

FILTRO DE KALMAN PARA A DETERMINAÇÃO DA RENOVAÇÃO DO AR NUM ESPAÇO OCUPADO DE MODO INTERMITENTE E VENTILADO NATURALMENTE

Rogério Duarte^{1*}, Maria da Glória Gomes² e António Moret Rodrigues²

1: CINEA, IPS – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761, Setúbal, e-mail: rogerio.duarte@estsetubal.ips.pt

2: CERis, ICIST, DECivil, IST - Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Portugal

Resumo *É reconhecido o mérito da ventilação natural de edifícios residenciais e de serviços não só do ponto de vista da poupança energética como também da qualidade do ar interior. Contudo, para projetistas e gestores de edifícios, a incerteza associada à ventilação natural introduz dificuldades e riscos acrescidos. Neste artigo apresenta-se um método para determinar renovações de ar em condições não-estacionárias, como as que se observam em espaços ocupados de modo intermitente, sujeitos a variações no ambiente exterior (e no interior) e na forma como são operados os dispositivos de ventilação natural. O método usa dados de ocupação e de concentração interior de CO₂ em conjunto com um Filtro de Kalman para estimar variações dos caudais de ventilação. Após aplicação deste método a uma sala de aula ventilada por abertura manual de janelas, discute-se a utilidade do método para o reconhecimento por projetistas e gestores de edifícios do mérito da ventilação natural.*

Palavras-chave: Ventilação natural, Qualidade do ar interior, Filtro de Kalman.

FILTRO DE KALMAN PARA A DETERMINAÇÃO DA RENOVAÇÃO DO AR NUM ESPAÇO OCUPADO DE MODO INTERMITENTE E VENTILADO NATURALMENTE

Rogério Duarte^{1*}, Maria da Glória Gomes² e António Moret Rodrigues²

1: CINEA, IPS – Escola Superior de Tecnologia de Setúbal, Campus do IPS, Estefanilha, 2910-761, Setúbal, e-mail: rogerio.duarte@estsetubal.ips.pt

2: CERis, ICIST, DECivil, IST - Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Portugal

Resumo *É reconhecido o mérito da ventilação natural de edifícios residenciais e de serviços não só do ponto de vista da poupança energética como também da qualidade do ar interior. Contudo, para projetistas e gestores de edifícios, a incerteza associada à ventilação natural introduz dificuldades e riscos acrescidos. Neste artigo apresenta-se um método para determinar renovações de ar em condições não-estacionárias, como as que se observam em espaços ocupados de modo intermitente, sujeitos a variações no ambiente exterior (e no interior) e na forma como são operados os dispositivos de ventilação natural. O método usa dados de ocupação e de concentração interior de CO₂ em conjunto com um Filtro de Kalman para estimar variações dos caudais de ventilação. Após aplicação deste método a uma sala de aula ventilada por abertura manual de janelas, discute-se a utilidade do método para o reconhecimento por projetistas e gestores de edifícios do mérito da ventilação natural.*

Palavras-chave: Ventilação natural, Qualidade do ar interior, Filtro de Kalman.

1. INTRODUÇÃO

A determinação de caudais de renovação de ar é habitualmente conseguida pela monitorização da concentração de um gás traçador e aplicação das normas ASTM E741-00:2006 e EN ISO 12569:2000 [1, 2]. Estas normas pressupõem a existência de condições estacionárias e, por isso, a sua aplicação em espaços ocupados de modo intermitente é dificultada. As dificuldades aumentam ainda quando se trata de investigar a ventilação natural cuja natureza estocástica impõe uma permanente variação nos caudais de ventilação.

Quando se estuda a ventilação em salas ocupadas, o CO₂ exalado pelos ocupantes é normalmente o gás traçador usado [3]. Conhecendo a ocupação (a produção de CO₂), a concentração no ar interior e exterior de CO₂, é possível determinar os caudais de ventilação a partir da equação,

$$\frac{dc(t)}{dt} = -n(t)c(t) + \frac{Q^c(t)}{V}, \quad (1)$$

com,

c a concentração relativa (à concentração no ar exterior) de CO₂ [ppm];

n a renovação de ar na sala [s⁻¹];

Q^c a geração de CO₂ metabólico na sala [cm³/s];

V o volume da sala [m³];

t o tempo [s].

