

REVISTA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Volume 40 Nº Especial 2017

I Congresso Nacional das Escolas Superiores Agrárias

Bragança
2 e 3 de dezembro de 2015



SCAP

SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL

Revista de Ciências Agrárias

(Continuação, a partir de 1974, da Revista Agronómica, iniciada em 1903)

Publicada trimestralmente pela SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL (SCAP)

CORPO EDITORIAL/EDITORIAL BOARD

Director

Pedro Reis

Editor

Pedro Talhinhos

Editores-adjuntos

Ana Monteiro M. Lurdes Inácio

Mariana Mota

EDITORES ASSOCIADOS/ASSOCIATE EDITORS

Joaquim Quelhas dos Santos (ISA, UL, Lisboa; Coord.)

Afonso Martins (DBA, UTAD, Vila Real; Ciência do Solo, Gestão do Solo)

Ângelo Rodrigues (ESA, IPB, Bragança; Agricultura)

António Eduardo Leitão (ISA, UL, Lisboa; Agronomia Tropical)

António Fabião (ISA, UL, Lisboa; Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais)

António Monteiro (ISA, UL, Lisboa; Horticultura herbácea)

Carlos Alexandre (DGEO, ECT, UE, Évora; Solos)

Carlos Carmona Belo (INIAV, Santarém; Produção Animal)

Carlos M. Lopes (ISA, UL, Lisboa; Viticultura)

Celestina Pedras (UAIG, Faro; Recursos hídricos)

Cláudia Sanchez (INIAV, Alcobaça; Pós-colheita)

Cristina S. Oliveira (ISA, UL, Lisboa; Fruticultura)

Elisabete Figueiredo (ISA, UL, Lisboa; Proteção integrada)

Fernando Santos (DA, UTAD, Vila Real; Mecanização agrícola)

Generosa Teixeira (FF, UL, Lisboa; Plantas aromáticas)

Henrique Ribeiro (ISA, UL, Lisboa; Nutrição e fertilização)

Isabel Videira de Castro (INIAV, Oeiras; Microbiologia do solo)

João Pedro Luz (ESA, IPCB, Castelo Branco; Patologia Vegetal)

Isabel Miranda Calha (INIAV, Oeiras; Herbologia)

José Gomes Laranjo (UTAD, Vila Real; Castanheiro)

Leandra Rodrigues (CEBAL, Beja; Genómica Agronómica)

Leonor Silva Carvalho (UE, Évora; Economia Agrícola)

Luis Alfaro Cardoso (FMV, UL, Lisboa; Produção Animal Tropical)

Luís Leopoldo Silva (DER, UE, Évora; Hidráulica Agrícola)

Luísa Falcão e Cunha (ISA, UL, Lisboa; Produção Animal)

Manuel Madeira (ISA, UL, Lisboa; Ciências do solo)

Manuela Neves (ISA, UL, Lisboa; Matemática, Estatística, Teoria de Valores Extremos, Estimação e Inferência)

Manuela Veloso (INIAV, Oeiras; Recursos Genéticos)

Maria Odete Torres (ISA, UL, Lisboa; Pastagens e forragens)

Maribela Pestana (UAIG, Faro; Nutrição e fertilização)

Miguel Brito (ESA, IPVC, Viana do Castelo; Compostagem e fertilização)

Paula Scotti Afonso (INIAV, Oeiras; Fisiologia Vegetal)

Ricardo Boavida Ferreira (ISA, UL, Lisboa; Bioquímica e Fisiologia; Metabolitos bioativos)

Sociedade de Ciências Agrárias de Portugal (Triénio 2014 – 2016)

