

## CONSUMO ENERGÉTICO, CONFORTO E QUALIDADE DO AR EM SALAS DE AULA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES DO PERÍODO JCETS - MOP

Rogério Duarte<sup>1\*</sup> e Marco Pereira<sup>2</sup>

1: Departamento de Engenharia Mecânica  
Escola Superior de Tecnologia  
Instituto Politécnico de Setúbal  
Campus do IPS, Estefanilha, 2910 – 761 Setúbal, Portugal  
e-mail: rogerio.duarte@estsetubal.ips.pt

2: Escola Superior de Tecnologia  
Instituto Politécnico de Setúbal  
Campus do IPS, Estefanilha, 2910 – 761 Setúbal, Portugal  
e-mail: marco\_azoia@hotmail.com

**Palavras-chave:** Qualidade do Ar Interior, Conforto Térmico, Consumo Energético, Edifício Escolar; Dioxido de Carbono

**Resumo.** *As infraestruturas escolares públicas existentes têm sido objeto de investimentos de renovação e melhoramento significativos num momento em que a legislação estabelece valores máximos de concentração de poluentes caracterizadores da qualidade do ar no interior dos edifícios. O cumprimento das exigências de qualidade do ar interior precipitou uma mudança de paradigma na ventilação de salas de aula em edifícios escolares, assistindo-se à adoção de sistemas mecânicos de ventilação e climatização, em contraponto com a tradicional ventilação natural. Para as equipas gestoras escolares, frequentemente desconhecedoras da importância da qualidade do ar, a ventilação mecânica constitui um sorvedouro de recursos difícil de justificar. Importa por isso estudar estratégias que permitam, por um lado garantir a qualidade do ar e o conforto nas salas de aula, mas por outro lado não imponham custos excessivos. Partindo de uma sala de aula tipo de edifícios escolares do período JCETS – MOP (Junta das Construções para o Ensino Técnico Superior – Ministério das Obras Públicas) estuda-se um sistema de ventilação mecânica que varia o caudal de ventilação em função da concentração de CO<sub>2</sub> nas salas, comparando-se a qualidade do ar interior e o conforto com os conseguidos por ventilação natural e por ventilação mecânica com caudal constante. Compara-se ainda o custo energético dos dois sistemas de ventilação mecânica em estudo. Conclui-se que a definição da qualidade do ar no interior de edifícios assente na limitação de valores de “concentrações-hora” de poluentes (em lugar da atual e mais restritiva limitação da concentração) permitiria a salas de aula ventiladas naturalmente cumprir a legislação.*

## 1. INTRODUÇÃO

O investimento na qualificação e educação têm constituído uma aposta de diversos governos europeus [1, 2], não sendo o governo português uma exceção. Com o programa de modernização levado a cargo pela Entidade Pública Empresarial Parque Escolar [3], procedeu-se nos últimos anos (com início em 2007) à modernização e manutenção de diversas escolas secundárias da rede pública nacional. Pela dimensão das intervenções e perante o compromisso da Parque Escolar em promover a eficiência energética [4], novas construções e remodelações foram objeto de análise para emissão de certificado energético, ao abrigo do Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) [5].

De acordo com a regulamentação específica do SCE [6] as intervenções em escolas ficaram obrigadas à manutenção de valores mínimos de qualidade do ar interior (QAI), que se traduzem por valores máximos de concentração de poluentes função da atividade exercida no espaço (e.g., sala de aula, laboratório, biblioteca). Esta regulamentação – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) – avança valores de caudais de ar exterior por ocupante ou por área de pavimento que, em linha com as boas práticas, permitem assegurar a QAI. Sucede que, para manter os valores regulamentares de caudais de ar exterior em salas de aula é necessário alterar o paradigma de ventilação, já que a ventilação natural, por abertura de janelas, não permite garantir as renovações de ar necessárias, logo, não garante a QAI.

É neste contexto que, nas intervenções da Parque Escolar se passou a observar a ventilação mecânica de salas de aula e o recurso a aquecimento e ar-condicionado.