Para obter valores de n a partir da Eq. (1), após integração, verifica-se qual o valor n que, no sentido dos mínimos quadrados, apresenta o melhor ajuste aos dados de concentração de CO₂ no ambiente e de produção de CO₂ metabólico (ocupação). Este método tem sido empregue em estudos que envolvem a determinação de caudais de ventilação em espaços com ocupação intermitente [4,5,6]; sucede, porém, que as leituras de concentração de CO₂ no ambiente apresentam ruído de alta frequência e, se o intervalo de integração temporal Δt considerado for reduzido, esse ruído “contamina” as estimativas de n . Para evitar esta

contaminação podem usar-se intervalos de integração mais largos, ou filtrar previamente as leituras de concentração de CO₂. Estas soluções pecam, contudo, pela arbitrariedade na escolha de Δt ou das características do filtro, deixando nas mãos do investigador a decisão subjetiva do que é informação relevante e do que é ruído.

Como facilmente se compreende, as dificuldades que resultam da presença de ruído nas medições agravam-se para o estudo da ventilação natural, face à natureza estocástica da velocidade do vento, da temperatura exterior e face à utilização errática de dispositivos de ventilação (janelas, portas) por parte dos ocupantes. Esta incerteza que se associa à ventilação natural, por um lado, e a dificuldade em determinar os caudais de renovação de ar, por outro, estão seguramente na base da desconfiança com que projetistas encaram soluções tradicionais de ventilação.

Apesar da complexidade da análise da ventilação natural, existem métodos de cálculo que, considerando a natureza estocástica dos fenómenos físicos permitem filtrar o ruído sem perder a capacidade de acompanhar (*track*) variações súbitas na tendência dos sinais em análise. O Filtro de Kalman é um destes métodos, que tem aplicações em domínios tão variados como a navegação, processamento de imagem ou finanças e que também pode ser usado para identificar a renovação de ar que minimiza o resíduo/ erro nas concentrações de CO₂ no ambiente atendendo a valores de ocupação.

O objetivo deste artigo é precisamente a descrição de um Filtro de Kalman para a determinação da renovação do ar num espaço ocupado de modo intermitente e ventilado naturalmente. Por ser um método de fácil implementação, pensa-se que pode contribuir para um conhecimento mais aprofundado da ventilação natural e, conseqüentemente, promover o uso desta forma tradicional de ventilar junto de projetistas e de gestores de edifícios.

O artigo começa por discutir o Filtro de Kalman. De seguida apresenta o método de estudo, sendo colocado o enfoque na descrição do estudo de caso. Apresentam-se resultados obtidos com o Filtro de Kalman para dois dias de monitorização, discutindo-se o desempenho do filtro. Finaliza-se o artigo com a análise da importância de conhecer a renovação de ar em espaços ventilados naturalmente e do impacto que tem para o reconhecimento por projetistas e gestores de edifícios do mérito da ventilação natural.

2. O FILTRO DE KALMAN

Para a aplicação do Filtro de Kalman ao problema da ventilação natural parte-se do seguinte conjunto de equações,

$$\begin{cases} \frac{dc(t)}{dt} = -n(t)c(t) + \frac{Q^c(t)}{V} + \gamma(t) \\ c^+ = c + e(t) \end{cases} \quad (2a)$$

$$(2b)$$

Na Eq. (2a) considera-se a existência de um termo de ruído branco $\gamma(t)$ que representa a incerteza na modelação do processo físico. Na Eq. (2b) considera-se a existência de ruído branco $e(t)$ associado à medição da concentração interior de CO₂, que está na origem da distinção entre c , a concentração verdadeira, e c^+ , a concentração “contaminada” gerada pelo sensor.