DIREÇÃO

Pedro Reis, *Presidente*

Ana Paula Ramos, *Vice-Presidente*

António Eduardo Leitão, *Secretário-Geral*

Carlos Pais, *Tesoureiro*

Fernando Pires da Costa, *Vogal*

Paula Soares, *Vogal*

M. Lurdes Inácio, *Vogal*

ASSEMBLEIA GERAL

Manuel Augusto Soares, *Presidente*

Ana Paula Moreira da Silva, *Vice-Presidente*

Maribela Pestana, *1º Secretário*

Guida Tralhão, *2º Secretário*

CONSELHO FISCAL

Jorge de Castro, *Presidente*

M. Leonor Carvalho, *Relator*

Filipe Sevinete Pinto, *Vogal*

Objetivos e âmbito A *Revista de Ciências Agrárias* publica artigos técnico-científicos e revisões bibliográficas, inéditos, no âmbito das Ciências Agrárias e afins, em línguas portuguesa, inglesa ou espanhola. A revista acolhe submissões de trabalhos realizados em qualquer parte do mundo e aceita originais de sócios e não sócios da SCAP. Os critérios de aceitação de manuscritos para publicação são a originalidade, relevância, rigor científico e clareza de apresentação.

Editor A *Revista de Ciências Agrárias* é publicada trimestralmente pela SOCIEDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS DE PORTUGAL (SCAP), Rua da Junqueira, n.º 299, 1300-338 Lisboa, Portugal | Tel. 213 633 719 | E-mail: secretariado@scap.pt | Web: www.scap.pt | NIF 502 241 551

Fontes de indexação SciELO, CAB International, latindex | Depósito Legal n.º 12507/98 | N.º ERC 118581

Impressão SEXTACOR – Soluções Gráficas, Lda. | www.sextacor.pt | **Capa:** Miguel Inácio | jmdebi@gmail.com

A submissão de trabalhos deverá ser encaminhada para revista@scap.pt, seguindo as instruções para apresentação indicadas no final da revista e no site da SCAP.

Distribuição A *Revista de Ciências Agrárias* é distribuída gratuitamente aos sócios da SCAP. Custo de cada exemplar 25€. Assinatura anual 80€.

Limitação de responsabilidade O conteúdo e as opiniões expressas nos artigos publicados são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

ISSN 0871-018 X (impressão) | ISSN 2183-041X (Online)

Monitorização e controlo de qualidade do ar interior em gabinetes de edifícios escolares

Monitoring and control indoor air quality in school offices

Samuel Fernandes¹, Getúlio Igrejas² e Manuel Feliciano¹

¹Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal

²Escola superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal

(*E-mail: msabenca@ipb.pt)

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA16192>

Recebido/received: 2016.12.22

Recebido em versão revista/received in revised form: 2017.03.08

Aceite/accepted: 2017.03.09

RESUMO

Um sistema de monitorização e controlo de Qualidade do Ar Interior (QAI) foi construído com o objetivo de testar a sua viabilidade como solução na melhoria de QAI em gabinetes de edifícios escolares. O sistema tem a capacidade de monitorizar as concentrações de CO₂, CO, humidade relativa e temperatura e integra um mecanismo de ventilação dinâmico capaz de regular os níveis de QAI em função dos níveis de CO e/ou CO₂. O sistema foi testado em três espaços distintos. Em cada espaço realizaram-se quatro ensaios de aproximadamente 8h cada, em condições de ventilação distintas – sem ventilação, com ventilação natural, com insuflação e com extração de ar. Nos dois primeiros ensaios, o sistema foi usado como monitor e nos dois últimos como monitor e controlador de QAI. Os testes realizados mostraram que os espaços estudados eram insuficientemente ventilados. Observou-se ainda que o sistema de monitorização, acoplado a um ventilador de caudal nominal de 93 m³.h⁻¹, permitiu manter as condições de ventilação dentro dos níveis que garantem uma boa QAI, sem requerer qualquer intervenção humana. Não foram identificadas diferenças substanciais entre a ventilação por insuflação e a realizada por extração, contudo a insuflação foi ligeiramente mais eficaz.

Palavras-chave: Dióxido de carbono, monóxido de carbono, monitorização, arduino, ventilação.

ABSTRACT

An Indoor Air Quality (IAQ) monitoring and control system was built and tested with the purpose of evaluating its viability as technical solution to improve the IAQ conditions within school workrooms. The system has the ability to monitor CO, CO₂, relative humidity and air temperature and also incorporates a dynamic ventilation mechanism able to regulate the IAQ levels as a function of CO and/or CO₂ levels. The system was tested in three separate and distinct spaces. In each space were performed four experiments over about an 8h workday each and under different ventilation conditions – without ventilation, with natural ventilation, air insufflation and air extraction. In the first two experiments, the system was just used as monitor and in the last two as IAQ monitor and controller. The experiments showed that the studied spaces were poorly ventilated. It was also shown that the built system coupled to a fan with a nominal flow rate of 93 m³.h⁻¹ was suitable for assuring enough ventilation to maintain adequate indoor air quality, without requiring any human intervention. No substantial differences between air insufflation and extraction were found, but air insufflation was slightly more effective.