No presente artigo começa-se por caracterizar uma sala de aula tipo de edifícios escolares do período JCETS – MOP, após reabilitação pela Parque Escolar. Seguidamente apresenta-se um sistema de climatização de salas de aula com controlo de concentração de CO<sub>2</sub>, que permite assegurar a QAI com caudais de ar exterior inferiores aos recomendados no RSECE. A sala de aula tipo é modelada com recurso ao programa EnergyPlus, versão 6-0-0 [7], considerando: (i) ventilação natural, (ii) sistema de neutralização do ar-novo e controlo de concentração de CO<sub>2</sub> na sala de aula, (iii) sistema de neutralização do ar-novo com caudais constantes e iguais aos apresentados no RSECE. Os resultados obtidos por modelação permitem concluir vantagens e desvantagens de diferentes formas de ventilar uma sala de aula.

## 2. SALA DE AULA TIPO DO PERÍODO JCETS – MOP

O Ministério das Obras Públicas nacional (MOP) promoveu no âmbito da Junta das Construções para o Ensino Técnico e Secundário (JCETS), entre o final da década de 30 e a década de 60 do século XX, a construção de um total de 29 liceus e 69 escolas técnicas [8] de tipologia homogénea, apesar da evolução observada nos programas base. No âmbito do *Plano 38* da JCETS, “(...) [a]os espaços relativos ao grupo do serviço administrativo, [reserva-se] um lugar central no edifício (...) os serviços especiais (biblioteca, museu e sala de professores) situam-se, na maioria das soluções, no primeiro piso, sobre o átrio, ocupando uma localização central no edifício, que permite o fácil acesso a todos os ciclos de ensino. É a partir do átrio que todo o edifício liceu se organiza e é a partir deste espaço que se acede aos diversos espaços do grupo de serviços escolares. A distribuição e o acesso às salas de aula normais e especiais são assegurados pelo corredor lateral, iluminado naturalmente, que estrutura espacialmente o edifício. Todos os projectos desenvolvidos no âmbito do Plano de 38 apresentam a mesma tipologia linear, assente no corredor de distribuição, situando-se os acessos verticais (escadas) nos seus topos e pontos de intersecção dos corpos com direcções perpendiculares. A adopção desta tipologia está implícita no Programa Base, que atribui ao espaço do corredor a função de ‘estabelecer a fácil comunicação das diversas dependências’ (...)” [9].

A adoção do corredor lateral, iluminado naturalmente, de acesso a salas de aula é reproduzida em programas posteriores, quer de liceus, quer de escolas técnicas. As salas de aula deste período

possuem áreas e orientações habituais ( $50 \text{ m}^2$ , aproximadamente; orientadas preferencialmente a sul), adequadas para uma ocupação de 25 alunos; mas os materiais e as técnicas construtivas eram as típicas à data de construção. As obras de requalificação da Parque Escolar permitiram a adoção de materiais e técnicas contemporâneas, passando as salas de aula a contar, em geral, com [8]:

- Vãos envidraçados com caixilho metálico com corte térmico e vidro duplo;
- Controlo solar e de iluminação natural (em geral com telas exteriores móveis);
- Salas de aula pintadas de cores claras;
- Luminárias com lâmpadas fluorescentes e balastros eletrónicos;
- Teto falso perfurado (correção acústica), e ainda, os equipamentos de auxílio pedagógico;
- Quadro *interativo* (inclui projetor) e computador.

A Figura 1 apresenta um esboço de uma sala de aula tipo do período JCETS – MOP, servida por um corredor lateral, iluminado naturalmente. Representam-se telas exteriores, porta de acesso ao corredor com visibilidade para a sala, entre outros, como preconizado em [8].