Uma vez que o Filtro de Kalman utilizado é discreto, a Eq. (2a) é previamente discretizada no tempo, assumindo-se a retenção de ordem zero (*zero-order hold*) para caudais de ventilação e geração de CO₂ metabólico em cada intervalo Δt , obtendo-se o seguinte sistema de equações recursivas,

$$\begin{cases} c_k = g_{k-1}c_{k-1} + h_{k-1}Q_{k-1}^c + \omega_{k,k-1} \\ c_k^+ = c_k + e_k \end{cases}, \quad (3)$$

com os índices k e $k - 1$ representando os instantes $k\Delta t$ e $(k - 1)\Delta t$, respetivamente, e $k \in \mathbb{N}$, e ainda com

$$g_{k-1} = \exp(-n_{k-1} \Delta t), \quad (4)$$

$$h_{k-1} = \frac{1}{V n_{k-1}} [1 - \exp(-n_{k-1} \Delta t)], \quad (5)$$

e

$$\omega_{k,k-1} = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} \exp[-n_{k-1} (k\Delta t - \tau)] \gamma(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Como explicado em [7], assumindo $dW(\tau) = \gamma(\tau)d\tau$, com $W(\tau)$ um processo de Wiener, $\omega_{k,k-1}$ é ruído branco com distribuição normal sendo a sua média zero e a covariância $R_{k,k-1}$; ou seja, $\omega_{k,k-1} \sim N(0, R_{k,k-1})$. Quanto ao erro de medição, admite-se a ausência de erros sistemáticos, logo, considera-se de modo análogo ao erro de processo acima, $e_k \sim N(0, T_k)$, com T_k a magnitude da covariância do erro.

Note-se que na Eq. (3) c_k é uma grandeza não observada; são os valores com ruído c_k^+ que são conhecidos. Por seu turno, também os valores de n_k não são conhecidos. Definido c e n como variáveis de estado não-observadas, Q^c como o input do sistema e c^+ como o output do sistema/ processo em análise (V é uma constante), define-se a seguinte representação no espaço de estados da dinâmica da ventilação numa sala,

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{F}_{k,k-1}(\mathbf{x}_{k-1}, Q_{k-1}^c) + \mathbf{v}_{k,k-1} \\ y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + e_k \end{cases} \quad (7)$$

com

$\mathbf{x}_{k-1} = (c_{k-1}, n_{k-1})^T$ o vetor de estado (o índice superior T representa a operação transposição);
 $\mathbf{F}_{k,k-1} = (g_{k-1}c_{k-1} + h_{k-1}Q_{k-1}^c, n_{k-1})^T$ o vetor que representa a dinâmica da ventilação na sala e que justifica a evolução da concentração de CO₂ interior entre os instantes $k-1$ e k ;
 $\mathbf{v}_{k-1} = (\omega_{k,k-1}, \zeta_{k,k-1})^T$ o vetor que representa os ruídos brancos associados à concentração interior de CO₂, c , e à renovação de ar n , e sendo $\zeta_{k,k-1} \sim N(0, U_{k,k-1})$ o ruído branco de distribuição normal com média zero e covariância $U_{k,k-1}$;
 y_k o output do sistema, igual a c_k^+ , e;
 $\mathbf{H}_k = (1, 0)$ o vetor linha que transforma o espaço de estados \mathbf{x}_k no espaço de medições (neste caso, apenas y_k).

A expressão para o vetor do espaço de estados \mathbf{x}_k na Eq. (7) é não-linear, mas usando os primeiros termos da expansão em série de Taylor de $\mathbf{F}_{k,k-1}$ torna-se possível [8] representar a dinâmica da ventilação numa sala como um problema de identificação da renovação variável de ar n e da concentração de CO₂, c .

O Filtro de Kalman—porque se trata aqui de um problema não-linear, na realidade, um Filtro de Kalman Estendido (Extended Kalman Filter)—é comumente empregue na resolução de problemas de identificação de sistemas análogos aquele em análise e permite minimizar o erro entre as medições c_k^+ e a variável de output y_k obtida da Eq. (7). Ao mesmo tempo que atinge este objetivo, o Filtro de Kalman permite a determinação das variáveis de estado não-observadas; a concentração interior de CO₂ sem erro de medição, c_k , e o objetivo principal deste estudo, a renovação de ar na zona, n_k .

Pormenores sobre o algoritmo que implementa o Filtro de Kalman são apresentados em inúmeros trabalhos [7, 8], aqui refere-se de modo muito sumário que subjacente ao algoritmo está a previsão, com base na Eq. (7), do vetor espaço de estados no instante k usando apenas medições realizadas até ao instante anterior, $k-1$ —esta previsão é representada por $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$, sendo reforçado o facto do modelo produzir estimativas com o acento circunflexo sobre a variável. Seguidamente, com base na medição real das concentrações interiores de CO₂ no instante k , c_k^+ , é feita a correção da estimativa $\hat{y}_{k|k-1} = \hat{c}_{k|k-1}^+$ a partir da expressão

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \varepsilon_k, \quad (8)$$

com,

$\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ o vetor do espaço de estados corrigido com a medição realizada no instante k ;

\mathbf{K}_k o ganho de Kalman, e;

$\varepsilon_k = c_k^+ - \hat{y}_{k|k-1}$ o resíduo/ erro que se pretende minimizar entre concentração medida e a estimativa obtida com o Filtro de Kalman.