Keywords: Carbon dioxide, carbon monoxide, monitoring, arduino, ventilation.

INTRODUÇÃO

A Qualidade do Ar Interior (QAI) observada em habitações, escritórios, escolas, creches, lares de idosos, hospitais ou outros edifícios públicos ou privados é um fator essencial e determinante para o conforto e o bem-estar dos utilizadores desses espaços. De facto, passamos grande parte do tempo das nossas vidas nestes locais, muitas vezes expostos a atmosferas pouco ou nada saudáveis (Farrow *et al.*, 1997; Dales *et al.*, 2008; Clausen *et al.*, 2009; Bluysen *et al.*, 2010; Frontczak *et al.*, 2012; Madureira *et al.*, 2015).

A realidade mostra que um vasto conjunto de substâncias nocivas para os seres vivos são emitidas a partir de materiais de construção, mobiliário, fumo do tabaco, queima de combustíveis fósseis, equipamentos diversos, entre outros (Gennaro *et al.*, 2015; Almeida *et al.*, 2016). Estes poluentes induzem o aparecimento de um amplo espectro de problemas de saúde, desde situações frequentes de desconforto e com interferência no desempenho cognitivo, associadas a exposições a atmosferas com substâncias libertadas pelo próprio metabolismo humano (e.g. bioodores, dióxido de carbono (CO₂)) (Usha *et al.*, 2012; Eide *et al.*, 2013; Melikov e Dzhartov, 2013), a situações mais graves que, em alguns casos, podem mesmo ser fatais (e.g. monóxido de carbono (CO)) (Samet *et al.*, 1988; Hardin *et al.*, 2003; Burroughs e Shirley, 2011; Chan *et al.*, 2015). A exposição a atmosferas interiores é uma das causas mais relevantes de morbidade e mortalidade, pelo que não surpreende que no início deste século a USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) e a SAB (*Science Advisory Board*) tenham colocado a poluição do ar interior entre os cinco principais riscos ambientais para a saúde pública (Zhang e Xu, 2004).

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 de UV germicida, deslocamento de ventilação, distribuição de ar aquecido, pressurização diferencial dos espaços, entre outras (Sherman, 2014; Chan *et al.*, 2015; Mendell *et al.*, 2015). 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 QAI 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 (e.g. o CO₂, pode ser uma excelente solução (Schell e Inthout, 2001).

O presente estudo teve por objetivo principal a construção e avaliação do funcionamento de um sistema de monitorização e controlo de QAI em espaços de trabalho escolares, de uma instituição de ensino de Bragança, com vista a constituir-se como uma solução técnica, fiável e económica, de avaliação e controlo da QAI de diferentes espaços.

MATERIAL E MÉTODOS

Sistema de monitorização e controlo de QAI

O sistema de monitorização e controlo de QAI integra diversos módulos/componentes, com funções distintas, mas que no seu todo permitem estabelecer uma malha de controlo do processo de QAI (ver Figura 1), dos quais se destacam:

- 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;
- 3) atuador que permite agir sobre o meio, de acordo com a decisão tomada pela unidade de controlo.

O sistema, através do seu bloco sensorial, possibilita a medição em contínuo de quatro parâmetros de QAI (CO₂, CO, humidade relativa e temperatura do ar). Os dados recolhidos são depois enviados para a unidade de processamento e controlo que avalia os valores observados das variáveis monitorizadas, por comparação com os valores pré-definidos (*setpoints*). A evolução desfavorável de uma destas variáveis face aos *setpoints* desencadeia uma