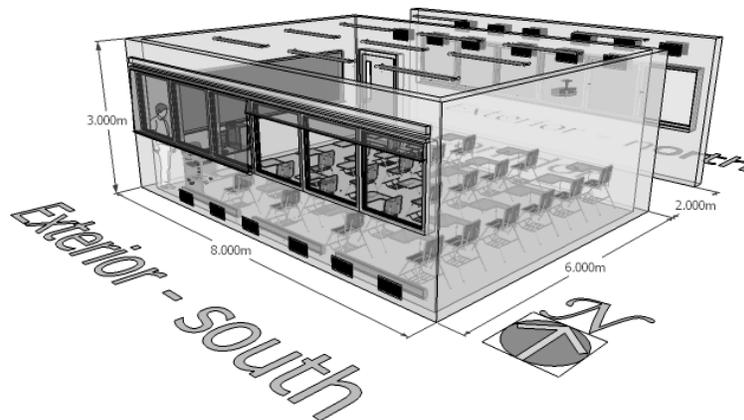


Figura 1. Vista em perspetiva de uma sala de aula tipo do período JCETS – MOP servida por um corredor lateral.

O calendário de ocupação contemporâneo inclui o período de 15 de setembro a 15 de junho das, 8h00 (aproximadamente) às 18h00 (aproximadamente), com pausa para almoço, todos os dias da semana com exceção dos feriados e de dois períodos de duas semanas no Natal e na Páscoa. As aulas são de 1,5 horas com intervalos de 15 minutos.

### 3. VENTILAÇÃO MECÂNICA COM CONTROLO DE $\text{CO}_2$

Não é aceitável insuflar o ar exterior numa sala de aula nas condições de temperatura exterior ( $T_{ext}$ ), muito baixa no inverno e muito elevada no verão; sendo muito variadas as estratégias possíveis de condicionamento de ar. No trabalho realizado optou-se por limitar o estudo a sistemas que apenas neutralizam as cargas térmicas do ar exterior (na literatura anglo-saxónica, *Dedicated Outdoor Air Systems*, DOAS). Sistemas deste tipo implementam uma lei de controlo da temperatura do ar insuflado na sala de aula ( $T_{insul}$ ) do tipo da apresentada na equação (1), que implica o aquecimento e o arrefecimento do ar exterior quando este está abaixo de uma temperatura mínima ( $T_{min}$ , no presente estudo considerou-se  $20^\circ\text{C}$ ) e acima de uma temperatura máxima ( $T_{max}$ , no presente estudo considerou-se  $23^\circ\text{C}$ ), respetivamente (na prática, este sistema contempla recuperação de calor do ar

de exaustão da sala, devendo por isso controlar-se a temperatura do ar exterior após a recuperação de calor). Caso o ar exterior esteja a uma temperatura compreendida entre a mínima e a máxima o ar exterior apenas é filtrado.

$$\begin{cases} T_{insuf} = T_{min} & se & T_{ext} < T_{min} \\ T_{insuf} = T_{ext} & se & T_{min} \leq T_{ext} \leq T_{max} \\ T_{insuf} = T_{max} & se & T_{ext} > T_{max} \end{cases} \quad (1)$$

Num sistema de ventilação mecânica com caudal constante, o caudal insuflado no período de ocupação da sala de aula será constante e igual o limite mínimo imposto na regulamentação RSECE (30 m<sup>3</sup>/h/ocupante). Porém, a ocupação de uma sala de aula sofre variações fruto de pausas para intervalo, atividades fora da sala de aula, faltas; também a abertura de portas (e janelas) influencia de modo significativo a qualidade do ar interior, assim, encontram-se referências na literatura [10, 11] a sistemas que modulam o caudal de ventilação em função da concentração de CO<sub>2</sub> – poluente usado como indicador de ocupação do espaço e de QAI –, e permitem poupar energia na movimentação de ar e na neutralização das cargas térmicas do ar exterior.

Neste trabalho estuda-se o desempenho de um sistema de ventilação com controlo de CO<sub>2</sub>, que neutraliza as cargas térmicas do ar exterior com o caudal de ar exterior mínimo indispensável para garantir a QAI; ou, dito de outra forma, para garantir que a concentração de CO<sub>2</sub> nas salas não ultrapassa um limite máximo.