3. MÉTODO

Implementou-se numericamente o Filtro de Kalman [9] e realizaram-se testes cuja descrição será objeto de uma outra comunicação. Tendo-se concluído que o método identificava os valores de renovação de ar nos casos de teste considerados, prosseguiu-se com a análise de uma aplicação do método a um estudo de caso (descrito em maior detalhe na subsecção seguinte). Os resultados de renovação e ar obtidos foram confrontados com os dados de ocupação, de concentração de CO₂ ambiente e analisados à luz das condições do ambiente exterior.

3.1. Estudo de caso

O método apresentado neste artigo aplica-se a unizonas ventiladas com 100% de ar novo. Esta situação é muito comum em salas de aula de edifícios escolares que, tradicionalmente, são ventiladas naturalmente com abertura manual de janelas e portas. O estudo de caso selecionado considera precisamente uma sala de aula de uma escola secundária do ensino público português, localizada em Lisboa. Esta sala e a ventilação no edifício foi objeto de uma análise recente [10].

Resumidamente, trata-se de uma sala de aula de um edifício escolar construído na década de 40 do século XX para uma ocupação de 1000 alunos. Com construção pesada, a sala de aula é orientada a sul, tem um volume de 162 m³ (9×6×3) e possui uma área envidraçada de aproximadamente 30% da parede exterior, com janelas pivotantes (eixo horizontal) e vidro duplo. As salas de aula são dimensionadas para uma ocupação de 25 estudantes, não sendo no período analisado servidas por sistemas ativos de aquecimento ou arrefecimento.

A ventilação da sala é predominantemente unilateral por abertura manual das três janelas localizadas na parede exterior sul; podendo, no entanto, observar-se ventilação cruzada através de uma abertura para ventilação na parede interior, que comunica com um corredor interno orientado a norte (ver [10]). Na Figura 1 apresenta-se uma fotografia da sala de aula.



Figura 1. A sala de aula monitorizada.

A sala de aula foi monitorizada, tendo-se registado valores de temperatura do ar e concentração interior de CO₂ [11]. Em simultâneo, consultaram-se os sumários de todas as aulas ocorridas obtendo-se os registos de

assiduidade e nível de escolaridade lecionado (do 5º ao 12º ano). Com base nestes registos e em valores médios de peso e altura de estudantes do sexo masculino e feminino frequentando os diferentes níveis de escolaridade, obteve-se [12] a produção metabólica de CO_2 nos períodos em que a sala esteve ocupada.

Paralelamente, uma estação meteorológica Davis Vantage Pro2 [13] registou as condições exteriores de temperatura e humidade do ar, velocidade e direção do vento e radiação global num plano horizontal.

Na Figura 2 apresentam-se, para os dois dias analisados (4 e 5 de junho de 2013), os registos de concentração absoluta interior de CO_2 , $C_{\text{monit}}^+ = c^+ + C_{\text{out}}$ (com C_{out} a concentração atmosférica de CO_2 , fixa em 395 ppm), e ocupação, N_{monit} . Apresentam-se ainda diferenças entre temperaturas interior e exterior, $T_{\text{in}} - T_{\text{out}}$, e velocidade do vento, WS , parâmetros relevantes na avaliação crítica das estimativas de renovações de ar apresentadas adiante.