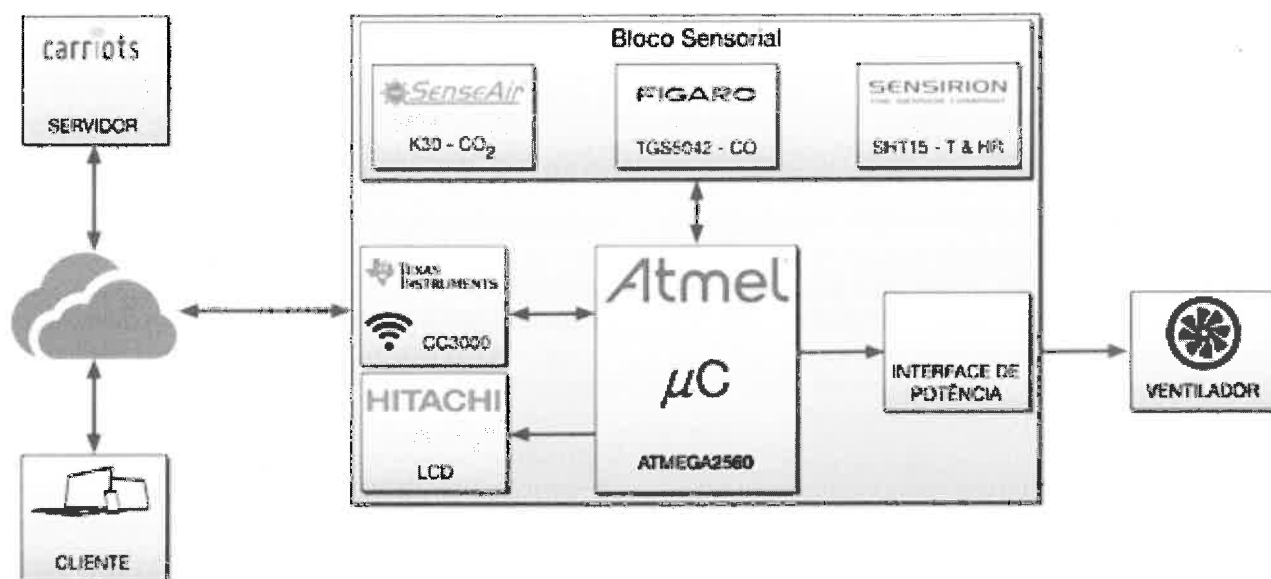


Figura 1 - Arquitetura do sistema de monitorização e controlo de qualidade do ar interior desenvolvido.

ação sobre um atuador, o ventilador, que permite extrair ou insuflar ar novo no espaço, 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.

O sistema oferece ainda a possibilidade de enviar em tempo real os dados recolhidos para um servidor *web*, permitindo o acesso remoto a toda a informação por parte do utilizador. O sistema dispõe também de um mecanismo de alertas que envia SMS (*Short Message Service*) para o telemóvel do utilizador e/ou avisos para a página *web*.

Descrição dos ensaios experimentais

Os ensaios experimentais foram desenhados para avaliar o comportamento do sistema construído quer como unidade de monitorização, quer como unidade capaz de controlar a evolução de parâmetros de QAI. Em resposta a este objetivo, foram realizados quatro ensaios distintos em três gabinetes (doravante identificados por sala A, sala B e sala C) com diferenças ao nível do volume, número de ocupantes, localização, entre outras características. As principais características desses espaços encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais características das salas de trabalho da instituição de ensino onde foram realizados os ensaios de QAI

Sala	Volume (m ³)	Área (m ²)	Ocupação típica (ocupantes)	Aberturas	
				N.º	Tipo
A	41,0	13,6	2	2	1 Janela e 1 porta
B	51,3	14,7	2	2	1 Janela e 1 porta
C	97,4	26,9	4	4	2 Janelas 1 porta e 1 guiché

O primeiro ensaio consistiu na monitorização de três dos parâmetros de QAI integrados no sistema de monitorização (dióxido de carbono, humidade e temperatura), sem recorrer a qualquer ventilação, a não ser a que resulta da infiltração através do invólucro dos espaços e da abertura de portas sempre que ocorria entrada e saída dos ocupantes ou de outras pessoas não afetas ao espaço. 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 n.º353-A/2013 de 4 de Dezembro para o CO₂ (1250 ppm) fosse excedido. Estabeleceu-se ainda que a abertura das janelas e/ou portas deveria ocorrer sempre que as concentrações de CO₂ atingissem o limiar de proteção referido e que o seu fecho ocorresse novamente após se alcançarem as concentrações de CO₂ de aproximadamente 900 ppm. Durante o ensaio nunca houve restrições em relação à entrada e à saída dos ocupantes.

