá ativar o ventilador da corrente alterna que fornece energia ao ventilador.

O Arduíno comunica com o optoacoplador H11AA1 através das portas GND e 2 digital que se ligam aos pinos 4 e 5 respetivamente. De salientar que existe um *pull up* entre a porta digital e o pino 5, sendo utilizada uma resistência de $1K\Omega$.

A comunicação com o optoacoplador MOC3020X efetua-se através da porta 4 digital do Arduíno, por meio de uma resistência de 180Ω a qual se liga ao pino 1 e pela porta GND que se liga ao pino 2. O pino 4 do optoacoplador MOC3020X liga-se à GATE/pino 3 do TRIAC BT216, o pino 5 liga-se a uma resistência de 180Ω que, por sua vez, se liga a um condensador de $68K$ e a uma resistência de $2,2K\Omega$. Esta liga-se à main terminal 2/pino 2 do TRIAC BT216, encontrando-se esta ligada à linha de entrada da corrente alterna a 220V.

O condensador de $68K$ liga-se ao main terminal 1/pino 1 do TRIAC BTA216 que por sua vez se liga ao pino 2 do optoacoplador H11AA1 e à linha da saída da corrente alterna a 220V. O esquema de ligações do controlo do ventilador pode ser visto no Anexo II.

6.2.6 Ventilador

O ventilador (Figura 6.9) utilizado neste projeto é fabricado pela Cata, tendo como referência Cata B-10. É um exaustor por centrifugação com fluxo misto para instalação em tubos ou parede com expulsão direta de ar. O ventilador apresenta uma tensão máxima de 230V a 50Hz, potência máxima de 15 Watts, rotação máxima por minuto 2500 r.p.m. e fluxo máximo de ar $98m^3/h$ (cata, 2010).



Figura 6.9 Ventilador Cata B-10

Quando se verificarem níveis de dióxido de carbono superiores a 1000 ppm ou de monóxido de carbono superiores a 7 ppm é realizada uma atuação dinâmica sobre o ventilador de acordo com um controlo proporcional descrito pelas equações 6.7 e 6.8, quando os valores de dióxido e monóxido de carbono descem para concentrações de 900 ppm e 4 ppm o ventilador é desligado.

$$powerco2 = (0,098 \times crvalco2) - 28 \quad \text{Equação 6.7}$$

$$powerco = (0,4917 \times co_new) + 60,25 \quad \text{Equação 6.8}$$

Onde $powerco2$ corresponde à magnitude do fluxo de ar controlada pela concentração de dióxido de carbono, estando compreendido entre 70 e 99, e $powerco$ corresponde à magnitude do fluxo de ar controlada pela concentração de monóxido de carbono, estando compreendido entre 70 e 99

Como forma de reduzir a influência de ruído nas leituras registadas pelos sensores foi implementado um integrador de Leaky (Isen, 2008) na forma indicada pelas Equação 6.9 e 6.10. Esta estratégia estabelece pesos para as observações atuais e passadas, permitindo reduzir a influência de leituras desajustadas decorrentes da influência do ruído.

$$carvalco2 = (0,54 \times carvalco2) + (valCO2 \times 0,46) \quad \text{Equação 6.9}$$

$$co_new = (co_new \times 0,4) + (co_ppm \times 0,6) \quad \text{Equação 6.10}$$

onde $crvalco2$ (valor de dióxido de carbono corrigido em ppm) é o resultado da soma do produto de 0,54 por $carvalco2$ com o produto de $valCO2$ (valor de dióxido de carbono lido pelo sensor em ppm) por 0,46. co_new (valor de monóxido de carbono corrigido em ppm) é o resultado da soma do produto de 04 por co_new com o produto de co_ppm (valor de monóxido de carbono lido pelo sensor em ppm) por 0,6.

O controlo do fluxo de ar do ventilador é efetuado com recurso a um controlo por fase, definido na literatura (Aluf, 2012), que permite ajustar a potência fornecida à carga (neste caso o ventilador) e, dessa forma ajustar a velocidade de rotação do ventilador em função do valor do erro observado entre os valores de concentração de CO₂ ou CO medidos e desejados. A função de controlo encontra-se implementada na unidade de processamento e controlo (Arduíno).

6.2.7 Mini Display LCD

O LCD (Liquid Crystal Display) (Figura 6.10) utilizado no presente projeto é denominado de LCD Module 16x2, White on Blue, modelo INM-021. Este é um display básico de 16x2 caracteres (16 colunas por duas linhas). Apresenta o texto branco sobre o fundo azul e utiliza o chip HD44780 de interface paralela por forma a comunicar com o Arduino (Inmotion, 2015).



Figura 6.10 Display de Cristal Líquido. Adaptado de (Inmotion, 2015)

A comunicação com o módulo exige a utilização de linhas de controlo e linhas de dados. As primeiras permitem configurar o seu modo de funcionamento e as segundas são usadas para o envio dos dados que se pretendem visualizar no visor. Também é possível ajustar o contraste do display por variação de uma resistência variável.

A biblioteca de programação utilizada para o LCD é parte integrante do IDE Arduino.

6.2.8 Módulo WiFi

O transmissor/ recetor Wi-Fi utilizado na construção do sistema de monitorização de qualidade do ar interior é baseado no módulo CC3000 fabricada pela Texas Instruments e incorporado pela Adafruit numa plataforma de desenvolvimento (Figura 6.11).



Figura 6.11 Placa wireless CC3000. Adaptado de (Adafruit, 2014)

A comunicação entre o Arduino e o módulo é feita usando o protocolo de comunicação SPI (Serial Peripheral Interface), usado frequentemente em comunicações de curta distância (Adafruit, 2014; Lesniak, 2015). A plataforma Arduino integra uma interface SPI que permite realizar as comunicações sem necessidade de recorrer a portas virtuais e evitando o aumento da complexidade de programação daí decorrente.

O CC3000 integra as normas de comunicação IEEE 802.11 b/g e suporta os protocolos de segurança open/WEP / WPA / WPA2, TKIP e AES. Incorpora a tipologia de transmissão de dados IPv4 TCP/IP habitualmente usada pelos dispositivos em rede para a troca de pacotes (Texas-Instruments, 2012), (Lesniak, 2015).

A biblioteca de programação utilizada para configurar e operar com o módulo *wireless* é disponibilizada através da página web Github pelo utilizador (tdicola, 2014).

Quando o Arduino é iniciado, este estabelece através da conexão wireless um canal de comunicação com os servidores da Carriots, identificados pelos seus endereços IP e usando uma API KEY e um DEVICE que autenticam o utilizador e o dispositivo que está a enviar a informação. Este mecanismo permite associar ao mesmo utilizador mais do que um dispositivo.

Os dados recolhidos pelos sensores são convertidos em *strings*, que são cadeias de caracteres. De seguida é criada uma string de maior dimensão denominada de *data* que é constituída pelo protocolo de envio de dados neste caso o V2, a data em formato timestamp

(como o Arduíno não possui um mecanismo interno que permita conhecer a data atual é enviado o comando *now* que permite aos servidores reconhecer que a string foi enviada no momento atual) e pelas strings com os valores de cada sensor. Cada string de valores tem de ser necessariamente associada a um identificador, que poderá ser uma letra ou uma palavra por forma a ser identificado cada valor como tendo uma origem diferente. Nesta implementação foram utilizadas as letras C, H, T, O e V por forma a identificar o dióxido de carbono, a humidade, temperatura, monóxido de carbono e fluxo de ar respetivamente.

A string constituída pela informação referida é dividida em sete partes. Isto deve-se ao facto de o módulo WiFi usado apenas permitir o envio de 90 caracteres por envio. Cada uma delas é depois enviada para os servidores da Carriots usando o protocolo de comunicação aberto HTTP versão 1.1.

6.2.9 Servidor e página web

Um servidor Web é um servidor que é responsável por aceitar solicitações HTTP de clientes web e fornece respostas HTTP, geralmente sob a forma de páginas Web que contenham conteúdo estático como texto, imagens etc. e conteúdo dinâmico como scripts (Dedoimedo 2011).

A informação recolhida pelo Arduíno é enviada para a plataforma Carriots, desenvolvida para o alojamento e desenvolvimento de aplicações especialmente concebidas para projetos relacionados com a Internet das Coisas (IoT) e aplicações Machine to Machine (M2M). Esta plataforma permite a recolha e o armazenamento da informação dos dispositivos a ela ligados, possibilitando a construção de aplicações com recurso à linguagem de programação Groovy (Carriots 2013). A informação armazenada também pode ser descarregada sob a forma de ficheiros em formato Comma-separated values (CSV), Extensible Markup Language (XML) ou JavaScript Object Notation (JSON).

A plataforma Carriots é usada para o armazenamento da informação recolhida pela rede de sensores e para o envio de alertas a utilizadores via mensagens de texto (SMS) ou via correio eletrónico sempre que se verifiquem níveis de monóxido de carbono superiores ao limite estabelecido na lei (9ppm). A consulta da informação é realizada através do acesso a uma página html alojada num servidor próprio (no caso no IPB - <http://www.alunos.ipb.pt/~a25812/>), que pode ser acedida a partir de um terminal com acesso

à internet (PC, Tablet ou Smartphone) e que foi desenvolvida para aceder à base de dados da Carriots.

O armazenamento da informação é efetuada numa base de dados NoSQL, que pode armazenar centenas de terabytes de dados em pelo menos dois locais. A replicação da informação em suportes distintos (Carriots 2013) permite salvaguardar toda a informação em casos de falhas.

Uma página web é um conjunto de páginas da web interligadas, geralmente incluindo uma página inicial, geralmente localizados no mesmo servidor, e preparados e mantidos como um conjunto de informações por uma pessoa, grupo ou organização (TheFreeDictionary 2011).

A página desenvolvida integra três linguagens de programação distintas, que se encontram interligadas entre si mas que desempenham funções distintas. São elas: HyperText Markup Language (HTML), JavaScript e Cascading Style Sheets (CSS).

A linguagem de programação HTML consiste em duas partes essenciais: o conteúdo como informação e um conjunto de instruções que informam o browser como deve exibir esse conteúdo. A linguagem HTML não é uma linguagem de programação, no sentido tradicional, mas sim um conjunto de instruções sobre como exibir o conteúdo, habitualmente designada como linguagem interpretada. A aplicação que interpreta essa descrição é denominada de navegador ou Web browser (Brooks 2011).

A linguagem de programação JavaScript é uma linguagem que permite melhorar as aplicações estáticas da web através da disponibilização de conteúdos dinâmicos e interativos, melhorando a experiência do utilizador (McPeak 2015). A programação em JavaScript é utilizada para escrever aplicações a serem executadas pelo cliente. Quando efetuado um pedido ao servidor o código JavaScript é enviado ao cliente quando uma página é carregada. O código é então executado, basicamente linha por linha, por um interpretador JavaScript incluído como parte do navegador Web do cliente (Brooks 2011).

Neste projeto o código JavaScript, conjuntamente com o HTML, serão executados sempre que a página for aberta no navegador Web. O processo inicia-se com uma ligação ao servidor da Carriots que procederá à recolha e tratamento da informação pretendida e que se encontra armazenada e a passa a HTML por forma a disponibiliza-la ao utilizador final (cliente).

A linguagem de programação CSS permite tratar todos os aspetos visuais de um documento web. O CSS pode ser aplicado aos bordos, espaçamento entre parágrafos, títulos ou imagens, controlo de tipos de letra ou cores, imagens de fundo, efeitos textuais, texto sublinhado ou riscado, estratificação, posicionamento, e ainda outros efeitos da apresentação (York 2005).

A página web permite a disponibilização ao utilizador da informação recolhida através do Arduino de forma simplificada. A construção da página web foi baseada no código fonte de duas páginas já existentes disponibilizadas pela Carriots mas que foram modificadas para ir de encontro às especificidades deste projeto. Podem ser consultadas nos seguintes endereços,:

https://github.com/carriots/javascript_CORS_CarriotsMeteo;

[https://www.carriots.com/tutorials/cors_request.](https://www.carriots.com/tutorials/cors_request)

A página principal (Figura 6.12) fornece informação da localização geográfica do monitor de qualidade do ar interior, dos valores atuais dos parâmetros temperatura, humidade, dióxido de carbono, monóxido de carbono e fluxo de ar e dá a possibilidade de observar a variação dos parâmetros mensurados em diversos períodos temporais selecionados pelo utilizador, nomeadamente das últimas 6 horas, 24 horas ou da última semana.

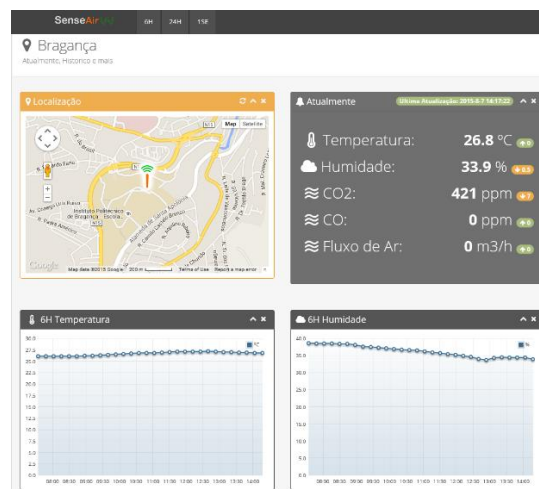


Figura 6.12 Página Web

6.3 CALIBRAÇÃO/VALIDAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Os sensores são instrumentos usados para caracterizar variáveis do mundo real. Idealmente, pretende-se que sejam capazes de responder com rigor e precisão às variações

temporais das grandezas mensuradas. O maior ou o menor erro da sua resposta depende de vários fatores, tais como dos princípios de operação adotados, dos materiais utilizados na sua construção e da perícia do utilizador.

A validação do sistema de monitorização de qualidade do ar interior foi realizada com recurso a duas metodologias. A primeira consistiu na avaliação da resposta do sensor sob condições especificadas, ou seja, na avaliação da relação entre os valores indicados pelo sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões (IPQ, 1996). Esta metodologia impõe normalmente que o instrumento seja verificado em dois ou mais pontos ao longo da gama de medição ou mais precisamente da gama de calibração do instrumento. A gama de calibração é definida como a região entre os limites dentro dos quais a propriedade é medida, recebida ou transmitida, os quais são definidos pelo “zero” e pelo “span”. O zero é definido como o menor valor da gama, enquanto o span é definido pela diferença algébrica entre o valor maior e o menor da escala de calibração (Cable, 2005). A segunda metodologia consistiu na comparação das respostas dos sensores que integram o sistema com a resposta de sensores de outro sistema previamente calibrado e de fiabilidade comprovada.. Os resultados obtidos pelos sensores secundários são posteriormente comparados com o sensor principal e se a diferença entre o sensor principal e os sensores secundários for significativa, são introduzidas correções na leitura destes, permitindo melhorar deste modo a exatidão e a precisão das variáveis lidas.