Admite-se que a sala de aula tipo descrita na secção 2 dispõe de uma consola a todo o comprimento do paramento inferior da parede exterior e que esta consola insufla ar exterior neutralizado ( $T_{min} < T_{insuf} < T_{max}$ ). A insuflação ocorre a baixa velocidade tendo em vista a maximização da eficiência de ventilação. O ar sai da sala para o corredor através de aberturas na parede interior que separa sala de aula e corredor – ver Figura 2. Considera-se o ar extraído mecanicamente do corredor para o exterior com recuperação de calor.

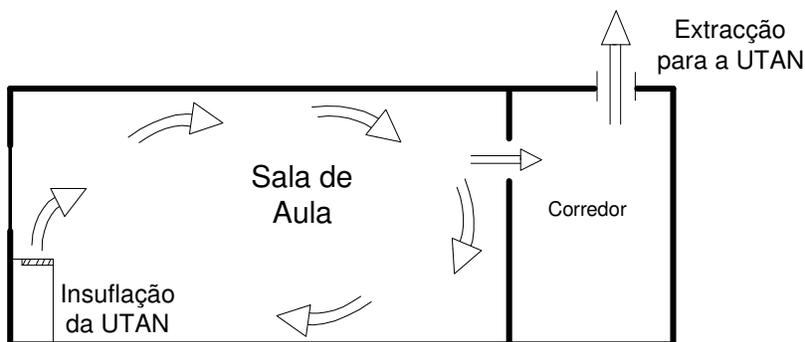


Figura 2. Ventilação da sala de aula (situação de inverno). Na Unidade de Tratamento de Ar exterior (UTAN) procede-se ao tratamento do ar (filtração, aquecimento, arrefecimento) e recupera-se o calor do ar de exaustão.

Na Figura 3 apresenta-se o esquema de princípio da rede aerólica que serve as salas de aula. Repare-se na existência de registos modulantes VAV (Volume de Ar Variável), com abertura ou fecho determinada pela concentração de CO<sub>2</sub> na sala. No limite, quando todas as salas se encontrem desocupadas e com concentrações de CO<sub>2</sub> inferiores ao limite máximo, os registos VAV fecham (ou adquirem a posição mínima) e o sistema de ventilação pára (ou adquire o caudal de ventilação mínimo).