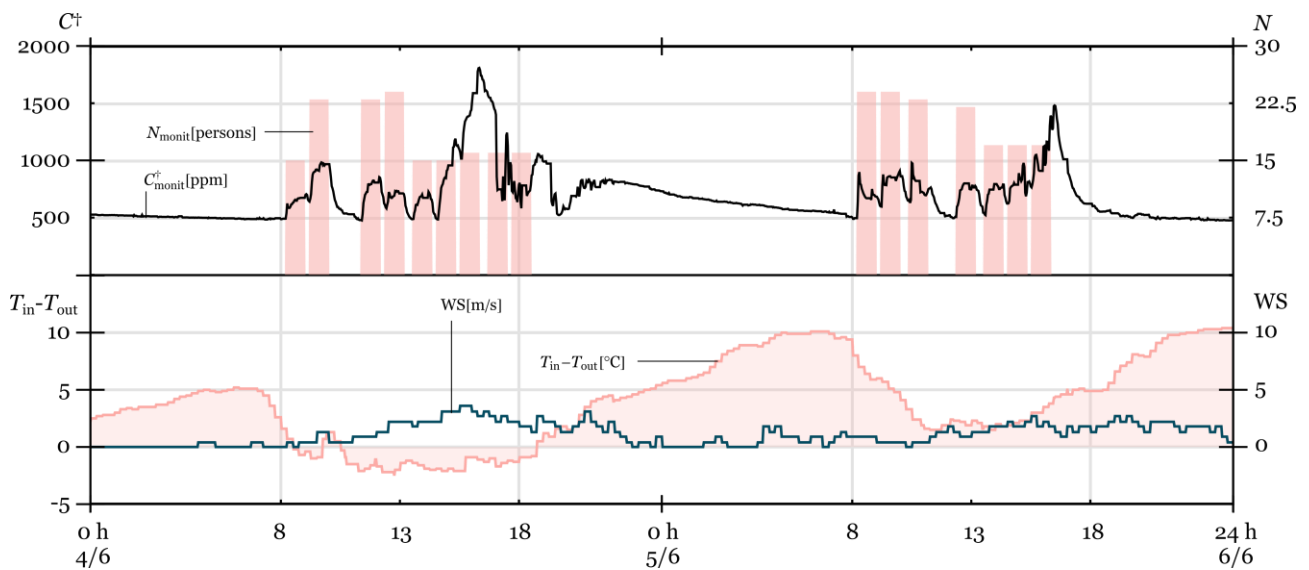


Figura 2. Dados de monitorização: N_{monit} , ocupação; C_{monit}^+ , valor monitorizado de concentração de CO_2 no ambiente interior; WS , velocidade do vento; $T_{\text{in}} - T_{\text{out}}$, diferença entre temperatura interior e exterior. A temperatura interior foi em média 25°C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 apresentam-se estimativas de concentração absoluta interior de CO_2 , $C_{\text{KF}} = \hat{c} + C_{\text{out}}$ (que não incluem ruído de medição) obtidas com o Filtro de Kalman. Para facilitar a análise destas estimativas, repete-se a representação das medições C_{monit}^+ . Adicionalmente, a Figura 3 apresenta estimativas de caudais de ar novo por ocupante, Q_{KF} , expressas em $\text{m}^3/\text{s}/\text{pessoa}$ e determinadas a partir das estimativas de renovação de ar, $\hat{n}_{k|k}$, e de valores de ocupação, N_k , pela expressão,

$$Q_{\text{KF},k} = \frac{n_{k|k}V}{N_k}. \quad (9)$$

Para facilitar a discussão dos resultados acrescentam-se na Figura 3 dados de ocupação, N_{monit} .

A observação dos resultados de concentração interior de CO_2 permite concluir que, para o período de aulas, existe uma boa concordância entre os resultados obtidos com o Filtro de Kalman (identificados com “KF”) e os experimentais (identificados com “monit”). As diferenças mais significativas nos valores de concentração interior de CO_2 ocorrem fora do período de aulas. Com efeito, com o Filtro de Kalman atribui-se uma ocupação nula no período noturno, ao passo que na realidade a sala é ocupada para limpezas, para realização de reuniões ou porque ocorrem aulas noturnas, justificando-se deste modo o incremento nas medições de concentração de CO_2 depois das 18h30.