Importa referir que houve algumas dificuldades técnicas relativamente à aplicação da primeira metodologia e, por essa razão, a calibração final dos sensores foi efetuada com base na segunda metodologia, à exceção do efetuado para o sensor de monóxido de carbono. Acrescenta-se ainda que ambos os testes de validação foram conduzidos em condições ambientais minimamente controladas e em espaços em que as condições ambientais evoluíam de forma relativamente estacionária.

6.3.1 Validação do sensor de dióxido de carbono

A validação do sensor de dióxido de carbono K-30 foi realizada com recurso às duas metodologias referidas anteriormente. Em relação à primeira metodologia, utilizaram-se duas concentrações padrão de dióxido de carbono de 1250 e 375 ppm. Estas concentrações padrão foram fornecidas através de garrafas pressurizadas ligadas a uma câmara de testes por meio do regulador de pressão e de tubagem em teflon. A câmara de testes consistiu num cilindro

com um volume de 196 cm^3 com duas aberturas, uma de dimensões reduzidas, por onde irá entrar o gás e outra de maiores dimensões onde é colocado o sensor.

O sensor foi colocado no interior da câmara de testes e isolado do ambiente exterior, criando deste modo uma atmosfera interior com a concentração pretendida. Introduziu-se o gás de dióxido de carbono à concentração de 1250 ppm, deixou-se estabilizar a atmosfera interior até a concentração lida pelo sensor atingir um valor estacionário e, de preferência próximo, do valor do span. Em seguida iniciou-se a recolha de dados por um período de 6 minutos a uma taxa de amostragem de 2 segundos, o mesmo procedimento foi realizado para a concentração de 375 ppm. Os resultados dos dois ensaios estão gráficos na Figura 6.13.

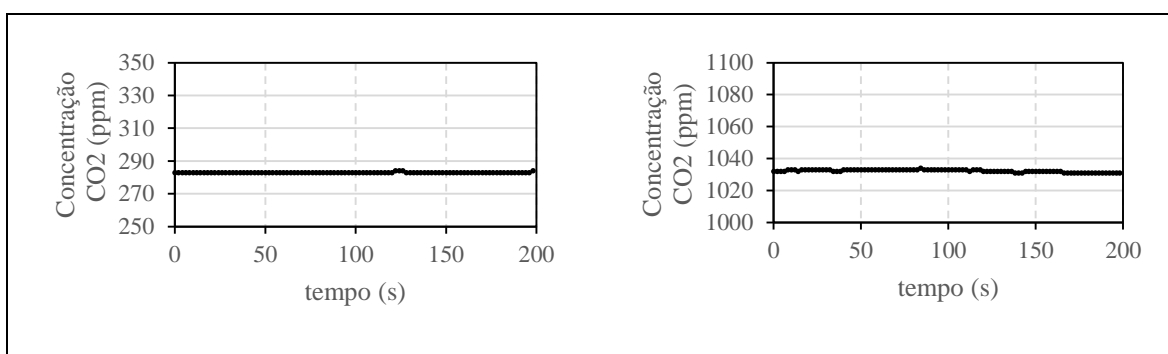


Figura 6.13 Verificação inicial do sensor de dióxido de carbono K-30. (esquerda) com padrão de CO_2 375 ppm; (direita) com padrão de CO_2 de 1250 ppm.

Como se constata pela análise da Figura 6.13, o sensor mostrou-se preciso, mas com alguma falta de exatidão, na medida em que para o padrão de 375 ppm, a resposta foi de 284 ppm, com um desvio padrão de 0,19 ppm. Relativamente à exposição do sensor a uma concentração de 1250 ppm, os registos obtidos foram, em média, inferiores em 217 ppm, apresentando uma resposta média de 1033 ppm e um desvio padrão de 0,79 ppm.

O zero foi testado colocando o sensor exposto a uma atmosfera isenta de dióxido de carbono. Os resultados do ensaio mostraram um desvio negativo de 66 ppm.

Apesar de se ter constatado que o sensor é sensível ao dióxido de carbono, os ligeiros desvios à linearidade esperada denotam a ocorrência de alguns problemas não necessariamente associados ao sensor, mas provavelmente a outros elementos do ensaio.

No que concerne ao ensaio referente à segunda metodologia, a resposta do sensor de CO_2 , modelo K-30, foi comparada com a do sensor Gray Wolf IAQ-610 previamente calibrado. A realização deste ensaio consistiu na colocação do sensor K-30 e da Sonda IQ-

610 suficientemente próximos um do outro, por forma a minimizar o erro de leitura, numa atmosfera cujas concentrações de CO₂ não apresentassem variações bruscas. O ensaio decorreu durante um período de 15 horas, suficientemente longo para cobrir uma ampla gama de valores de concentração de dióxido de carbono. Na figura 6.14 apresenta-se a evolução temporal das respostas dos dois sensores.

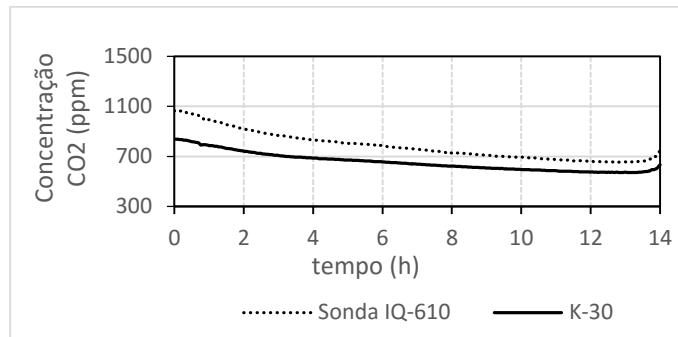


Figura 6.14 Verificação do sensor K-30 em função da sonda Gray Wolf IQ-610

No geral, o sensor K-30 apresentou uma resposta relativamente próxima da fornecida pela sonda Gray Wolf IAQ-610, mas com uma diferença média de 124 ppm. A verificação do sensor K-30 em função da sonda Gray Wolf IAQ-610 demonstrou, tal como tinha ocorrido no ensaio de calibração com base em valores conhecidos, que os desvios entre as respostas dos dois sensores foi ligeiramente maior para concentrações mais elevadas de dióxido de carbono.

Assumindo a resposta da sonda IQ-610 como mais exata, construiu-se a curva de calibração apresentada na figura 6.15, com vista a corrigir os valores do sensor K-30.

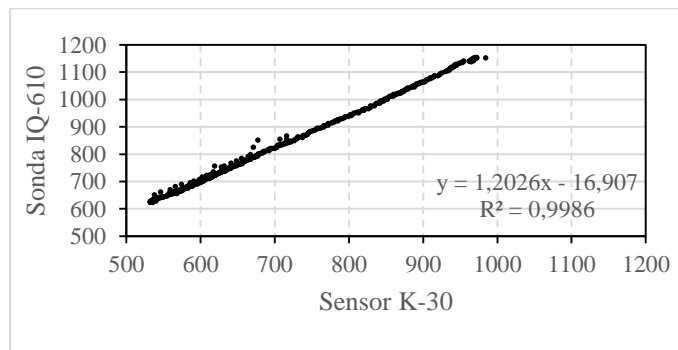


Figura 6.6.15 Reta de calibração do sensor K-30 obtida por comparação com a sonda IQ-610

A elaboração da reta de calibração permitiu verificar que o coeficiente de determinação r^2 apresenta um valor de 0,9986 e o r de um valor de 0,999, o que se traduz numa resposta linear quase perfeita do sensor K-30 em função da sonda IAQ-610.

6.3.2 Validação do sensor de monóxido de carbono

A validação do sensor de monóxido de carbono foi elaborada apenas com base na metodologia de comparação com padrões de CO. Para tal, utilizaram-se duas garrafas de monóxido de carbono com concentrações conhecidas de 2 e 95 ppm. O ensaio foi realizado de forma similar ao já descrito para o dióxido de carbono. O sensor foi colocado no interior da câmara de testes, por forma a ficar isolado do ambiente exterior, de seguida introduziu-se uma corrente de monóxido de carbono de 95 ppm, aguardou-se que a atmosfera estabilizasse próximo do valor pretendido e deu-se início à recolha de dados. O mesmo procedimento foi efetuado para a concentração de 2 ppm.

A Figura 6.16 mostra os resultados obtidos no ensaio. Quando submetido à concentração constante de 95 ppm a leitura média do sensor foi de 93,04 ppm, dois ppm abaixo do valor pretendido, a moda e mediana apresentadas foram de 93 ppm com um desvio padrão de 0,97 ppm. Os resultados obtidos para a exposição do sensor à concentração constante de 2 ppm revelaram que a leitura média do sensor foi de 1,74 ppm, 0,26 ppm abaixo do valor alvo, a média a mediana obtida foram de 2 ppm e um desvio padrão de 0,97 ppm. Com base nos valores obtidos é possível afirmar que as leituras realizadas pelo sensor de monóxido de carbono se encontram ligeiramente abaixo do valor real, no entanto essa diferença não é preocupante uma vez que se encontram dentro do limite de erro indicado pelo fabricante. O sensor apresentou uma resposta dentro dos erros espectáveis pelo que não existiu necessidade de se proceder à correção dos valores lidos.

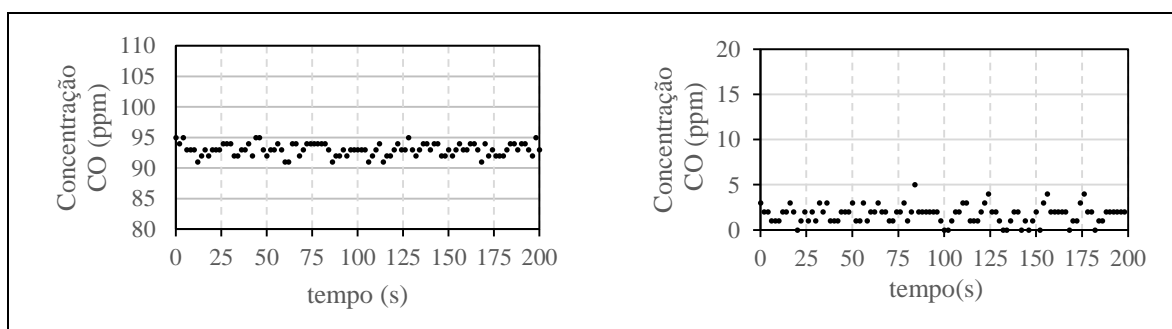


Figura 6.16 Verificação do sensor de monóxido de carbono. (esquerda) com padrão de CO 95 ppm; (direita) com padrão de CO de 2 ppm.

6.3.3 Validação do sensor de temperatura e humidade relativa

O sensor de humidade relativa SHT15 foi calibrado com recurso à utilização do kit de calibração CA-RH1 %RH. O kit de calibração é constituído por um frasco de cloreto de sódio (NaCl) um frasco de acetato de potássio ($\text{KC}_2\text{H}_3\text{O}_2$), um frasco com água destilada e uma seringa. As soluções criadas por estes reagentes produzem atmosferas com humidades relativas constantes para uma determinada temperatura. A relação da humidade relativa com a produzida por cada composto com a temperatura pode ser observada no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 Relação da humidade relativa com a temperatura. Retirado de GrayWolf (2011)

Temperatura	Acetato de potássio (%RH)	Cloreto de Sódio (%RH)
15	23,4±0,3	75,6±0,2
20	23,1±0,3	75,5±0,1
25	22,5±0,3	75,3±0,1
30	21,6±0,3	75,1±0,1

A validação do sensor de humidade relativa foi efetuada com base nas duas metodologias de calibração e da verificação.

A metodologia da calibração foi realizada do seguinte modo, introduziu-se o sensor SHT15 no interior do frasco que continha acetato de potássio e isolou-se devidamente do exterior, deixou-se estabilizar o sensor até próximo da %HR esperada e deu-se início ao registo dos dados recolhidos através do sensor. O mesmo procedimento foi efetuado para a solução de cloreto de sódio. O ensaio foi realizado a uma temperatura do ar de 25°C. Os dados obtidos pelo sensor de humidade relativa são observados na Figura 6.17.

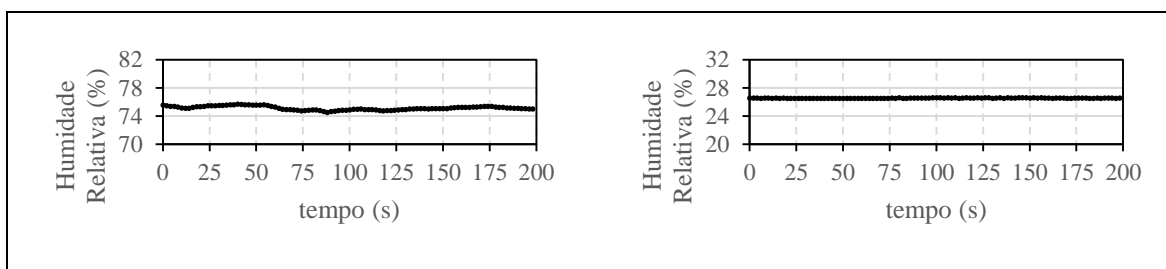


Figura 6.17 Calibração da Humidade Relativa do sensor SHT15. (esquerda) com padrão de humidade 73,5%; (direita) com padrão de humidade 22,5%.

No primeiro caso o sensor foi exposto à humidade relativa de 75,3% a resposta média do sensor ao longo de 6 minutos foi de 75,1% valor que se encontra em concordância com o pretendido, a mediana obtida foi de 75,1%, a moda 75,09% e o desvio padrão de 0,27%, deste modo verifica-se que o sensor apresenta uma boa resposta.

Quando o sensor foi submetido a uma atmosfera de humidade constante de 22,5%, o valor médio lido pelo sensor durante um período de 6 minutos foi de 26,5%, observando-se deste modo um desvio de 4%. A mediana foi de 26,6%, a moda 26,6% e o desvio padrão 0,01%. Atendendo à margem de erro do sensor $\pm 2\%$, indicado pelo fabricante, o ensaio mostrou que a leitura do sensor tem de ser corrigida.