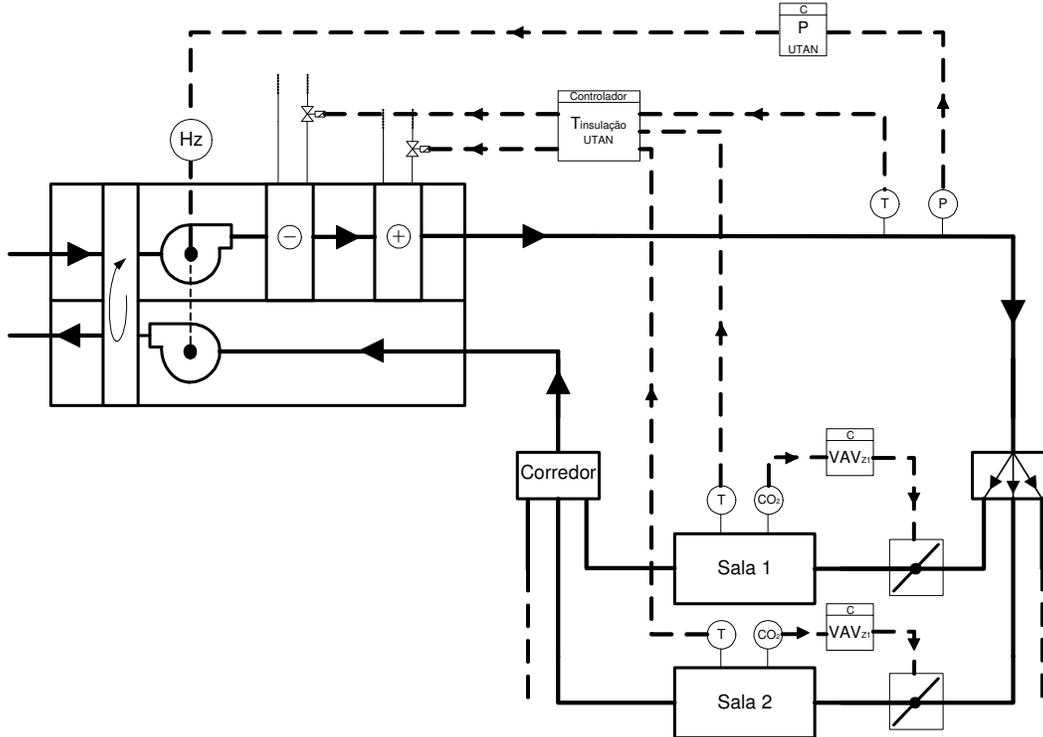


Figura 3. Esquema de princípio da rede aerólica de um sistema com controlo de  $\text{CO}_2$  nas salas de aula. Representa-se ainda, de modo simplificado, o controlo de (i) registos de caudal VAV, (ii) ventilador de insuflação/extração e (iii) válvulas de caudal de água quente e fria; função de sinais de (i) concentração de  $\text{CO}_2$ , (ii) pressão e (iii) temperatura, respetivamente.

#### 4. MODELAÇÃO

Usou-se o programa EnergyPlus versão 6-0-0 [7] na modelação do comportamento da sala tipo sujeita ao clima de Lisboa (como disponibilizado no sítio onde se descarrega o EnergyPlus) com ventilação natural e com sistemas de ventilação mecânica.

##### 4.1. Sala de Aula Tipo

A sala de aula modelada é a descrita na secção 2, com as dimensões e orientação indicadas na Figura 1, e com uma ocupação de 25 alunos (mais 1 professor). Admite-se a sala localizada num piso intermédio em posição central relativamente aos topos do edifício. Inclui-se na modelação o conjunto sala de aula e corredor contíguo, uma vez que é esta a “célula independente” de modelação térmica mais simples.

No que concerne à utilização da sala de aula, a Tabela 1 apresenta os ganhos internos considerados. O perfil de ocupação é o descrito no final da secção 2.

Como anteriormente apresentado na Figura 1, considerou-se a existência de telas exteriores móveis com funções de controlo solar e controlo da iluminância/encandeamento. Com efeito, após análise dos projetos de reabilitação da Parque Escolar [3, 12], conclui-se serem vários os casos em que o sombreamento é efetuado por este tipo de dispositivos, minimizando intervenções em fachadas de edifícios.

Tabela 1. Ganhos internos na sala de aula.

Sala de Aula	Ganho específico
Ocupação (ganhos totais)	0,45 ocupante/m <sup>2</sup> ; 86,25 W/ocupante
Iluminação	8,3 W/m <sup>2</sup>
Equipamento (ganhos só sensíveis)	12,5 W/m <sup>2</sup>

O fator determinante na operação de dispositivos de sombreamento em salas de aula é o controlo de encandeamento, que afeta a leitura no plano das secretárias e, sobretudo, no plano do quadro. Assim, na modelação da atuação dos dispositivos de sombreamento optou-se por um controlo assente no nível de encandeamento na proximidade do quadro.

O acionamento da iluminação artificial visa a manutenção de 300 lux e efetua-se em dois escalões, função do efeito da iluminação natural. Ou seja, sempre que a iluminação natural proporciona mais de 300 lux na sala a iluminação artificial é desligada. Quando a iluminação natural proporciona iluminâncias inferiores a 150 lux, a iluminação artificial é atuada a 100%. A iluminação artificial é atuada a 50% nos restantes casos. A esta ação de iluminação artificial da sala sobrepõe-se o calendário de ocupação da sala que estabelece os períodos em que a iluminação artificial se encontra sempre desligada.