Nos ensaios três e quatro, o objetivo central foi avaliar o funcionamento do sistema desenvolvido na qualidade de controlador dos níveis de QAI e, adicionalmente, as diferenças entre o efeito da ventilação mecânica simples por insuflação e por extração de ar. Durante a realização destes dois ensaios com ventilação mecânica procurou-se que a ventilação natural fosse apenas a correspondente à infiltração (i.e., como no primeiro ensaio), pelo que a abertura de portas ocorreu apenas com a entrada e saída dos ocupantes.

Em ambos os casos, o ventilador operou de uma forma dinâmica em função da concentração de CO₂, de acordo com o seguinte protocolo de operação: o ventilador era acionado, a uma velocidade moderada, sempre que a concentração de dióxido de carbono atingia as 1000 ppm; acima de 1295 ppm de CO₂, o ventilador operava à sua velocidade nominal, insuflando ou extraíndo um caudal de aproximadamente 98 m³.h⁻¹; Com os níveis de CO₂ compreendidos entre as 1000 ppm e as 1295 ppm, o ventilador funcionava a velocidade variável definida por uma relação linear em função dos níveis de CO₂; O ventilador era desligado com a redução de CO₂ para níveis inferiores a 900 ppm.

Importa ainda referir que os ensaios tiveram a duração de 8 h cada e foram realizados nos meses de junho e julho de 2015, em períodos com condições atmosféricas características dos meses de verão na região de Bragança (Gonçalves *et al.*, 2014): na Sala A de 17 a 19 e 22 de junho; na Sala B nos dias 25 e 26 junho e 1 e 2 de julho; na Sala C de 9 a 12 de junho.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 observam-se alguns dos resultados dos ensaios realizados para um dos espaços estudados (Sala B). Em particular, apresenta-se a evolução temporal dos níveis de CO₂, do número de ocupantes, da temperatura do ar no interior da sala e no exterior do edifício e ainda do fluxo de ar insuflado e extraído mecanicamente.

Como se pode ver pela análise da Figura 2, os resultados obtidos nos ensaios realizados na ausência de ventilação reforçam a relevância deste estudo, ao mostrarem inequivocamente que os níveis de CO₂ tendem a ultrapassar, com relativa facilidade, o limiar de proteção legal estabelecido para este constituinte (Portaria n.º353-A/2013 de 4 de dezembro). Concentrações de CO₂ acima de 1250 ppm indicam a existência de ventilação insuficiente e, além disso, podem apresentar efeitos adversos no Homem a nível do desempenho físico e psicológico (OMS, 2010; Usha *et al.*, 2012; Fisk, 2014; Allen *et al.*, 2015). Esta situação ganha contornos mais críticos pelo facto de ocorrer com um baixo número de ocupantes e estar-se perante condições de ventilação que são as que prevalecem ao longo do ano, numa grande parte de espaços desta tipologia.

Nos ensaios com ventilação natural voluntária verificou-se uma redução generalizada dos níveis de CO₂ em todos os espaços, demonstrando que a abertura de janelas e portas tem um efeito muito positivo na diluição dos níveis de CO₂ e de outros contaminantes que possam estar presentes na atmosfera interior. Como se pode ver novamente na Figura 2, os níveis de CO₂ na sala B oscilaram entre 536 e 1353 ppm, tendo-se obtido um valor médio de 954 ppm. Esta redução global dos níveis deve-se à abertura de uma pequena janela e da porta da sala colocada no lado oposto (ventilação cruzada) que proporcionou uma renovação adequada do