A verificação do sensor SHT15 referente ao sensor de humidade relativa foi elaborada com recurso ao sensor Tinytag Plus 2 –TGP-4204. A realização deste ensaio consistiu na colocação dos sensores o mais próximo possível um do outro, de modo a minimizar o erro de leitura, numa atmosfera cuja humidade relativa não variasse bruscamente num curto período de tempo. O ensaio decorreu durante um período de 14 horas com o objetivo de assegurar uma comparação o mais representativa possível. A figura 6.18 mostra o comportamento dos dois sensores ao longo do tempo.

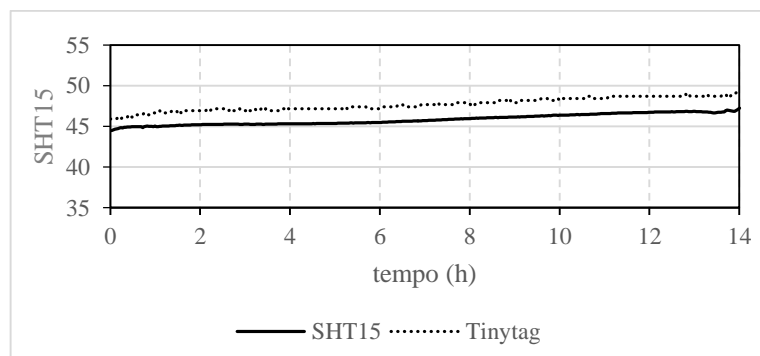


Figura 6.18 Verificação da humidade relativa lida pelos sensores SHT15 e Tinytag Plus 2-TGP-4204

Como é possível observar através da Figura anterior, verifica-se uma diferença entre o sensor SHT15 e o sensor Tinytag, no entanto não é uma diferença significativa, uma vez que a diferença média é de 1,84% de HR, sendo facilmente explicado pelo erro inerente ao

sensor que é de $\pm 2\%$. A figura 6.19 mostra que a relação entre os dois sensores é linear com um r^2 de 0,9675.

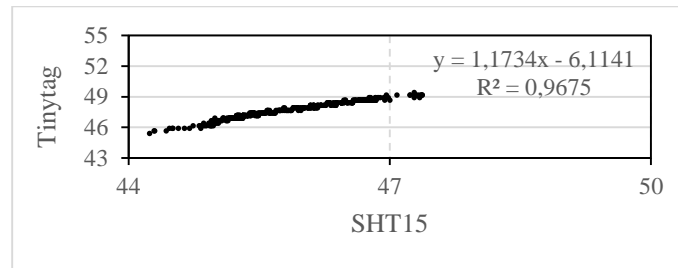


Figura 6.19 Reta de calibração do sensor de Humidade Relativa SHT15 obtida por comparação com a resposta do sensor Tinytag

Este tipo de relação reforça a nossa confiança na resposta do sensor e com base nos resultados do mesmo, optou-se por não recorrer a qualquer correção dos valores de humidade relativa lidos pelo sensor.

A validação do sensor de temperatura foi efetuada apenas com base na metodologia da comparação da sua resposta com a do Tinytag Plus 2 –TGP-4204, nas mesmas condições já descritas anteriormente para a humidade relativa.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6.20 é possível verificar que ambos os sensores respondem de forma similar e coerente com o padrão de variação temporal de temperatura expectável. De um modo geral, constata-se que o SHT15 responde sistematicamente com valores superiores de cerca de 0,5 °C relativamente aos fornecidos pelo Tinitag, pelo que se considerou desnecessário introduzir qualquer correção dos valores lidos pelo sensor de temperatura SHT15.

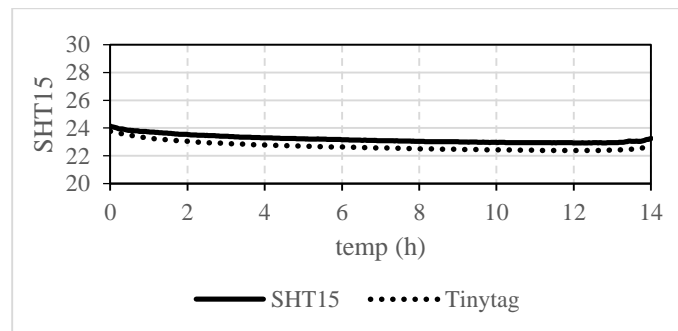


Figura 6.20 Verificação da temperatura lida pelos sensores SHT15 e Tinytag Plus 2-TGP-4204

7 APLICAÇÕES PRÁTICAS DO SISTEMA DE QAI

7.1 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS REALIZADOS

Com vista a testar o sistema em condições reais, delinearam-se três casos de estudo similares, cada um conduzido num espaço distinto, aqui identificados por sala A, sala B e sala C, e, portanto, com ambientes distintos e ocupações distintas. A sala A tem uma dimensão de 41,0 m³, geralmente com um ocupante. A sala B tem uma dimensão de 51,3 m³, com uma ocupação que varia entre 1 a 2 pessoas, sendo que em determinados períodos permaneceram no seu interior 4 ocupantes. A sala C tem uma dimensão de 97,4 m³, com uma ocupação entre 2 a 4 pessoas, sendo que em determinados períodos permaneceram no seu interior 6 ocupantes. As principais características dos espaços estão sumariadas no quadro 7.1 e as plantas das salas podem ser visualizadas no Anexo V.

Quadro 7.1 Descrição das salas onde foram realizados os ensaios de QAI.

Sala	Volume (m ³)	área (m ²)	Capacidade total (ocupantes)	Aberturas	
				Nº	Tipo
A	41,0	13,64	4	2	1 Janela e 1 porta
B	51,3	14,7	2	2	1 Janela e 1 porta
C	97,4	26,9	6	4	2 Janelas 1 porta e 1 guiché

Em cada sala foram realizados 4 ensaios, em dias distintos totalizando 12 ensaios, de aproximadamente 8h cada. O primeiro ensaio consistiu na monitorização dos parâmetros de QAI integrados no sistema de monitorização (dióxido de carbono, humidade e temperatura), sem recorrer a ventilação natural, a não ser a que decorre da infiltração, através do invólucro dos espaços, e da abertura de portas motivada pela entrada e saída dos ocupantes. O monóxido de carbono também foi monitorizado, mas atendendo à tipologia do espaço não assumiu grande relevância no estudo.

No segundo ensaio o objetivo visou a avaliação do efeito da abertura voluntária de janelas e/ou portas, sempre que o limiar de proteção estabelecido na Portaria nº353-A2013 de 4 de Dezembro fosse excedido. Estabeleceu-se ainda que o fecho voluntário das aberturas deveria ocorrer quando a concentração de dióxido de carbono fosse igual ou inferior a 900

ppm. Durante o ensaio nunca houve restrições em relação à entrada e à saída dos ocupantes ou de outras pessoas não afetas ao espaço.

Nos ensaios três e quatro, o objetivo central foi avaliar o funcionamento do sistema desenvolvido e adicionalmente comparar o efeito da ventilação mecânica simples com insuflação e com extração de ar na taxa de diluição dos níveis de dióxido de carbono e obviamente nas variações de temperatura e da humidade relativa da atmosfera interior. Em ambos os casos, o ventilador operou de uma forma dinâmica, isto é, sempre que a concentração de dióxido de carbono atingia os 1000 ppm, o ventilador era acionado a uma velocidade moderada, aumentando de forma linear entre os 1000 ppm e os 1295 ppm de CO₂, funcionando a partir desta concentração a velocidade constante com um caudal de ar de aproximadamente 98 m³/h. O ventilador era desligado automaticamente, sempre que a concentração de dióxido de carbono voltasse a assumir valores inferiores a 900 ppm. Nos dois ensaios procurou-se que a ventilação natural fosse apenas a correspondente à infiltração (i.e., como no 1º ensaio), pelo que a abertura de portas ocorreu apenas com a entrada e saída dos ocupantes.

7.2 AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE DIÓXIDO DE CARBONO

Na Figura 7.1 apresentam-se a evolução temporal dos níveis de dióxido de carbono para os 12 ensaios realizados (4 por cada espaço), em função do número de ocupantes.

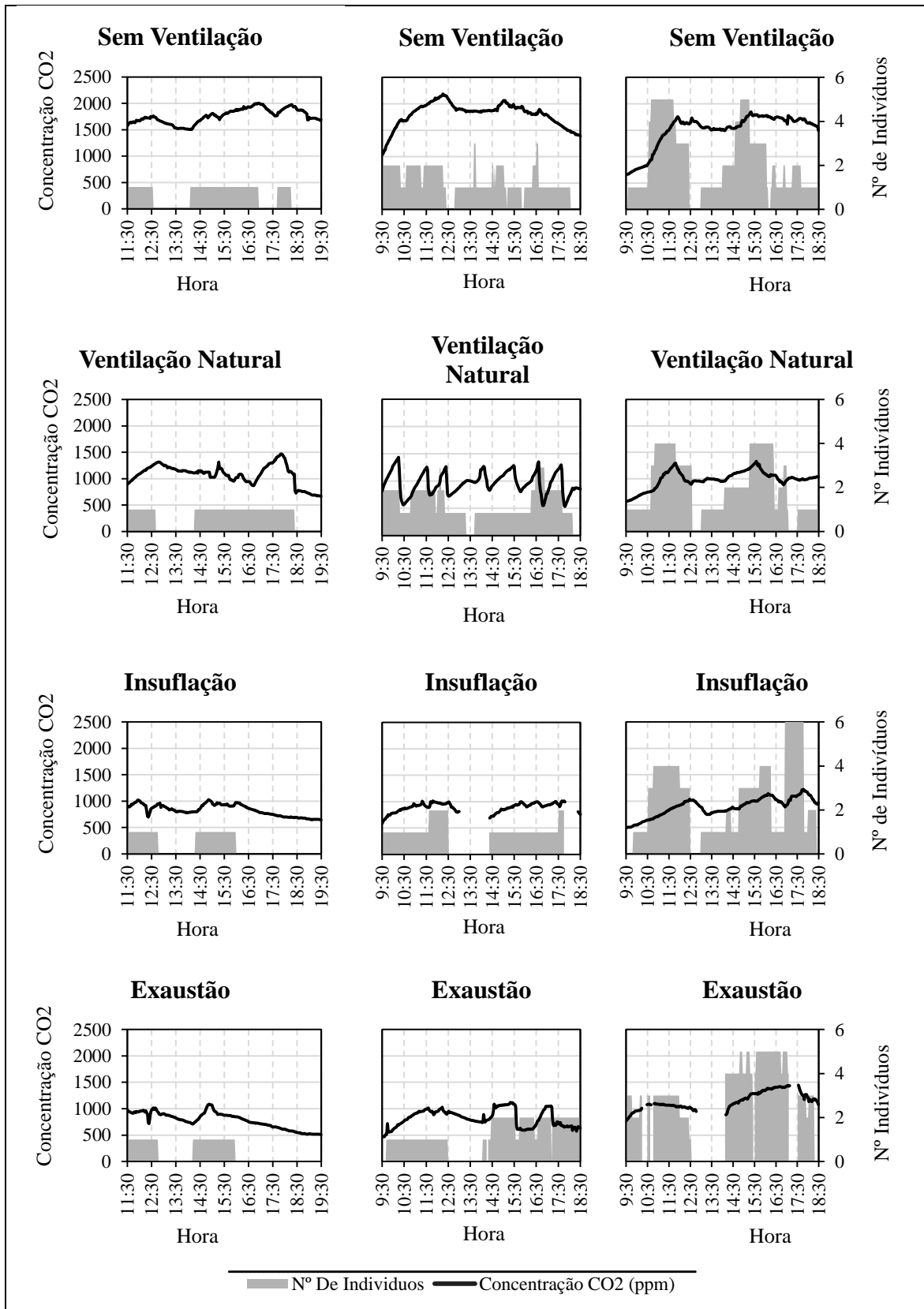


Figura 7.1 Variação das concentrações de dióxido de carbono em função do número de ocupantes nas Salas A, B e C (da esquerda para a direita)

Nos ensaios sem ventilação natural voluntária verificou-se que as concentrações de dióxido de carbono ultrapassaram frequentemente o valor de 1250 ppm, independentemente do volume e da taxa de ocupação dos espaços. Ainda que os limiares de proteção se refiram a médias de 8 horas, constata-se que a nas condições de ventilação destes ensaios o incumprimento legal é uma realidade fácil de atingir. As concentrações máximas registadas foram de 2000 ppm, 2121 ppm e 1846 ppm nas salas A, B e C, respetivamente. Como seria expectável, as concentrações de CO₂ variaram, regra geral, em função do número de ocupantes e do tempo de permanência dos mesmos no interior dos espaços, visto que, nas condições dos ensaios, os processos metabólicos dos ocupantes constituíram a principal fonte de CO₂ e, nessa medida, o número de ocupantes é a variável que melhor define a intensidade da fonte. Tendo por base o volume de ar por ocupante em cada um dos espaços, parece evidente que a Sala A é a que apresenta uma menor taxa de ventilação nas condições do ensaio. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que a Sala A se encontra no edifício da Escola Superior de Tecnologia e Gestão) enquanto as salas B e C estão no edifício da Escola Superior Agrária, que de acordo com o estudo de QAI desenvolvido por Rodrigues (2013), apresenta maiores taxas de infiltração.

Nos ensaios com ventilação natural voluntária verificou-se uma redução generalizadas dos níveis de CO₂ em todos os espaços. Na sala A, os níveis de dióxido de carbono oscilaram entre as entre as 668 a 1465 ppm, com valor médio de 1079 ppm. Na sala B, variaram entre as 536 a 1353 ppm, com valor médio de 954 ppm e na sala C, registaram-se níveis de CO₂ de 769 a 1447 ppm, com valor médio de 1152 ppm. De um modo geral, os níveis de CO₂ exibem oscilações mais frequentes e mais acentuadas ao longo do tempo em resultado da ventilação que decorre da abertura de janelas e/ou portas. As concentrações de CO₂ aumentaram nos períodos sem ventilação natural voluntária e sofreram decréscimos a partir do momento em que uma janela e/ou uma porta foi aberta. Os aumentos são determinados pela intensidade da principal fonte de CO₂ existente no espaço interior (atividade metabólica dos ocupantes), assim como pela acumulação deste constituinte gasoso, durante os períodos com baixas taxas de ventilação. As reduções mais rápidas dos níveis de CO₂ na sala B resultam do facto de a abertura da janela ter sido sempre acompanhada pela abertura da porta colocada no lado oposto, aumentando consideravelmente as taxas de ventilação. De notar ainda que os valores máximos e mínimos encontram-se fora do intervalo

previsto, dado que as regras de ventilação dos espaços estabelecidas para esta tipologia de ensaios não foram escrupulosamente cumpridas.