O modelo de infiltração/ventilação natural considerado é o descrito no manual do programa EnergyPlus como “modelo DOE2” [7]. Este modelo faz depender o caudal de infiltração/ventilação natural da velocidade do vento, atribuindo aos resultados um grau de aleatoriedade que se considera fundamental na análise da ventilação natural. Fruto da aleatoriedade da velocidade do vento apenas se definiram caudais médios anuais de infiltração/ventilação natural.

Sempre que se simulou o funcionamento de sistemas de ventilação mecânica (período de ocupação) admitiu-se uma redução de 75% dos caudais de infiltração.

#### 4.2. Condições Interiores de projeto

Relativamente às condições interiores do projeto, levou-se em consideração o constante na *Categoria II* da norma EN15251:2007 [13]: “Nível normal de expectativa e deve ser usado em edifícios novos ou remodelados” – ver Tabela 2.

Tabela 2. Condições interiores de projeto – Categoria II [13].

Condições interiores de projeto	Categoria II
Concentrações de CO <sub>2</sub> em ppm acima das concentrações no ar exterior para cálculos energéticos	500
Temperatura operativa °C Mínimo para o aquecimento (estação de aquecimento) – 1,0 clo	20
Temperatura operativa °C Mínimo para o arrefecimento (estação de arrefecimento) – 0,5 clo	26
Iluminância mantida, Êm, nas áreas de trabalho, lux	300
Índice de desconforto por encandeamento (UGR, EN12464-1:2002)	19

No que diz respeito à qualidade do ar interior, considerando um valor de concentração de CO<sub>2</sub> exterior de 400 ppm, resulta a concentração máxima de 900 ppm (o RSECE especifica 1800 mg/m<sup>3</sup>, ou seja, aproximadamente 1000 ppm).

### 4.3. Sistemas de Climatização

A modelação com o programa EnergyPlus dos sistemas mecânicos foi avaliada pela verificação de:

- caudal de insuflação igual ao especificado (aplicável especialmente para o sistema de caudal constante);
- recuperação de calor do ar de exaustão, quando tal é esperado;
- obediência à lei de controlo expressa na equação (1);
- obediência ao limite máximo de concentração de CO<sub>2</sub> em sala de aula (900 ppm) no caso do sistema com controlo de CO<sub>2</sub>.

A Figura 4 mostra um pormenor dos resultados de caudal insuflado e de concentração de CO<sub>2</sub> na sala de aula tipo nos dias 27 e 28 de setembro.