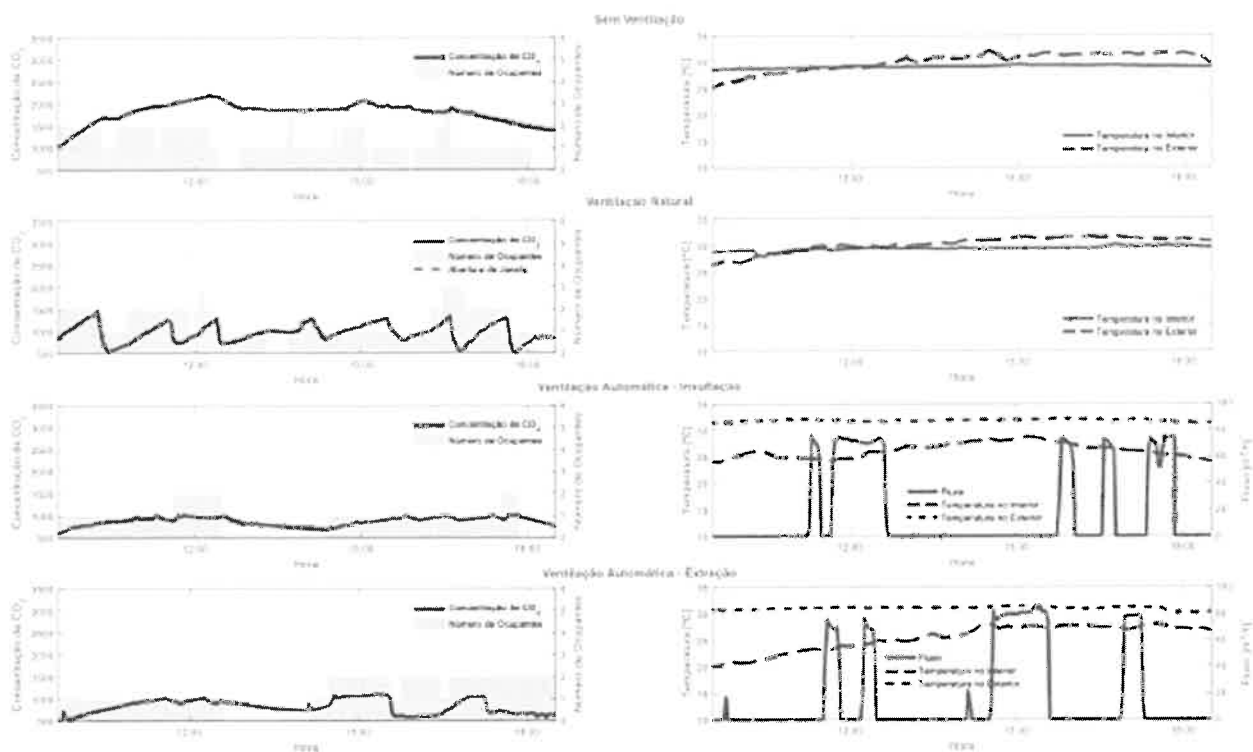


Figura 2 - Evolução do número de ocupantes, da concentração de CO₂, da temperatura interior e exterior, do fluxo de ar insuflado e extraído para as quatro diferentes tipologias de ensaios realizados na sala B do IPB, em julho de 2015.

ar interior. Além disso, a ventilação do espaço introduziu um padrão de variação muito distinto do registado no ensaio sem ventilação, no qual as subidas dos níveis de CO₂, registadas na presença de ocupantes e nas condições de ventilação similares às do ensaio sem ventilação, contrastam com as descidas acentuadas que resultam da abertura da janela e da porta. Nas outras salas o efeito de diluição não foi tão pronunciado pelo facto de se proceder apenas à abertura de uma pequena janela (ventilação unilateral). A maior eficiência da ventilação cruzada face à ventilação unilateral tem sido comprovada e referida em vários estudos (e.g. Allocca *et al.*, 2003; Sousa *et al.*, 2012; Barnes, 2014; Mao *et al.*, 2015; Sharpe *et al.*, 2015).