Os ensaios com recurso à insuflação mecânica de ar novo mostraram também que é possível manter os níveis de dióxido de carbono abaixo dos limiares de proteção legislados, sem que haja a intervenção dos ocupantes no processo de ventilação dos espaços. Os níveis de dióxido de carbono variaram entre 646 e 1030 ppm, com valor médio de 931 ppm, na sala A, entre 1011 e 696 ppm, com valor médio de 772 ppm, na sala B, e entre 503 e 1226 ppm, com valor médio de 892 ppm, na sala C. Também resultou evidente que, com este tipo de ventilação mecânica, as oscilações dos níveis de CO₂ não são tão acentuadas como as registadas nos ensaios ou em alguns dos ensaios com ventilação natural voluntária.

No que respeita aos ensaios realizados com recurso à extração mecânica de ar, podemos constatar que os níveis de dióxido de carbono evoluíram de forma muito similar aos registados para os ensaios com insuflação de ar. De um modo geral, as concentrações de CO₂ variaram entre as 707 e as 1018 ppm, com valor médio de 946 ppm, na sala A, entre 769 e 1447 ppm, com valor médio de 1152 ppm, na sala B e entre 769 e 1447 ppm, com valor médio de 1152 ppm, na sala C. De notar que para a sala C, com taxas de ocupação inferiores às registadas nos ensaios com insuflação, os níveis de CO₂ subiram, por breves períodos, acima dos 1250 ppm, indicando que a extração pode não ser um método de diluição tão eficiente como a insuflação. Este resultado está dentro do expectável, dado que com a extração, o ar que entra no espaço fechado é sobretudo proveniente de espaços interiores, com concentrações de CO₂ mais elevadas do que as prevalecentes no ar exterior, sobretudo em regiões com baixo nível de poluição.

De forma a melhor compreendermos algumas das diferenças entre as duas formas de ventilação mecânica utilizadas, analisaram-se as variações de CO₂ em conjunto com as variações dos fluxos de ar insuflados e extraídos. A variação obtida para as salas A, B e C encontra-se representada nas Figuras 7.2, 7.3 e 7.4, respetivamente.

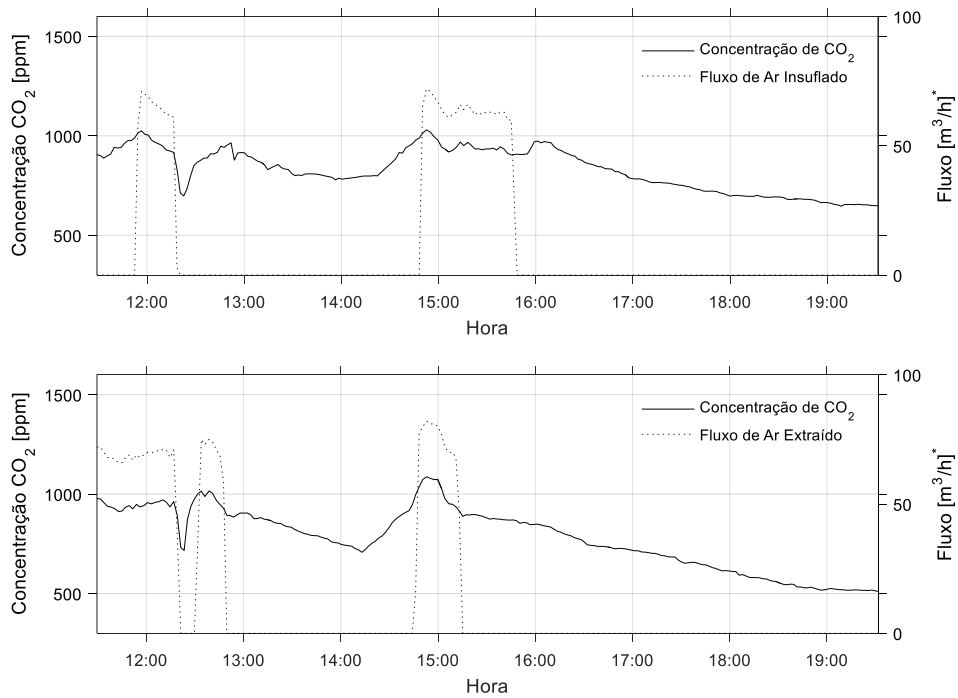


Figura 7.1 Variação da concentração do dióxido de carbono em função do fluxo de ar na sala A (em cima insuflação em baixo extração, respetivamente). * Valor resultante da linearização da resposta do ventilador

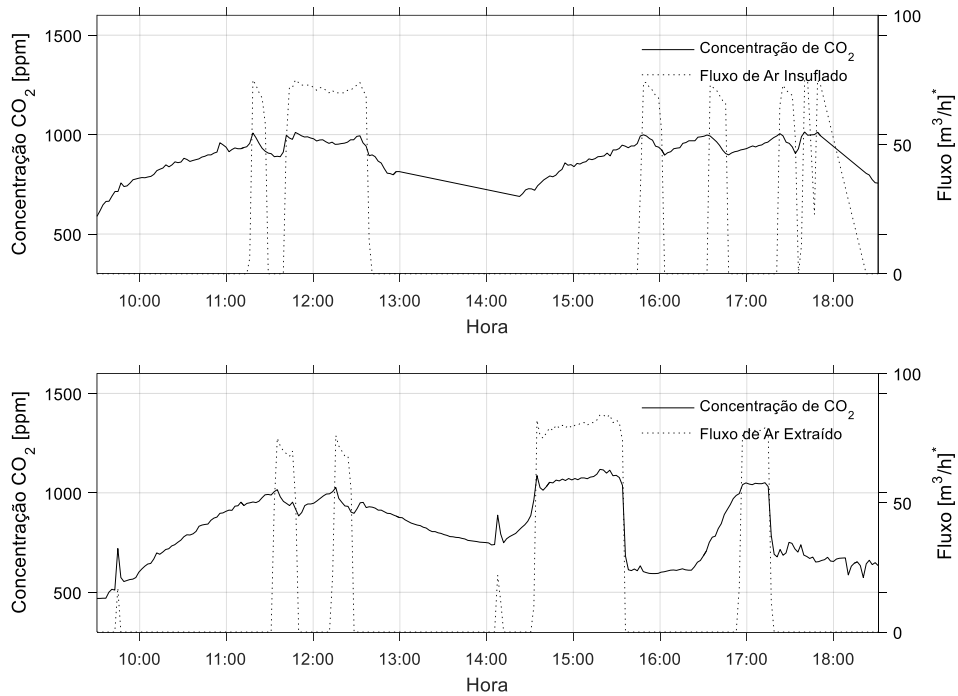


Figura 7.3 Variação da concentração do dióxido de carbono em função do fluxo de ar na sala B (em cima insuflação em baixo extração, respetivamente). * Valor resultante da linearização da resposta do ventilador

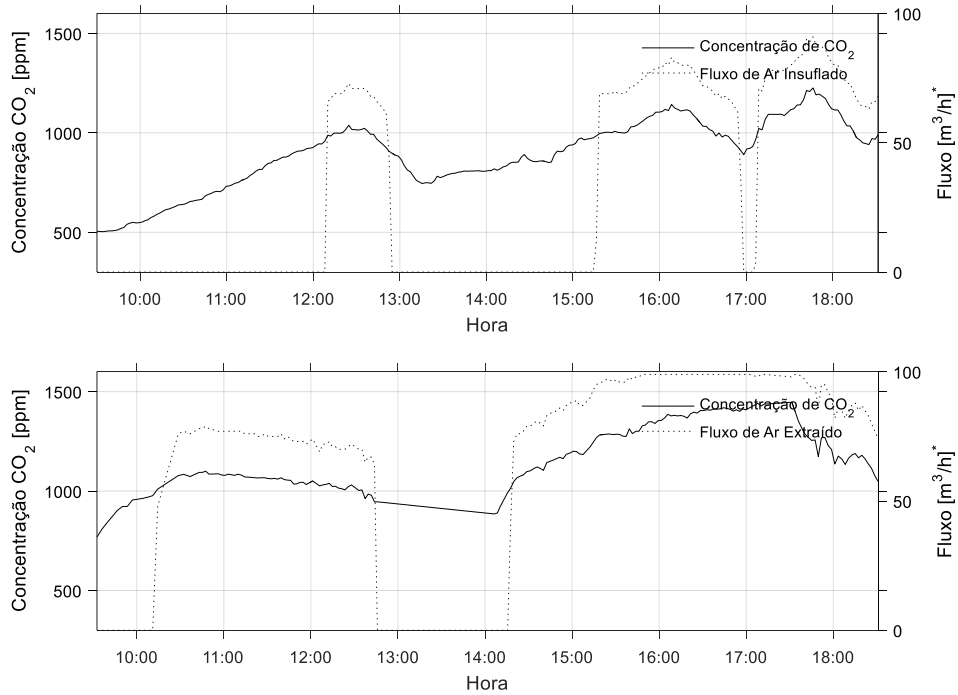


Figura 7.4 Variação da concentração do dióxido de carbono em função do fluxo de ar na sala C (em cima insuflação em baixo extração, respetivamente). * Valor resultante da linearização da resposta do ventilador

De um modo geral, observa-se a ativação do sistema de ventilação nos momentos em que os *setpoints*, definidos com base nas concentrações de CO₂, são atingidos. A comparação entre insuflação e extração não é linear porque foram ensaios realizados em dias diferentes em condições ambientais algo diferentes, mas parece notório que a extração não permite atingir as mesmas taxas de diluição das alcançadas pela insuflação para caudais da mesma magnitude. Para se aproximar da eficácia da insuflação, constata-se que os caudais e os períodos de extração de ar são superiores aos observados para a insuflação. De facto, como já foi referido anteriormente, a insuflação introduz ar novo com uma concentração usualmente abaixo dos 400-500 ppm de CO₂, enquanto a extração introduz preferencialmente ar interior de outros espaços no compartimento que está sob controlo. Ainda assim, em determinadas situações e sobretudo para as que foram testadas neste estudo, a extração revelou-se uma forma de ventilação eficaz.

7.3 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA E DA HUMIDADE RELATIVA DO AR INTERIOR

Na Figura 7.5 são apresentadas as variações temporais da humidade relativa e da temperatura do ar interior para os mesmos 12 ensaios, conduzidos nos três espaços distintos (salas A, B e C), com o objetivo de se avaliar a evolução destas variáveis de QAI para as práticas adotadas de ventilação.

A análise da figura anterior mostra que nas salas A e C, as temperaturas médias do ar interior oscilaram sensivelmente entre os 24 e os 27°C, enquanto na sala B foram quase sempre superiores a 30°C. Em relação à tendência central da humidade relativa, constata-se que os valores prevalentes diferem de espaço fechado para espaço fechado e são influenciados pelo tipo de ventilação adotado em cada ensaio. No ensaio sem ventilação, todos os espaços exibiram humidades relativas acima dos 45%. Nos ensaios com ventilação assistiu-se a um ligeiro decréscimo, sendo particularmente significativo para a sala B. Focando a nossa atenção no padrão de variação das duas variáveis, a influência do tipo e das taxas de ventilação faz-se notar de forma mais evidente. Nos ensaios sem ventilação natural voluntária registaram-se oscilações pouco significativas em ambas as variáveis, quando comparadas com as registadas nos ensaios com ventilação natural voluntária. Nos ensaios com ventilação mecânica simples, as variações foram da mesma ordem de grandeza das registadas nos ensaios sem ventilação, enquanto as variações da humidade relativa foram mais significativa, ainda que menos pronunciadas do que nos ensaios com ventilação natural voluntária.

Tendo por base apenas a influência da temperatura e da humidade relativa no conforto térmico em ambientes interiores, constatou-se que em condições de ausência de ventilação não são garantidas condições termicamente confortáveis. Segundo alguns autores (Burroughs e Shirley, 2013), as condições de conforto requerem temperaturas entre os 20 a 23,3 °C, nos meses de inverno, e entre 22,7 e 25,5 °C, nos meses de verão. A humidade relativa, por sua vez, deve encontrar-se numa gama entre os 30 a 60% para a variação de temperatura mínima e máxima observada anteriormente (Bas, 2004; Burroughs e Shirley, 2013; Law, 2013).

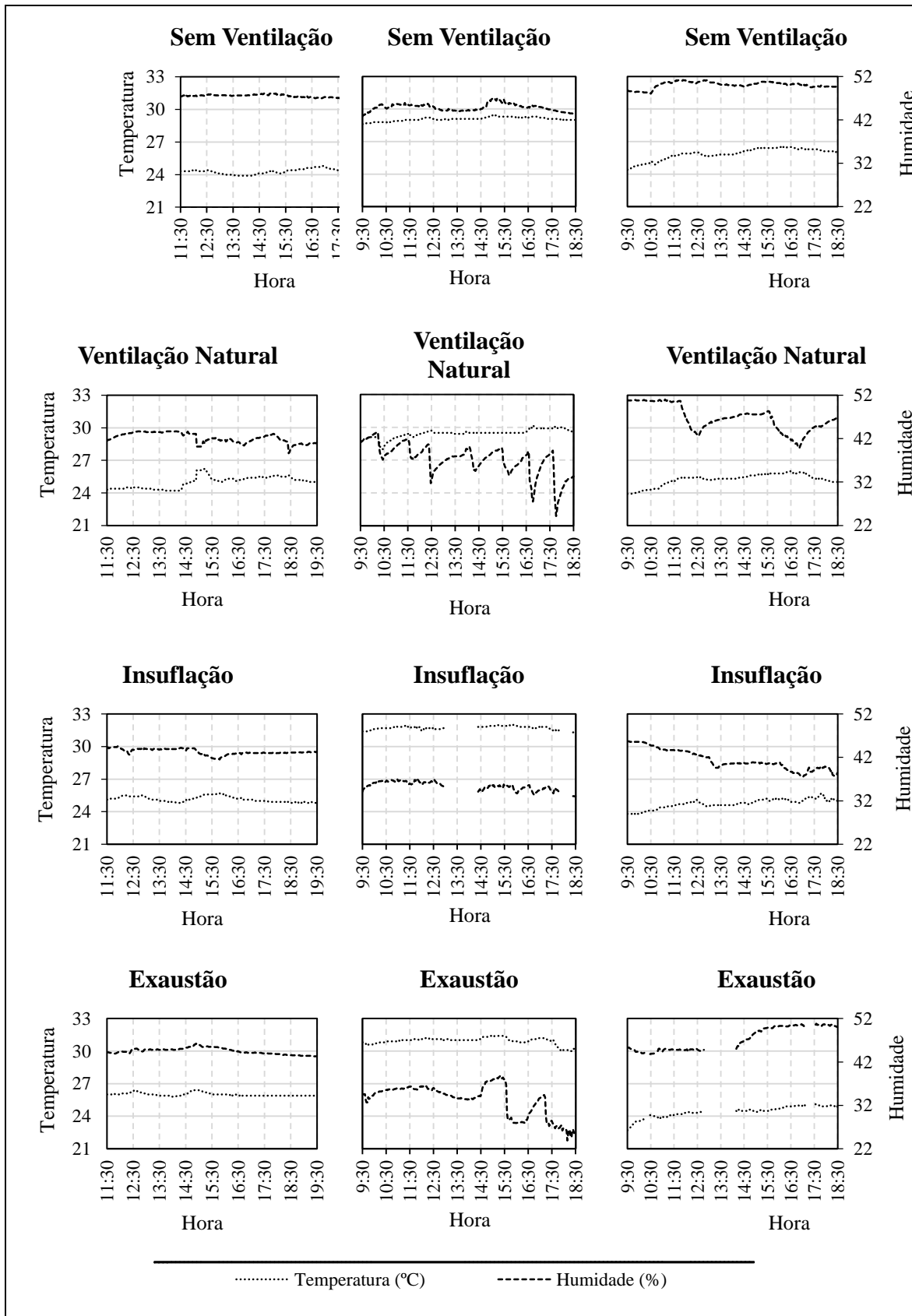


Figura 7.5 Variação da humidade relativa e temperatura nas salas A, B e C (da esquerda para a direita)