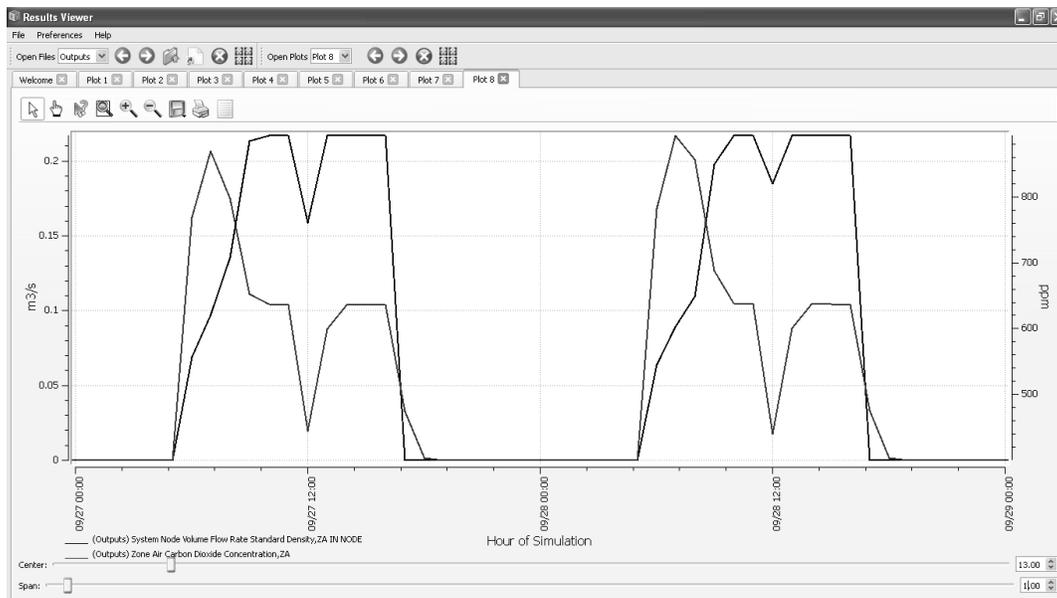


Figura 4. Evolução de caudal (linha preta) e concentração de CO<sub>2</sub> (linha cinzenta) na sala tipo localizada em Lisboa, ao longo dos dias 27 e 28 de setembro.

A Figura 4 permite concluir que o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na sala no início da manhã é acompanhado por um aumento (com atraso) do caudal de ventilação, por forma a garantir concentrações inferiores a 900 ppm. O facto das concentrações descerem a meio da manhã até aos 640 ppm resulta das elevadas temperaturas exteriores, que nesses dias ultrapassam os 30°C, obrigando ao funcionamento do sistema de ventilação com caudal máximo (e temperatura de insuflação a 23°C) para maximizar a remoção das cargas térmicas da sala.

## 5. RESULTADOS

Os resultados da modelação permitem comparar o desempenho em termos de conforto térmico e qualidade do ar interior de uma sala de aula ventilada naturalmente ou mecanicamente; e permitem comparar consumos energéticos de sistemas mecânicos com caudal constante ou com controlo de CO<sub>2</sub>.

Analisa-se:

- Médias, desvios-padrão, máximos e mínimos.
- Percentagens de horas com temperatura interior abaixo de 20°C – ver equação (2) –, acima de 26°C e em que a concentração de CO<sub>2</sub> excede 900 ppm (inspirado no Método A do Anexo F de [13]).
- Desvios médios de temperatura interior (relativamente a 20°C) quando não se atingem os 20°C – ver equação (3) –; (relativamente a 26°C) quando se excedem os 26°C, e; desvio médio de concentração de CO<sub>2</sub> (relativamente a 900 ppm) quando se excede a concentração de 900 ppm.

Nas equações (2) e (3), faz-se uso da função de Heaviside (contínua à esquerda).

$$h \text{ com } T_{int} < 20^\circ \text{C} [\%] = \frac{\sum_{i=1}^n H(20 - T_{int,i})}{n} \quad (2)$$

$$\text{Desvio } qd \text{ } T_{int} < 20^\circ \text{C} [^\circ \text{C}] = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{int,i} - 20) H(20 - T_{int,i})}{\sum_{i=1}^n H(20 - T_{int,i})} \quad (3)$$

Distinguem-se dois períodos para obtenção destas percentagens e desvios médios: Período anual e período de aquecimento (dezembro a fevereiro). Quando se compara o desempenho da sala de aula tipo com os dois sistemas de ventilação mecânica considera-se o período anual. Admite-se que o uso de sistema de climatização permite a manutenção de condições interiores de conforto térmico e QAI, sendo reduzido o erro de considerar que as janelas permanecerão normalmente fechadas no período de ocupação. Para a comparação entre o desempenho da sala de aula tipo com ventilação natural e com ventilação mecânica com controlo de CO<sub>2</sub>, consideram-se apenas os resultados para o período de aquecimento entre dezembro e fevereiro, visto que apenas nesse período é legítimo assumir que as janelas se encontram normalmente fechadas.