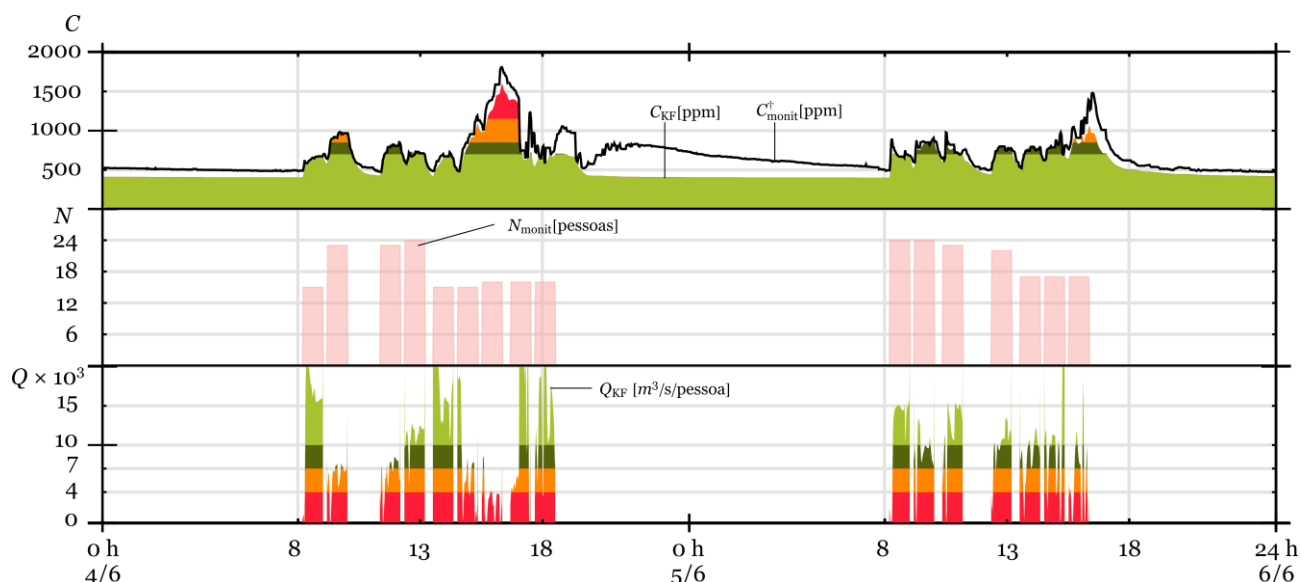


Figura 3. Resultados da aplicação do Filtro de Kalman ao estudo de caso. Período entre as 0 h de 4 de junho e as 24 h de 5 de junho (2013). Caudal de ar novo por ocupante na sala de aula (Q_{KF}); número de ocupantes na sala (N_{monit}); concentração de CO₂ monitorizada na sala (C_{monit}^+), e; concentração de CO₂ estimada pelo Filtro de Kalman (C_{KF}), excluindo ruído de medição.

Relacionando as estimativas de caudal de ar novo por pessoa, Q_{KF} , e as concentrações de CO₂, C_{monit}^+ (apenas para o período de aulas), conclui-se que a concentração de CO₂ no ambiente excede 900 ppm para caudais de ventilação inferiores a 7 l/s/pessoa, atingindo-se concentrações superiores a 1200 ppm quando os caudais são inferiores a 4 l/s/pessoa. Esta correspondência entre valores de caudal de ar novo *por pessoa* (de 7 e 4 l/s/pessoa) e concentrações absolutas de CO₂ no ambiente (de ~900 e ~1200 ppm, respetivamente) é congruente com aquela presente na literatura para o regime estacionário e atividade física sedentária (~1 met) [14, 15].

Confrontando as figuras 2 e 3 observa-se que os valores mais baixos de ventilação ocorrem em períodos com temperatura exterior superior à interior e velocidades do vento mais elevadas, sugerindo que nesta situação os ocupantes optam por fechar as janelas, limitando a ventilação. Apesar da Figura 3 mostrar claramente o efeito da ocupação na ventilação da sala, não é possível vislumbrar uma relação simples entre estes parâmetros. Os resultados das Figuras 2 e 3 confirmam ser vasto o número de fatores que podem determinar a ventilação, mas, apesar disso, os resultados são suficientes para concluir que, para os dois dias analisados, os caudais de ventilação excederam quase sempre 7 l/s/pessoa e excederam frequentemente 10 l/s/pessoa. Assim se justifica o elevado número de horas de aulas com concentrações de CO₂ reduzidas, da ordem de 750 ppm (ver aulas com caudais associados verde claros). Segundo a EN ISO 15251:2007 [14], concentrações de CO₂ da ordem de 750 ppm correspondem a uma qualidade do ar interior “premium”, demonstrando a capacidade de garantir a qualidade do ar interior com ventilação natural por abertura manual de janelas.