Concretizando esta análise, na sala A verificou-se uma variação de temperatura na ordem dos $0,9^{\circ}\text{C}$ para o ensaio sem ventilação, 2°C no ensaio com ventilação natural a variação foi de $0,9^{\circ}\text{C}$ no ensaio com a insuflação e $0,6^{\circ}\text{C}$ no ensaio com extração. A maior variação de humidade relativa verificou-se no caso da ventilação natural com uma diferença entre o valor máximo e mínimo de 5,1%, seguido da insuflação com uma variação de 3,1%, a extração apresentou um valor de 2,9% e no ensaio sem ventilação um valor de 1,2%.

Na sala B, o ensaio com recurso à ventilação natural foi aquele que proporcionou as mais acentuadas variações de temperatura, na ordem dos $2,1^{\circ}\text{C}$, seguido da situação sem ventilação com uma variação de $0,8^{\circ}\text{C}$. Nos ensaios com insuflação e extração as variações de temperatura foram de $0,7^{\circ}\text{C}$ e $0,6^{\circ}\text{C}$ respetivamente. Em termos de humidade relativa, a ventilação natural voluntária causou as maiores flutuações (cerca de 17%), seguindo-se o ensaio com recurso à extração com uma variação de 9%. As menores variações de humidade relativa verificaram-se nos ensaios sem ventilação e com insuflação de ar, com amplitudes de 3,8% e 4,2%, respetivamente.

Na sala C, a maior variação de temperatura verificou-se no ensaio com recurso à extração $2,4^{\circ}\text{C}$, o que de certo modo contraria os resultados obtido na sala A e B, tal ocorrência poderá ser explicada pelo facto de o ambiente envolvente por onde entrou o fluxo de ar geralmente apresentar valores de temperatura inferiores ao exterior, influenciando a temperatura da sala de forma mais significativa. O ensaio onde se verificou uma menor diferença de temperatura foi no da insuflação $1,9^{\circ}\text{C}$, o que também contraria os dados recolhidos nas salas A e B. Nos ensaios com ventilação natural e sem ventilação verificaram-se variações de $2,1^{\circ}\text{C}$ e $2,2^{\circ}\text{C}$, respetivamente. No que concerne à humidade relativa, as variações mais significativas foram registadas no ensaio com ventilação natural 11,2%, enquanto as menos significativas, de aproximadamente 3,2%, foram observadas no ensaio sem ventilação. Nos ensaios com insuflação e extração de ar as amplitudes entre os mínimos e os máximos registados foram de 8,2% e 7%. Esta situação deve-se ao facto de o fluxo de ar que entra ou sai da sala ser controlado pelo ventilador, e no caso da extração o fluxo de ar ser proveniente do interior do edifício, tendo, por isso, um efeito menor na variação dos valores registados no interior da sala.

Para complementar a análise anterior também se procurou avaliar a influência das condições ambientais exteriores e da ventilação mecânica nas condições térmicas e de

humidade relativa dos diferentes compartimentos. Com este propósito, a evolução da humidade relativa e da temperatura do ar interior foi representada em conjunto com a temperatura exterior e o fluxo de ar insuflado e extraído, para as diferentes salas, como se mostra nas figuras 7.6 a 7.8.

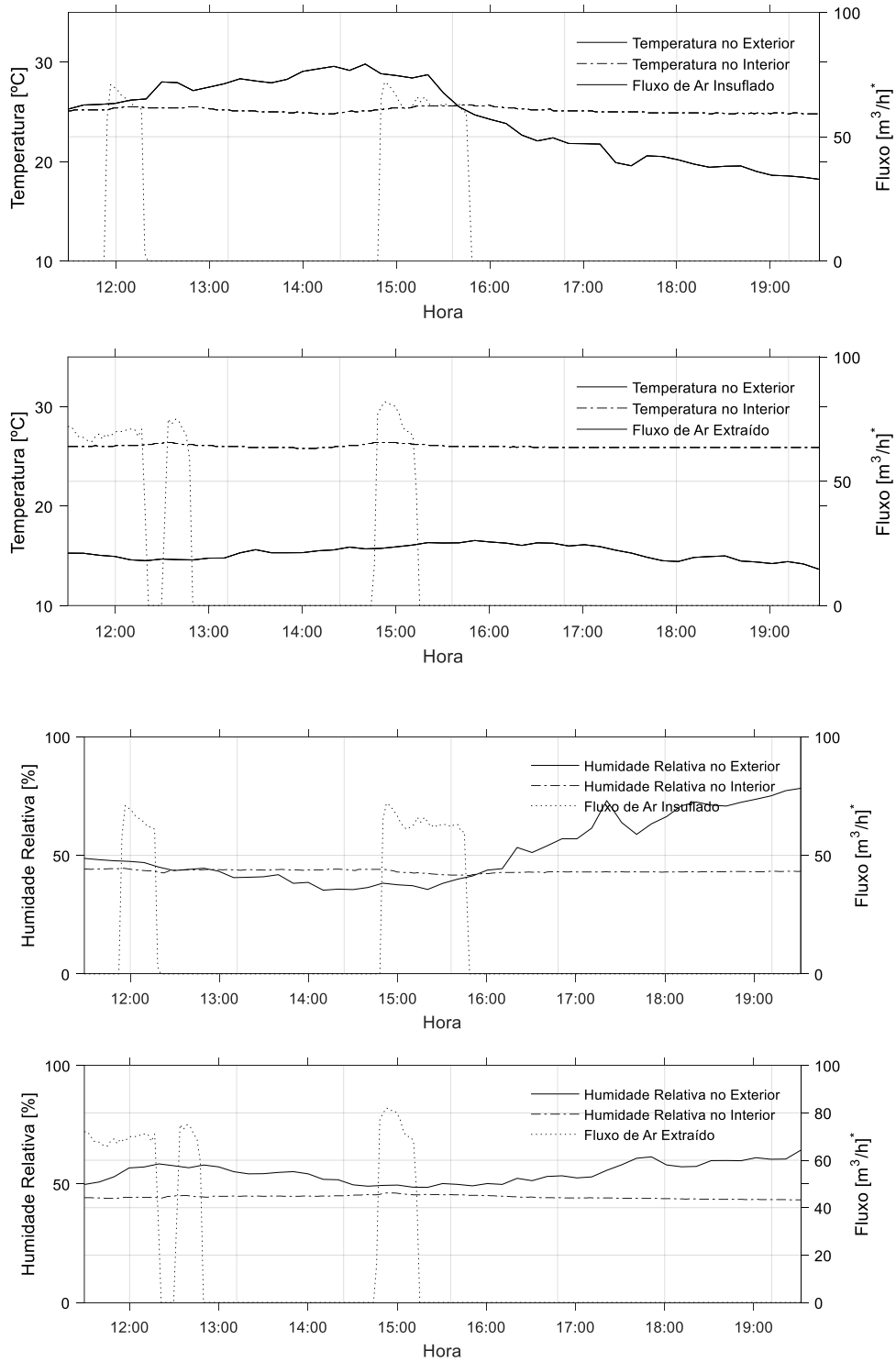


Figura 7.6 Evolução da temperatura e da humidade relativa no interior da Sala A, em conjunto com a evolução da temperatura exterior e do fluxo de ar insuflado e extraído. * Valor resultante da linearização da resposta do ventilador

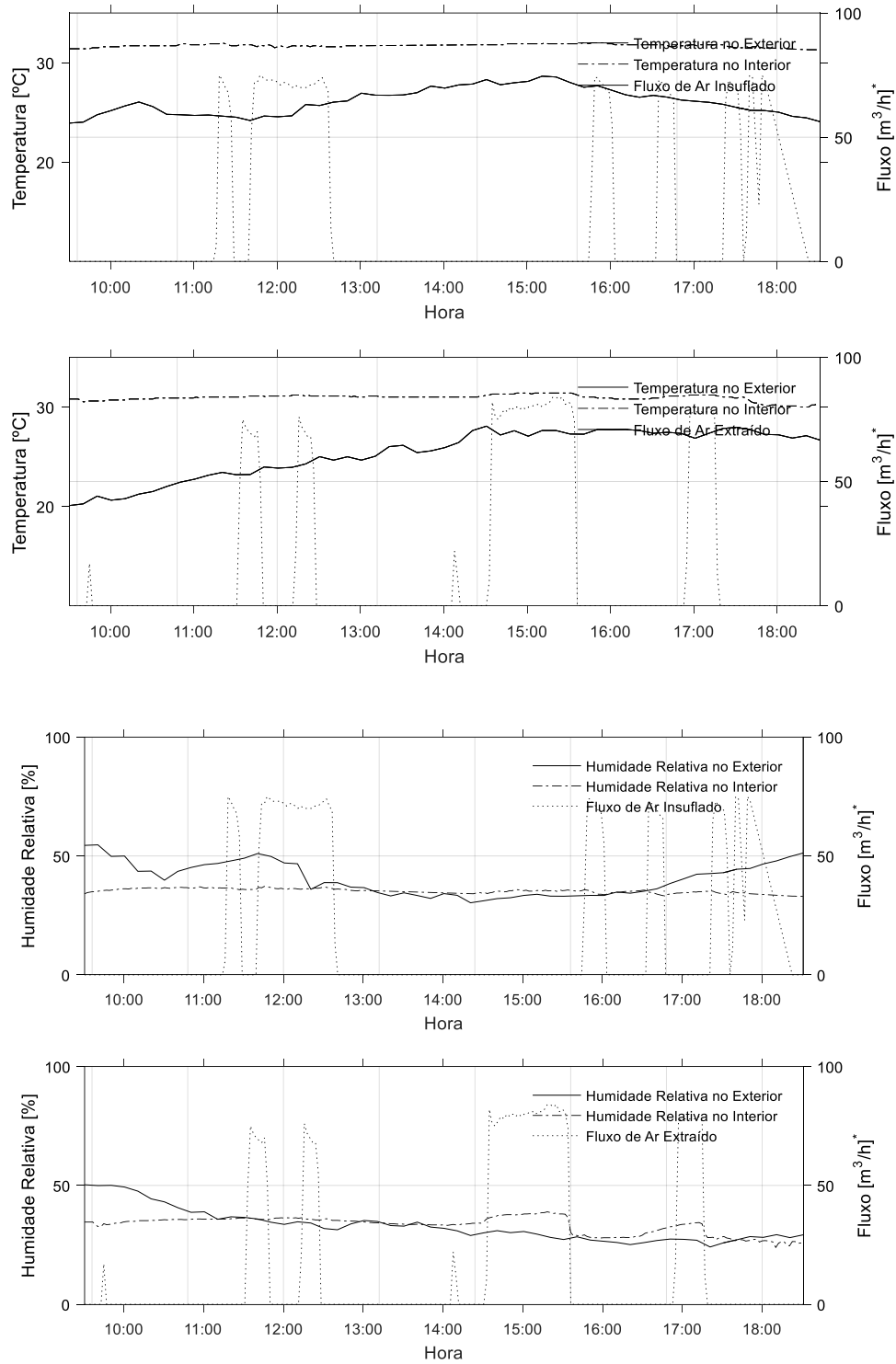


Figura 7.7 Evolução da temperatura e da humidade relativa no interior da Sala A, em conjunto com a evolução da temperatura exterior e do fluxo de ar insuflado e extraído. * Valor resultante da linearização da resposta do ventilador