No que concerne aos ensaios com recurso à ventilação mecânica simples, por insuflação e extração de ar, foi possível também constatar que o sistema construído pode ser usado com sucesso no controlo da QAI, sem necessitar de qualquer intervenção humana. De um modo geral, a ventilação mecânica por insuflação de ar permitiu controlar de forma mais precisa os níveis de CO₂, evitando a

ocorrência de variações acentuadas e aumentos dos níveis instantâneos de CO₂ acima das 1250 ppm. A ventilação mecânica com extração de ar assegurou desempenhos de ventilação similares aos observados para a insuflação de ar, porém com a extração de ar os níveis instantâneos de CO₂ ultrapassaram em alguns momentos o *setpoint* de 1250 ppm. 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, este resultado encontra-se dentro do expectável, dado que a insuflação introduz ar novo com uma concentração de CO₂ usualmente abaixo dos 400-500 ppm de CO₂ (sobretudo em regiões com níveis baixos de poluição atmosférica) enquanto em situações de extração, o ar extraído do compartimento que está sob controlo é substituído por ar proveniente

de outros espaços interiores, com concentrações de CO₂ mais elevadas do que as prevalentes no ar exterior.

No que concerne à influência sobre a temperatura do ar interior, verificou-se que esta não sofreu variações dignas de registo em qualquer um dos ensaios realizados. 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 impacto 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. Minimizar as variações de temperatura no interior dos edifícios é crucial para o aumento da eficiência energética e do conforto térmico humano (Ahmed *et al.*, 2015; Mandayo *et al.*, 2015). 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 de, 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 pode acontecer um efeito oposto, devido às diferenças entre o ar exterior e o ar interior quer em termos térmicos quer em termos de humidade.

CONCLUSÕES

A QAI é um fator de 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. 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 QAI autónomo, fácil de instalar, robusto e suficientemente fiável e com um custo significativamente inferior aos dispositivos comercializados atualmente com funcionalidades semelhantes.

De um modo geral, o monitor de QAI permite a recolha de informação lida pelos sensores de CO₂, CO, 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 por um período temporal de um ano (na sua versão gratuita) e que usa estratégias de redundância que garantem a salvaguarda dos dados. 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.

Os ensaios realizados, 12 no total, permitiram confirmar que os espaços da tipologia estudada são deficientemente ventilados e, portanto, com forte potencial para prejudicarem a saúde dos seus ocupantes. Constatou-se ainda que a ventilação natural, por abertura de janelas e/ou portas, e a ventilação mecânica simples são duas formas capazes de melhorar a QAI. No entanto, a ventilação natural poderá apresentar variações de temperatura causando desconforto e um maior consumo energético nos meses mais frios. A ventilação mecânica simples tem a vantagem de não requerer qualquer intervenção dos ocupantes, não necessitar de um diferencial térmico entre o ambiente interior e exterior para movimentar massas de ar, estabilizar as concentrações de CO₂ no nível pretendido e permitir controlar o fluxo de ar insuflado/extraído.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT, Portugal) e ao FEDER no âmbito do programa PT2020 pelo apoio financeiro ao CIMO (UID/AGR/00690/2013). Os autores agradecem também aos ocupantes dos espaços onde se desenvolveram os ensaios experimentais pela disponibilidade e colaboração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, K.; Kurnitski, J. & Sormunen, P. (2015) – Demand controlled ventilation indoor climate and energy performance in a high performance building with air flow rate controlled chilled beams. *Energy and Buildings*, vol. 109, p. 115-126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.052>
- Allen, J.G.; MacNaughton, P.; Satish, U.; Santanam, S.; Vallarino, J. & Spengler, J.D. (2016) – Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environmental Health & Perspectives*, vol. 124, n. 6, p. 805-812. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Allocca, C.; Chen, Q. & Glicksman, L.R. (2003) – Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings*, vol. 35, n. 8, p. 785-795. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6)
- Almeida, S. M.; Faria, T.; Saraga, D.; Maggos, T.; Wolterbeek, H.T. & Almeida, S.M. (2016) – Source apportionment of indoor PM10 in Elderly Care Centre. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, n. 8, p. 7814-7827. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5937-x>
- Barnes, B.R. (2014) – Behavioural change, indoor air pollution and child respiratory health in developing countries: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 11, n. 5, p. 4607-4618. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph110504607>
- 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*, vol. 2, n. 2, p. 98-115. <http://dx.doi.org/10.3763/inbi.2010.0022>
- Burroughs, H.E. & Shirley, J.H. (2011) – *Managing indoor air Quality*, fifth edition, Lilburn, Fairmont Press, 350 p.
- 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*, vol. 123, n. 10, p. 951-958. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408125>
- 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. In: *Proceedings of Healthy Buildings 2009*, Syracuse, p. 603.
- Dales, R.; Liu, L.; Wheeler, A.J. & Gilbert, N.L. (2008) – Quality of indoor residential air and health. *Canadian Medical Association Journal*, vol. 179, n. 2, p. 147-152. <http://dx.doi.org/10.1503/cmaj.070359>
- 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? *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 13, p. 4183-4201. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-13-4183-2013>
- Farrow, A.; Taylor, H. & Golding, J. (1997) – Time spent in the home by different family members. *Environmental Technology*, vol. 18, n. 6, p. 605-613. <http://dx.doi.org/10.1080/09593331808616578>
- Fisk, W.J. (2014) – Is CO₂ an Indoor Pollutant? Higher Levels of CO₂ May Diminish Decision Making Performance. *ASHRAE JOURNAL*, vol. 55, n. 3, p. 84-85, March 2013. Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL-6148E. <http://escholarship.org/uc/item/6gm6t5zc>
- 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*, vol. 22, n. 2, p. 119-131. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00745.x>
- Gennaro, G.; Dambruoso, P.; Di Gilio, A.; Di Palma, V.; Marzocca, A. & Tutino, M. (2015) – Discontinuous and Continuous indoor air quality monitoring in homes with fireplaces or wood stoves as heating system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13, n. 1, p. 78. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph13010078>
- Gonçalves, A.J.; Ribeiro, A.C.; Maia, F. & Feliciano, M. (2014) – *Análise do Clima Urbano da Cidade de Bragança*. Instituto Politécnico de Bragança, 54 p.