De referir que para os resultados obtidos com o presente estudo de caso contribui não só a abertura manual de janelas, mas ainda as características passivas do projeto (elevada inércia térmica, tipo de sombreamento, tipo de envidraçados). Com efeito, no período analisado as temperaturas interiores nunca excederam 26°C nem foram inferiores a 24°C, sendo o valor médio de temperatura interior de 25°C. Ou seja, a par da qualidade do ar, também o conforto térmico ficou assegurado com recurso a soluções de construção e de ventilação *tradicionais*.

Obviamente, a presente análise reporta-se a apenas dois dias com tempo quente. Durante a estação de arrefecimento as temperaturas exteriores baixas (ventos fortes ou precipitação) impedirão a abertura de janelas e, nesse caso, os caudais de ventilação deverão reduzir significativamente, como aliás se mostra em [10].

4. CONCLUSÃO

Apresentou-se um modelo assente no Filtro de Kalman para a determinação de caudais de ventilação em espaços ventilados naturalmente e de ocupação intermitente. Este modelo possui a vantagem de ter em consideração a natureza estocástica dos processos que subjazem à ventilação e, porque integra esta natureza, permite uma abordagem consistente à filtragem do ruído que está sempre associado a medições de concentração interior de CO₂ (e, adicionalmente, às variações no ambiente e abertura/ fecho de janelas por ocupantes).

Aplicou-se este modelo ao estudo da ventilação numa sala de aula de uma escola pública portuguesa. Concluiu-se que os resultados de caudais de ar novo por ocupante são congruentes com os valores medidos de concentração interior de CO₂. Para o período analisado (dois dias e tempo quente) obtiveram-se caudais de ventilação adequados. Com efeito, em mais de metade do tempo de aulas os caudais de ventilação por pessoa excederam o valor recomendado de 7 l/s/pessoa, concluindo-se que a ventilação natural com abertura manual de janelas proporcionou condições interiores favoráveis ao processo ensino-aprendizagem.

Os resultados apresentados neste artigo são importantes para projetistas e gestores de edifícios pois o Filtro de Kalman permite a análise de soluções técnicas e atos de gestão com elevado potencial de poupança. Sob o ponto de vista da qualidade do ar o Filtro de Kalman dá um importante contributo para esclarecer as condições em que a ventilação natural é (ou não) uma opção.

REFERÊNCIAS

- [1] ASTM E741-00: Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution, ASTM International, United States of America, 2006.
- [2] EN ISO 12569: Thermal performance of building---determination of air change rate in buildings---Tracer gas dilution method, CEN-European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2000.
- [3] ASTM E6245-98: Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, ASTM International, United States of America, 2002.
- [4] Penman, L., An experimental determination of ventilation rate in occupied rooms using atmospheric carbon dioxide, *Building and Environment*, 1980: 15, 45-47.
- [5] Penman, L., Rashid, A., Experimental determination of air-flow in a naturally ventilated room using metabolic carbon dioxide, *Building and Environment*, 1982: 17, 253-256.
- [6] Smith, P., Determination of ventilation rates in occupied buildings from metabolic CO₂ concentrations and production rates, *Building and Environment*, 1988: 23, 95-102.
- [7] Madsen, H., Holst, J., Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, *Energy and Buildings*, 1995: 22, 67-79.
- [8] Chui, C., Chen, G., *Kalman filtering with real-time applications*, Springer, 4th Edition, 2009.
- [9] MATLAB Release 2015b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [10] Duarte, R., Glória Gomes, M., Moret Rodrigues, A., Classroom ventilation with manual opening of windows: Findings from a two-year-long experimental study of a Portuguese secondary school, *Building and Environment*, 2017: 124, 118-129.
- [11] Sauter, Sauter components catalog for EGQ 212, 222: Transducers for CO₂ and temperature, s.d.
- [12] Coley, D., Beisteiner, A., Carbon dioxide levels and ventilation rates in schools, *International Journal of Ventilation*, 2002: 1, 45-52.
- [13] Davis, *Precision Weather Instruments*, Davies Instruments 2010 Catalog.
- [14] EN ISO 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics, CEN-European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2007.
- [15] ANSI/ASHRAE Standard 62.1, Ventilation for acceptable indoor air quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2007