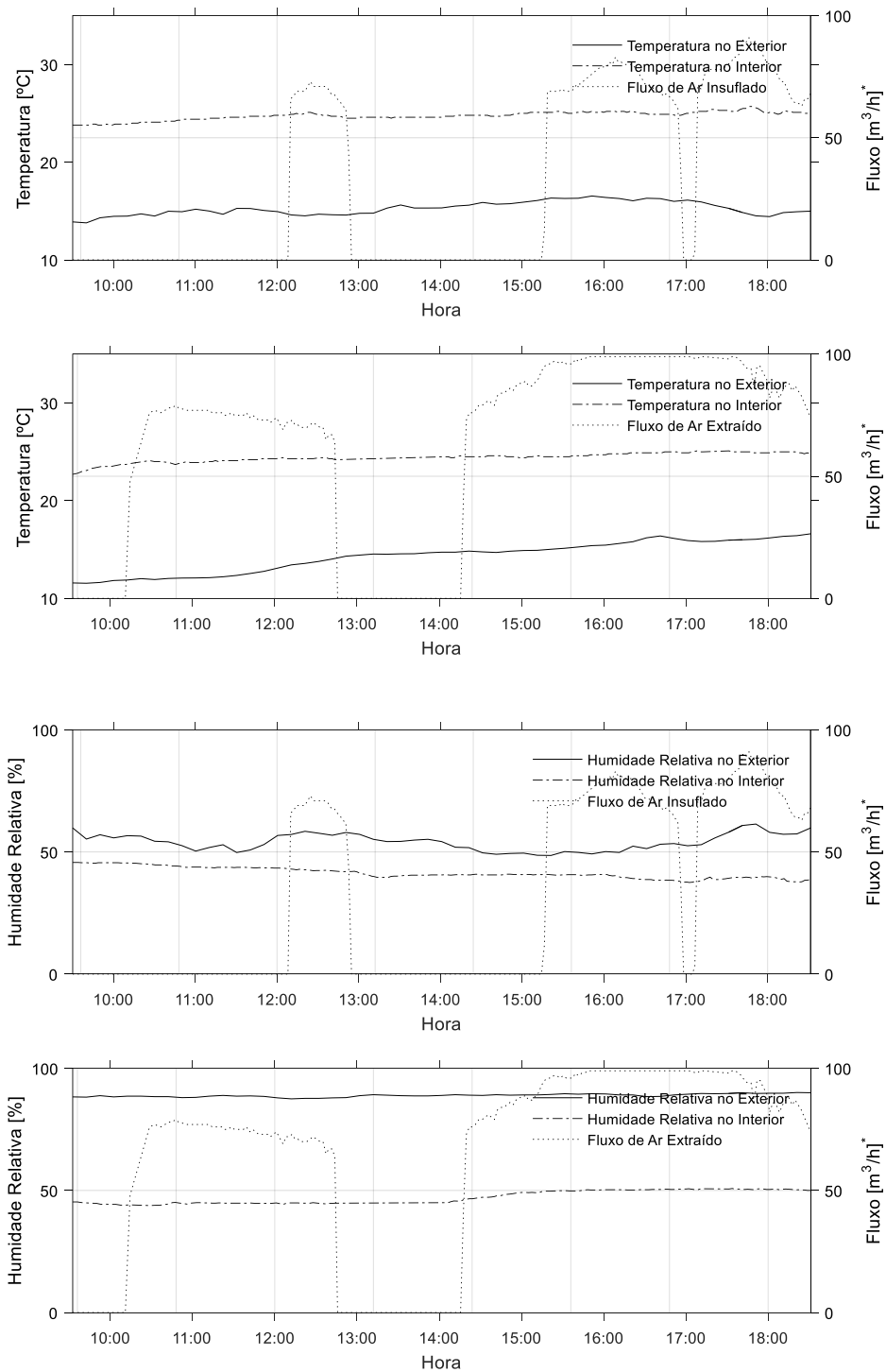


Figura 7.7 Evolução da temperatura e da humidade relativa no interior da Sala A, em conjunto com a evolução da temperatura exterior e do fluxo de ar insuflado e extraído. * Valor resultante da linearização da resposta do ventilador

De um modo geral, constata-se que a temperatura do ar interior e exterior não seguem o mesmo padrão de evolução temporal exibido pela temperatura do ar exterior. Este facto

advém das boas condições de isolamento dos dois edifícios. Observa-se também que a temperatura interior se mantém relativamente constante, enquanto a temperatura do ar exterior apresenta variações que em alguns casos são superiores a 5°C. Além disso, o diferencial térmico (Temperatura interior – Temperatura exterior) é substancial, sendo em algumas situações superior a 10°C. Em relação à humidade relativa, a situação é ligeiramente distinta. A variação temporal das condições interiores e exteriores apresentam uma maior similaridade e o diferencial apresenta, em geral, valores ligeiramente negativos. Importa, no entanto, referir que a humidade relativa e a temperatura do ar exterior foram obtidas na estação meteorológica instalada no terraço do edifício da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, pelo que poderá não representar exatamente os valores prevaletentes junto às superfícies do edificado. Atendendo à época do ano e do dia em que foram realizados os ensaios, a temperatura do ar junto aos edifícios é certamente superior, devido ao sobreaquecimento natural das superfícies do edificado. Estudos realizados no em zonas urbanas mostram que a temperatura das superfícies pode atingir valores entre 5 a 10°C acima da temperatura do ar fora da influência das mesmas, dependendo dos seus materiais, da sua geometria, orientação, entre outros fatores (Niachou et al. 2008; Hassanein et al., 2013).

Independentemente do diferencial térmico existente, que pode ser bem mais reduzido do que o plasmado nas figuras, os resultados mostram claramente que a insuflação e a extração de ar apresentam uma interferência mínima nas condições de humidade e temperatura do ar interior. A insuflação teve um efeito muito pouco perceptível na temperatura e na humidade relativa, aumentando o valores destas grandezas, quando o os respetivos diferenciais, entre interior e exterior, são negativos e diminuindo-as, na presença de diferenciais positivos. Na extração de ar não foi perceptível qualquer influência na temperatura, mas curiosamente foi observável um aumento quase imperceptível na humidade relativa.

Assim, podemos afirmar que, de certa forma, as influências mais significativas ocorreram com a ventilação natural voluntária, através da abertura de janelas e/ou portas, como ocorreu na sala B. Quanto à ventilação mecânica simples, os efeitos foram praticamente negligenciáveis. No entanto, a abertura de uma janela nos meses de Inverno pode apresentar um impacte negativo sobretudo no bem-estar dos ocupantes e na eficiência energética, devido às baixas temperaturas e às elevadas humidades que se fazem sentir no exterior. No geral,

apesar de algumas exceções, a extração é uma forma de ventilação menos eficaz do que a insuflação na diluição de cargas de contaminantes, mas pode interferir menos com a temperatura e a humidade relativa, pelo facto usualmente possibilitar a entrada de ar com características térmicas similares à do espaço sob controlo. Os ensaios com insuflação não interferiram muito nessas variáveis, porém nos períodos de Inverno o seu efeito pode acontecer o oposto, devido às diferenças entre o ar exterior e o ar interior quer em termos térmicos quer em termos de humidade.

Ressalva-se ainda que a ventilação mecânica permite o controlo automático da Qualidade do Ar Interior sem a necessidade de intervenção do utilizador, não necessita de um diferencial de temperatura entre o ambiente interior e exterior para a ocorrência da movimentação de massas de ar e pode melhorar a eficiência energética e o conforto térmico dos ocupantes, principalmente nos meses inverno pois não se verifica uma variação significativa da temperatura e humidade relativa interior, possibilita o controlo do caudal de ar de entrada e saída como constatam (Cook, 2005; Escombe *et al.*, 2007) e permite a inclusão de um filtro de partículas e odores caso necessário.

8 CONCLUSÃO

A qualidade do ar interior é um fator risco ambiental de especial importância, uma vez que pode afetar a saúde, as funções cognitivas do ser humano e a produtividade de quem permanece uma grande parte do seu tempo em espaços fechados. Vários estudos (incluindo este) mostram que a qualidade do ar interior em edifícios escolares pode e deve ser melhorada. A forma de o fazer não é única e cabe, por isso, aos responsáveis pela gestão dos edifícios, em conjunto com os ocupantes e com técnicos especializados, encontrarem soluções que possam ser eficazes na criação e manutenção de atmosferas interiores mais saudáveis para todos os utilizadores desses espaços.

O presente estudo surgiu neste contexto de procura de soluções de melhoria de QAI, ao ter como objetivo central a construção de um sistema de monitorização e controlo de qualidade do ar interior, autónomo, fácil de instalar, robusto e suficientemente fiável e com um custo significativamente inferior aos dispositivos comerciais com funcionalidades semelhantes. Apesar das dificuldades que foram surgindo no decurso do estudo, além da construção do sistema, foi ainda possível validá-lo e proceder à realização de um conjunto de ensaios em diferentes situações reais. Há um caminho ainda a percorrer no sentido de melhorar alguns aspetos do sistema, mas ao fim desta primeira etapa podemos afirmar que os objetivos a que nos propusemos foram amplamente ultrapassados.

De um modo geral, o monitor de QAI permite a recolha de informação lida pelos sensores de dióxido de carbono, monóxido de carbono, humidade relativa e temperatura do ar, faz processamento estatístico de médias dos dados recolhidos e é responsável pela tomada de decisão e pelo acionamento de um ventilador que, com base num mecanismo integrador, permite um aumento ou uma diminuição do fluxo de ar de forma suave, em função dos desvios positivos das concentrações de CO₂ e/ou de CO relativamente aos *setpoints* definidos para o efeito. O sistema estabelece ainda comunicação com um servidor remoto que regista numa base de dados toda a informação enviada para um período temporal de um ano (na sua versão gratuita) e que usa estratégias de redundância que garantem a salvaguarda dos dados. A consulta pode ser realizada diretamente no servidor, no caso do administrador da conta, ou a partir de um *browser* de um qualquer terminal, com acesso à internet, ligando-se a um servidor web que contém uma página desenvolvida para o efeito e que se encontra alojada

nos servidores do IPB no endereço <http://www.alunos.ipb.pt/~a25812/>. A implementação adotada permite a recolha, armazenamento e consulta de múltiplos monitores de QAI constituindo um verdadeiro sistema distribuído, permitindo aos administradores do sistema e aos possíveis utilizadores retirar partido de todas as potencialidades e funcionalidades que um sistema do género coloca à sua disposição.

Importa ainda destacar, o baixo custo do sistema que é manifestamente inferior aos sistemas existentes no mercado com funcionalidades que ficam aquém das que este disponibiliza, num fator que pode ser inferior a um décimo do valor.

A validação do sistema envolveu procedimentos nem sempre fáceis de implementar, mas a adoção de mais do que uma metodologia foi determinante para dissipar um conjunto de incertezas associadas à monitorização de variáveis ambientais em condições nem sempre totalmente controladas. No geral, o processo de validação permitiu criar um sistema suficientemente fiável, capaz de levar a cabo as suas principais funções - medir com suficiente rigor e precisão alguns parâmetros de QAI e acionar um mecanismo de ventilação com base na magnitude de pelo menos um dos parâmetros.

O sistema foi também testado em diferentes ensaios, de modo a poder avaliar-se o seu desempenho em situações concretas ora como monitor ora como monitor e controlador de QAI. Ao todo foram realizados 12 ensaios de 8-9 h de duração cada. Os resultados destes ensaios foram bastante satisfatórios, porque, além de atestarem que o sistema teve um ótimo comportamento em termos de estabilidade, repetibilidade, reprodutibilidade e fiabilidade, permitiram ainda avaliar alguns fatores do fenómeno QAI.

Importa realçar que o delineamento de ensaios para estudar alguns fatores do fenómeno QAI não constituía um dos objetivos centrais do estudo, mas ainda assim foi possível constatar que a ventilação natural, face à ventilação mecânica simples em função da concentração do dióxido e/ou monóxido projetado pode apresentar um conjunto de vantagens. A ventilação mecânica permite o controlo automático da Qualidade do Ar Interior sem a necessidade de intervenção do utilizador, não necessita de um diferencial de temperatura entre o ambiente interior e exterior para a ocorrência da movimentação de massas de ar pode melhorar a eficiência energética e o conforto térmico dos ocupantes, principalmente nos meses inverno.

Como verificou (Atkinson, 2009; Chastain, 2000; Rijal *et al.*, 2007), pois não se verifica uma variação significativa da temperatura e humidade relativa interior, possibilita o controlo do caudal de ar de entrada e saída como constata (Cook, 2005; Escombe *et al.*, 2007) e permite a inclusão de um filtro de partículas e odores caso necessário.

Como trabalho futuro é importante avançar para a implementação do monitor de qualidade do ar numa plataforma dedicada, permitindo reduzir custos e dimensões, para o desenvolvimento de uma estratégia de controlo de acesso aos dados (associar os dados a contas de utilizador e permitir o acesso apenas a utilizadores autorizados), para o desenvolvimento de estratégias flexíveis e configuráveis de seleção dos dados a consultar (metodologias de filtragem) e para a inclusão de um alarme sonoro em função das concentrações de contaminantes e/ou indicadores de QAI. A inclusão de outros sensores será também equacionada, nomeadamente a de Compostos Orgânicos Voláteis, para os quais em alguns países da União Europeia já existe legislação específica de regulação. Além destes aspetos relacionados com as características e funções do sistema de monitorização e controlo, importa ainda destacar a necessidade de efetuar novos estudos com o intuito de compreender melhor a relação entre o método de ventilação adotado, as concentrações de dióxido de carbono, as concentrações de outros contaminantes, o conforto térmico e a eficiência energética dos edifícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adafruit, 2014. Adafruit HUZZAH CC3000 WiFi Breakout with Onboard Antenna - v1.1.
- Allocca, C., Chen, Q., Glicksman, L.R., 2003. Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings* 35, 785-795.
- Aluf, O., 2012. *Optoisolation Circuits: Nonlinear Applications in Engineering*.
- APA, 2015. Políticas > Ar > Qualidade do Ar Interior. Agencia Portuguesa do Ambiente, I. P. .
- Apte, M.G., Fisk, W.J., Daisey, J.M., 2000. Associations Between Indoor CO2 Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in U.S. Office Buildings: An Analysis of the 1994–1996 BASE Study Data.
- Arduino, 2015. Arduino Mega.
- Atkinson, J., 2009. Natural ventilation for infection control in health-care settings. World Health Organization.
- Balocco, C., 2002. A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings* 34, 469-475.
- Bas, E., 2004. *Indoor Air Quality: A Guide for Facility Managers*.
- Baughman, A., Arens, E.A., 1996. Indoor Humidity and Human Health--Part I: Literature Review of Health Effects of Humidity-Influenced Indoor Pollutants.
- Blumenthal, I., 2001. Carbon monoxide poisoning. *Journal of the Royal Society of Medicine* 94, 270-272.
- Bluyssen, P.M., Oostra, M.A.R., Böhms, H.M., 2010. A top-down system engineering approach as an alternative to the traditional over-the-bench methodology for the design of a building. *Intelligent Buildings International* 2, 98-115.
- Burroughs, H.E., Shirley, J.H., 2013. *Managing indoor air Quality*, fifth edition.
- Cable, M., 2005. *Calibration: A Technician's Guide*.
- cata, 2010. B-10/B-12/B-15.
- CEPA, 2013. *Health Effects of Indoor Pollutants*.
- Chan, S.H., Van Hee, V.C., Bergen, S., Szpiro, A.A., DeRoo, L.A., London, S.J., Marshall, J.D., Kaufman, J.D., Sandler, D.P., 2015. Long-Term Air Pollution Exposure and Blood Pressure in the Sister Study. *Environmental health perspectives* 123, 951-958.
- Chastain, J.P., 2000. Design and management of natural ventilation systems. *Proc. Dairy Housing and Equipment Systems: Managing and Planning for Profitability (NRAES-129) Plant and Life Sciences Publishing, Ithaca, NY*, 147-163.
- Chen, Q., 2009. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment* 44, 848-858.