- Hardin, T.; Hall, R. & Ellis, R. (2003) – *School indoor air quality best management practices manual*. The Washington State Department of Health, 126 p.
- 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*, vol. 78, n. 13-14, p. 915-930. <http://dx.doi.org/10.1080/15287394.2015.1048926>
- Mandayo, G.G.; Gonzalez-Chavarri, J.; Hammes, E.; Newton, H.; Castro-Hurtado, I.; Ayerdi, I.; Knapp, H.; Sweetman, A.; Hewitt, C.N. & Castaño, E. (2015) – System to control indoor air quality in energy efficient buildings. *Urban Climate*, vol. 14, n. 3, p. 475-485. <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.10.009>
- Mao, J.; Yang, W. & Gao, N. (2015) – The transport of gaseous pollutants due to stack and wind effect in high-rise residential buildings. *Building and Environment*, vol. 94, n. 2, p. 543-557. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.10.012>
- Melikov, A.K. & Dzhartov, V. (2013) – Advanced air distribution for minimizing airborne cross-infection in aircraft cabins. *HVAC&R Research*, vol. 19, n. 8, p. 926-933. <http://dx.doi.org/10.1080/10789669.2013.818468>
- 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*, vol. 26, n. 4, p. 546-557. <http://dx.doi.org/10.1111/ina.12241>
- OMS (2010) – *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. World Health Organization Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark., 456 p.
- 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*, vol. 137, n. 1, p. 221-242. <http://dx.doi.org/10.1164/ajrccm/137.1.221>
- Schell, M. & Inthout, D. (2001) – Demand control ventilation using CO₂. *ASHRAE Journal*, Feb. 2001, p. 1-6.
- Sharpe, T.; Farren, P.; Howieson, S.; Tuohy, P. & McQuillan, J. (2015) – Occupant interactions and effectiveness of natural ventilation strategies in contemporary new housing in Scotland, UK. *International journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12, n. 7, p. 8480-8497. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph120708480>
- Sherman, M.H. (2014) – Impacts of contaminant storage on indoor air quality: model development. *Atmospheric Environment*, vol. 72, p. 41-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.027>
- 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*, vol. 12, art. 435. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2458-12-435>
- 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*, vol. 120, n. 12, p. 1671-1677. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Zhang, Y. & Xu, Y. (2004) – A general model for analyzing single surface VOC emission characteristics from building materials and its application. *Atmospheric Environment*, vol. 38, n. 1, p. 113-119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.09.020>