- Cheremisinoff, N.P., 2002. Handbook of Air Pollution Prevention and Control.
- Clausen, G., Høst, A., Toftum, J., Bekö, G., Weschler, C.J., Callesen, M., Buhl, S., Ladegaard, M.B., Langer, S., Andersen, B., Sundell, J., Bornehag, C.-G., Sigsgaard, T., 2009. Indoor Environment and Children's Health (IECH) – An ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors in homes and kindergartens and children's health and wellbeing, Proceedings of Healthy Buildings 2009, Syracuse, p. 603.
- CO2meter, 2009. K-Series sensors Arduino UART Example.
- CO2meter, 2013. Automatic Background Calibration (ABC) in Senseair CO2 Sensors Explained.
- CO2meter, 2015. K-30 10,000ppm CO2 Sensor.
- Cook, G., 2005. Natural Versus Mechanical Ventilation HPAC.
- Dales, R., Liu, L., Wheeler, A.J., Gilbert, N.L., 2008. Quality of indoor residential air and health. CMAJ : Canadian Medical Association Journal 179, 147-152.
- Darling, E.K., Cros, C.J., Wargocki, P., Kolarik, J., Morrison, G.C., Corsi, R.L., 2012. Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements. Building and Environment 57, 370-376.
- Destailats, H., Cohn, S., Sleiman, M., 2014. 24th Annual Meeting of the International Society for Exposure Science (ISES).
- Dudzinska, M.R., 2011. Management of Indoor Air Quality.
- EcoMENA, 2015. Unending Benefits of Natural Ventilation.
- Eide, M.S., Dalsøren, S.B., Endresen, Ø., Samset, B., Myhre, G., Fuglestad, J., Berntsen, T., 2013. Reducing CO2 from shipping – do non-CO2 effects matter? Atmos. Chem. Phys. 13, 4183-4201.
- EPA, 2000. Carbon Dioxide as a Fire Suppressant: Examining the Risks.
- EPA, 2015. Particulate Matter (PM).
- Erdmann, C.A., Steiner, K.C., Apte, M.G., 2002. Indoor carbon dioxide concentrations and sick building syndrome symptoms in the BASE study revisited: Analyses of the 100 building dataset.
- Escombe, A.R., Oeser, C.C., Gilman, R.H., Navincopa, M., Ticona, E., Pan, W., Martínez, C., Chacaltana, J., Rodríguez, R., Moore, D.A.J., Friedland, J.S., Evans, C.A., 2007. Natural Ventilation for the Prevention of Airborne Contagion. PLoS Med 4, e68.
- Falagas, M.E., Bliziotis, I.A., Kosmidis, J., Daikos, G.K., 2010. Unusual climatic conditions and infectious diseases: observations made by Hippocrates. Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica 28, 716-718.
- Farrow, A., Taylor, H., Golding, J., 1997. Time Spent in the Home by Different Family Members.

- Fierro, M.A., O'Rourke, M.K., Burgess, J.L., 2001. Adverse health effects of exposure to ambient carbon monoxide
The University of Arizona, College of Public Health.
- FIGARO, 2015a. CMM5042 - Pre-calibrated Module for CO Gas.
- FIGARO, 2015b. TGS5042, TGS5342 and CMM5042.
- Fordham, M., 2000. Natural ventilation. *Renewable Energy* 19, 17-37.
- Frontczak, M., Schiavon, S., Goins, J., Arens, E., Zhang, H., Wargocki, P., 2012. Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. *Indoor Air* 22, 119-131.
- GHK, T.G.o.t.H.K.S.A.R.I.A.Q.M.G., 2013. Guidance Notes for the Management of Indoor Air Quality in Offices and Public Places.
- Ginja, J., Borrego, C., Coutinho, M., Nunes, C., Morais-Almeida, M., 2008. Qualidade do ar interior nas habitações Portuguesas. 10.
- Greer, C., 2007. Something in the air: A critical review of literature on the topic of sick building syndrome.
- Gül, H., 2011. Sick Building Syndrome from the Perspective of Occupational and Public Health.
- Hall, R., Hardin, T., Ellis, R., 2003. School Indoor Air Quality Best Management Practices Manual.
- Hansel, N.N., McCormack, M.C., Belli, A.J., Matsui, E.C., Peng, R.D., Aloe, C., Paulin, L., Williams, D.A.L., Diette, G.B., Breyse, P.N., 2013. In-Home Air Pollution Is Linked to Respiratory Morbidity in Former Smokers with Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 187, 1085-1090.
- Hardin, T., Hall, R., Ellis, R., 2003. School Indoor Air Quality Best Management Practices Manual
- Heiselberg, P., 2000. Design Principles for Natural and Hybrid Ventilation.
- Heyman, E., 1829-1889.
- Hodgson, A.T.B.D., McIlvaine, J.E.R., 2002. Sources of formaldehyde, other aldehydes and terpenes in a new manufactured house.
- Hui, P.S., Wong, L.T., Mui, K.M., 2008. Using Carbon Dioxide Concentration to Assess Indoor Air Quality in Offices.
- Inmotion, 2015. LCD Module 16x2, White on Blue
- IOM, 2011. Climate Change, the Indoor Environment, and Health.
- IPQ, 1996. Vocabulário Internacional de Metrologia, Termos Fundamentais e gerais, 2ª ed.
- Isen, F.W., 2008. DSP for MATLAB™ and LabVIEW™ I: Fundamentals of Discrete Signal Processing.

- Ji, Y.Z.a.X., 2011. Sick Building Syndrome and Indoor Environmental Quality in China – A Review.
- Jonathan, M.G., Carter, R.P., William, J.S., Sachin, N.B., Perdita, P., Lianne, S.K., Chunxia, F., Watcharoot, K., Diane, R.G., Wanda, P., 2013. Classroom-Based Air Pollution Effects On Asthma Morbidity In Inner City School Children, B28. MODULATORS OF ASTHMA SEVERITY. American Thoracic Society, pp. A2521-A2521.
- jonoxer, 2011. Arduino library to support SHT1x-series (SHT10, SHT11, SHT15) temperature / humidity sensors from Sensirion <http://www.practicalarduino.com/>.
- Kasuga, H., 1990. Indoor Air Quality.
- Khan, N., Su, Y., Riffat, S.B., 2008. A review on wind driven ventilation techniques. Energy and Buildings 40, 1586-1604.
- Khazaii, J., 2014. Indoor Air Quality, Energy-Efficient HVAC Design. Springer International Publishing, pp. 47-51.
- Kosonen, R., Ahola, M., Villberg, K., Takki, T., 2011. Perceived IEQ Conditions: Why the Actual Percentage of Dissatisfied Persons is Higher than Standards Indicate?
- Lacey, M.E., West, J.S., 2006. The Air Spora.
- Larsen, T.S., Heiselberg, P., 2008. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. Energy and Buildings 40, 1031-1040.
- Law, T., 2013. The Future of Thermal Comfort in an Energy- Constrained World.
- Lesniak, R., 2015. AdafruitCC3000WiFi.
- Levin, H., Associates, 1989. Building Materials and Indoor Air Quality.
- Li, F., Chan, H.C., Liu, S., Jia, H., Li, H., Hu, Y., Wang, Z., Huang, W., 2015. Carbon monoxide poisoning as a cause of death in Wuhan, China: A retrospective six-year epidemiological study (2009–2014). Forensic Science International 253, 112-118.
- Li, Y., Delsante, A., 2001. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces. Building and Environment 36, 59-71.
- Liping, W., Hien, W.N., 2007. The impacts of ventilation strategies and facade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. Building and Environment 42, 4006-4015.
- Madureira, J., Paciência, I., Ramos, E., Barros, H., Pereira, C., Teixeira, J.P., Fernandes, E.d.O., 2015. Children’s Health and Indoor Air Quality in Primary Schools and Homes in Portugal—Study Design. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A 78, 915-930.
- MDPH, M.D.o.P.H., 2005. Appendix 1 – Carbon Dioxide and its Use in Evaluating Adequacy of Ventilation in Buildings. Massachusetts Bureau of Environmental Health Assessment, Department of Public Health.
- Melikov, A.K., Dzhartov, V., 2013. Advanced air distribution for minimizing airborne cross-infection in aircraft cabins. H V A C & R Research 19, 926-933.

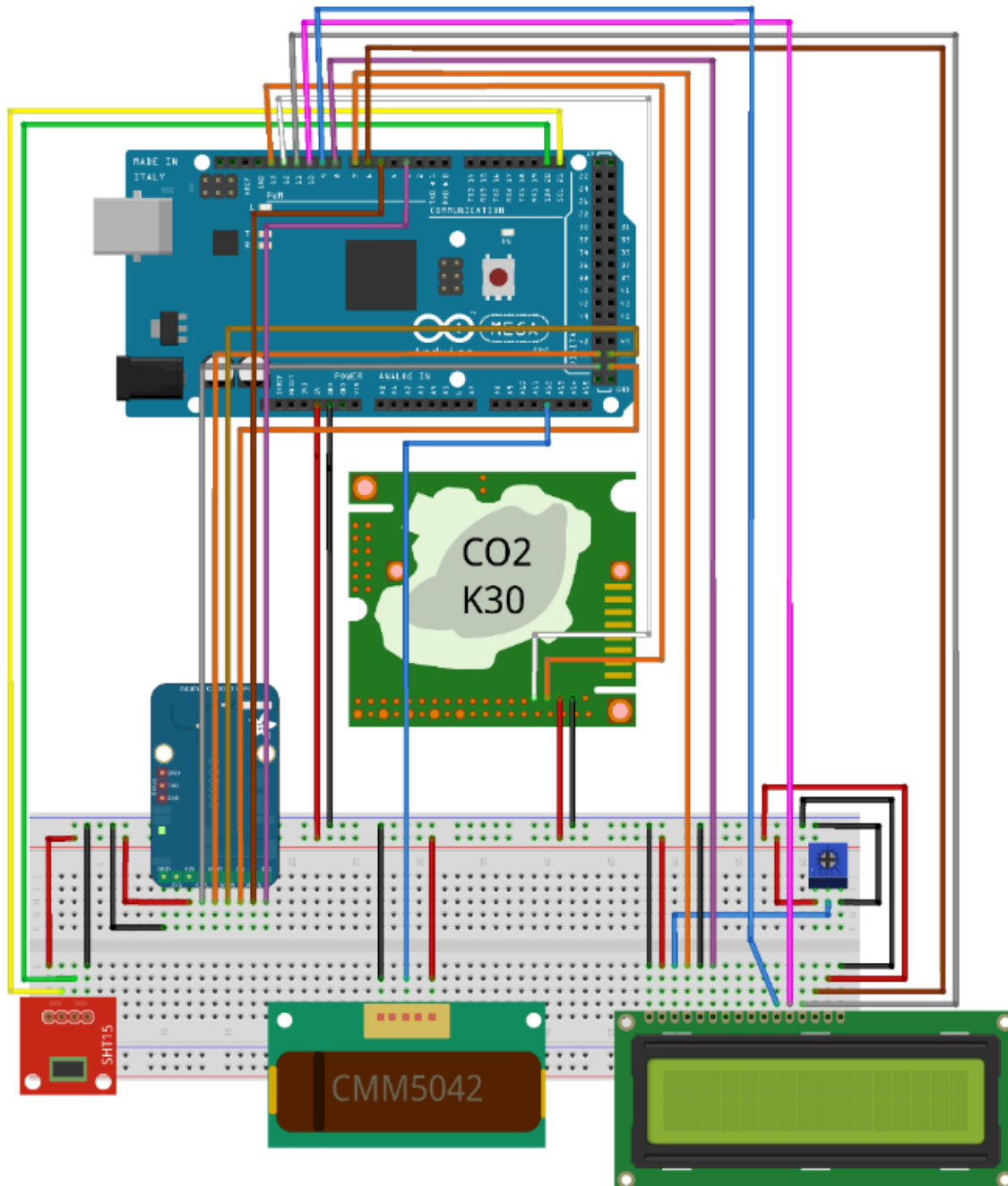
- Mendell, M.J., Eliseeva, E.A., Davies, M.M., Lobscheid, A., 2015. Do classroom ventilation rates in California elementary schools influence standardized test scores? Results from a prospective study. *Indoor Air*, n/a-n/a.
- Milica, G., 2009. Sick building syndrome. Do we live and work in unhealthy environment?
- Mitchell, J.W., Braun, J.E., 2013. Heating, Ventilation, and Air Conditioning in Buildings. OEHHA, 2000. *Air Toxicology and Epidemiology*.
- Portarian.º353-A, 2013. Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de dezembro.
- Pott, P., 1778. *Chirurgical Works of Percivall Pott*, F. R. S.
- Ramazzini, B., 1743. *De Morbis Rrtificum*.
- Raub, J.A., Benignus, V.A., 2002. Carbon monoxide and the nervous system. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 26, 925-940.
- Rijal, H.B., Tuohy, P., Humphreys, M.A., Nicol, J.F., Samuel, A., Clarke, J., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings* 39, 823-836.
- RSECE, 2006. Decreto-Lei n.º 79/2006, in: *Ambiente* (Ed.).
- Russo, E.T., Hulse, T.E., Adamkiewicz, G., Levy, D.E., Bethune, L., Kane, J., Reid, M., Shah, S.N., 2015. Comparison of Indoor Air Quality in Smoke-Permitted and Smoke-Free Multiunit Housing: Findings From the Boston Housing Authority. *Nicotine & Tobacco Research* 17, 316-322.
- Samet, J.M., Marbury, M.C., Spengler, J.D., 1988. Health Effects and Sources of Indoor Air Pollution. Part II. *American Review of Respiratory Disease* 137, 221-242.
- Sarnat, J.A., Sarnat, S.E., Flanders, W.D., Chang, H.H., Mulholland, J., Baxter, L., Isakov, V., Ozkaynak, H., 2013. Spatiotemporally resolved air exchange rate as a modifier of acute air pollution-related morbidity in Atlanta. *J Expos Sci Environ Epidemiol* 23, 606-615.
- Schell, M., Inthout, D., 2001. Demand Control Ventilation Using CO₂.
- Schirmer, W.N., Pian, L.B., Szymanski, M.S.E., Gauer, M.A., 2011. A poluição do ar em ambientes internos e a síndrome dos edifícios doentes.
- SENSORION, 2015. CMOSens® - Core of Sensirion's Sensor Solutions.
- Seppänen, O.A., Fisk, W.J., Mendell, M.J., 1999. Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. *Indoor Air* 9, 226-252.
- Sherman, M.H., 2014. Impacts of contaminant storage on indoor air quality: Model development.
- Simonson, C., 2005. Energy consumption and ventilation performance of a naturally ventilated ecological house in a cold climate. *Energy and Buildings* 37, 23-35.

- Singh, A.L., Jamal, S., 2011. A study of risk factors associated with indoor air pollution in the low income households in Aligarh city, India
- Sircar, K., Clower, J., Shin, M.k., Bailey, C., King, M., Yip, F., 2015. Carbon monoxide poisoning deaths in the United States, 1999 to 2012. *The American Journal of Emergency Medicine*.
- Sousa, S.I., Ferraz, C., Alvim-Ferraz, M.C., Vaz, L., Marques, A., Martins, F., 2012. Indoor air pollution on nurseries and primary schools: impact on childhood asthma - study protocol. *BMC Public Health* 12, 435.
- St-Jean, M., St-Amand, A., Gilbert, N.L., Soto, J.C., Guay, M., Davis, K., Gyorkos, T.W., 2012. Indoor air quality in Montréal area day-care centres, Canada. *Environmental Research* 118, 1-7.
- Sundell, J., 2004. On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air* 14, 51-58.
- tdicola, 2014. Library code for Adafruit's CC3000 WiFi breakouts & <http://www.adafruit.com/products/1469>.
- Texas-Instruments, 2012. TI SimpleLink™ CC3000 Module – Wi-Fi 802.11b/g Network Processor.
- Usha, S., Mendell, M.J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., Fisk, W.J., 2012. Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentrations on Human Decision-Making Performance. *Environmental Health Perspectives* 120, 7.
- Wallner, P., Munoz, U., Tappler, P., Wanka, A., Kundi, M., Shelton, J., Hutter, H.-P., 2015. Indoor Environmental Quality in Mechanically Ventilated, Energy-Efficient Buildings vs. Conventional Buildings. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12, 14132.
- Wang, L.K., Pereira, N.C., Hung, Y.T., 2005. *Advanced Air and Noise Pollution Control* Human Press.
- WHO, 2000. *Air Quality Guidelines*, Seconde ed.
- WHO, 2010. *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*.
- WHO, 2014. *Ambient (outdoor) air quality and health*.
- Wong, N.H., Feriadi, H., Lim, P.Y., Tham, K.W., Sekhar, C., Cheong, K.W., 2002. Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore. *Building and Environment* 37, 1267-1277.
- Zhang, Y., Xu, Y., 2004. A general model for analyzing single surface VOC emission characteristics from building materials and its application.

ANEXOS

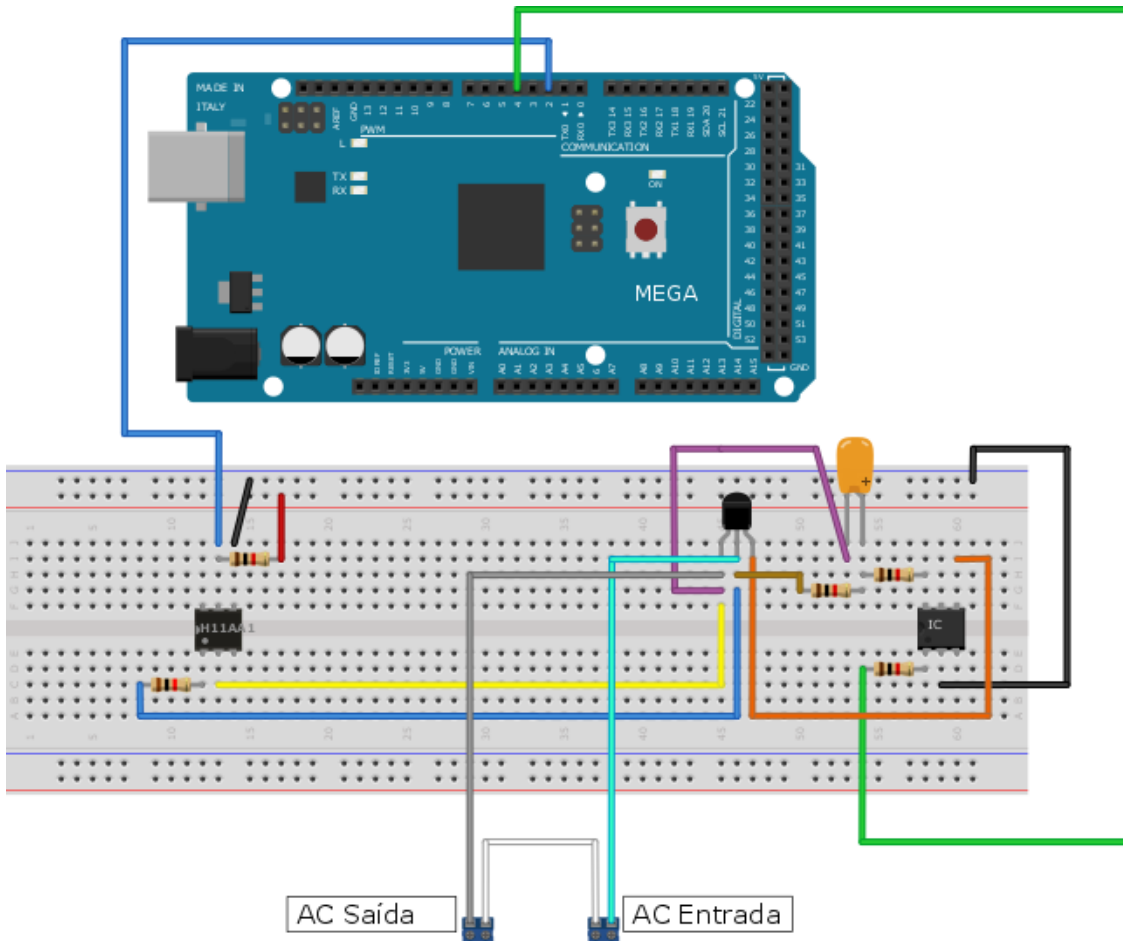
Anexo I

Esquema de Ligação dos sensores e placa *wireless*



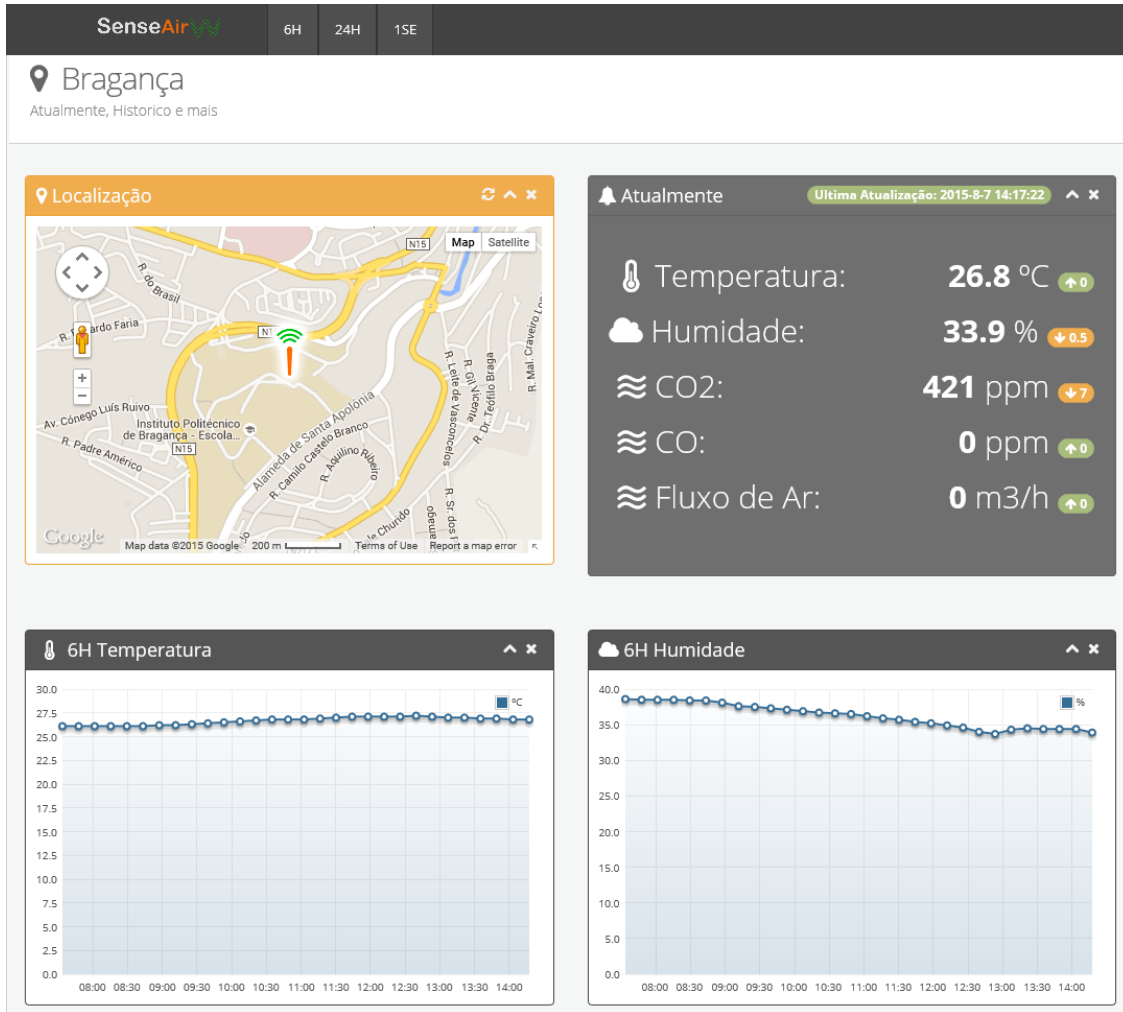
Anexo II

Esquema de ligação do sistema de controlo do ventilador



Anexo III

Página web



Anexo III

Código fonte Arduino

```
#include <TimerThree.h>
#include <Adafruit_CC3000.h>
#include <SPI.h>
#include <string.h>
#include "utility/debug.h"
#include "SoftwareSerial.h"
#include <LiquidCrystal.h>
#include <EEPROM.h>
#include <SHT1x.h>
#include <Time.h>
#include <avr/wdt.h>
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 6);
#define triacApin
int stateTriacA = 0;
int power; (...)

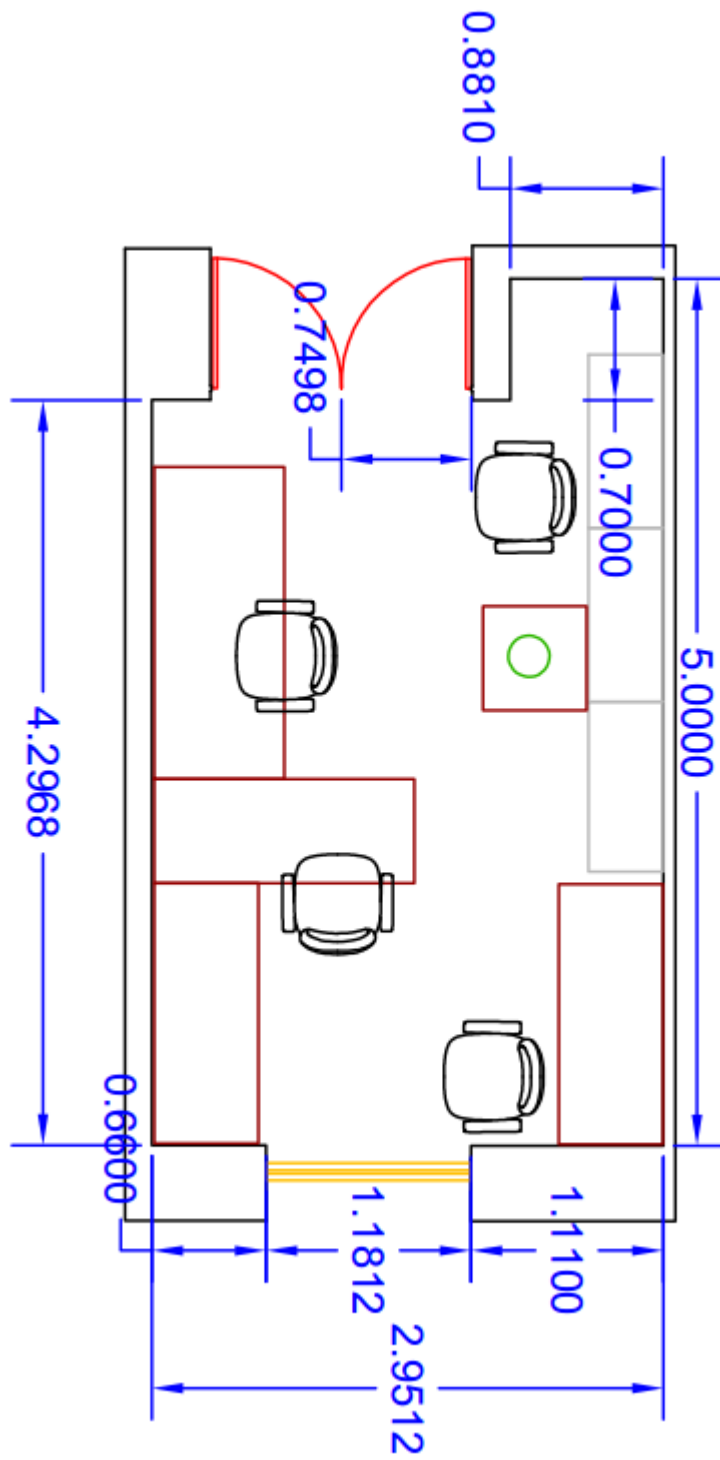
(...) lcd.setCursor(4, 0);
lcd.print(dioxidop);
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print("ppm");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("CO");
lcd.setCursor(4, 1);
lcd.print(cop);
lcd.setCursor(10, 1);
lcd.print("ppm");
}{...}
```

Anexo IV

Código fonte página web

```
(...) <!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
<meta http-equiv="refresh" content="960">
<meta http-equiv="content-type" content="text/html; charset=UTF-8">
<meta charset="utf-8">
<title>Qualidade do ar interior</title>
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0, maximum-
scale=1, user-scalable=no">
<meta name="description" content="">
<meta name="author" content="">
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="css/cloud-admin.css" >
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="css/themes/graphite.css" id="skin-switcher" >
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="css/responsive.css" > (...)

(...) $('#content').bind('resize', function(){
    makeCorsRequest("GET",
"http://api.carriots.com/devices/s@sam125.sam125/streams/?sort=at&order=-1");
});
</script>
<!-- /JAVASCRIPTS -->
</body>
<footer>
<div class="center"><a href="mailto:samuel_fernandes@me.com">Contacto</a></div>
</footer>
</html> (...)
```

Sala C