### 5.1. Ventilação mecânica: caudal constante versus controlo de CO<sub>2</sub>

A Tabela 3 resume os resultados de modelação obtidos para a sala de aula tipo com os sistemas de ventilação mecânica de caudal constante (na nomenclatura anglo-saxónica, *Constant Air Volume*, CAV) e com controlo de CO<sub>2</sub> (na nomenclatura anglo-saxónica, *Demand Control Ventilation*, DCV). Os resultados dizem respeito ao período anual; dias úteis do calendário escolar das 8h00 às 18h00, num total de 1740 h.

Da Tabela 3 conclui-se que:

- Sob o ponto de vista do consumo energético (*Total [kWh eléctrico]\**) o sistema DCV reduz o consumo em aproximadamente 40% face ao sistema CAV.
- O sistema DCV permite poupar energia sobretudo no período de aquecimento (*Aquec [kWh térmico]*). Com efeito, os elevados ganhos de calor na sala de aula contribuem para manter temperaturas interiores acima de 20°C na estação de aquecimento; conseguindo-se atingir o limite da concentração de CO<sub>2</sub> de 900 ppm com caudais inferiores aos regulamentares (aqueles considerados na modelação do sistema CAV).

Conclui-se ainda que:

- São elevadas as temperaturas médias na sala, por serem elevados os ganhos internos e através da envolvente transparente (sala orientada a sul).
- O sistema DCV origina uma percentagem de horas com temperatura interior superior a 26°C

elevada (40,6%). Mas isto resulta do controlo implementado porque, como se vê, o desvio médio da temperatura relativamente aos 26°C é de apenas 0,8 K.

- O sistema DCV origina uma percentagem de horas com concentração de CO<sub>2</sub> superior a 900 ppm elevada (39,4%). Mas isto resulta do controlo implementado porque, como se vê, o desvio médio da concentração relativamente aos 900 ppm é de apenas 10,9 ppm.

- Sob o ponto de vista do conforto térmico e da qualidade do ar interior o sistema CAV possui um melhor desempenho.

Tabela 3. Caracterização do desempenho da sala de aula tipo com o sistema de caudal constante (CAV) e comparação com o desempenho da mesma sala com o sistema com controlo de CO<sub>2</sub> (DCV). Apresentam-se ainda dados do ambiente exterior. (\*: A energia eléctrica total foi determinada admitindo um EER de 3 para produção de água gelada e um COP de 4 para produção de água quente [14]).

		Ambiente Exterior	Ambiente Interior – Sala SUL	
			DCV	CAV
<b>Vent. Natural</b> [ren./h]	<i>Média</i>	-	0.4	0.4
	<i>Desv.Padrão</i>	-	0.1	0.1
	<i>Máx.</i>	-	0.8	0.8
	<i>Mín.</i>	-	0.0	0.0
<b>Vent. Mecânica</b> [ren./h]	<i>Média</i>	-	3.6	5.6
	<i>Desv.Padrão</i>	-	1.3	0.1
	<i>Máx.</i>	-	5.8	5.8
	<i>Mín.</i>	-	1.6	5.4
<b>Temperatura</b>	<i>Média [°C]</i>	15.9	25.2	24.3
	<i>Desv.Padrão [°C]</i>	5.1	1.9	2.1
	<i>Máx. [°C]</i>	32.4	30.8	30.8
	<i>Mín. [°C]</i>	4.2	18.0	17.9
	<i>h com Tint&lt;20°C [%]</i>	79.8	0.7	0.8
	<i>h com Tint&gt;26°C [%]</i>	4.8	40.6	18.6
	<i>Desvio qd Tint&lt;20°C [°C]</i>	-6.2	-0.6	-0.6
	<i>Desvio qd Tnt&gt;26°C [°C]</i>	2.4	0.8	1.6
<b>Concentração de CO2</b>	<i>Média [ppm]</i>	400.0	806.8	647.6
	<i>Desv.Padrão [ppm]</i>	0.0	109.3	17.9
	<i>Máx. [ppm]</i>	-	975.0	677.3
	<i>Mín. [ppm]</i>	-	604.1	603.3
	<i>h com CO2&gt;900ppm [%]</i>	0.0	39.4	0.0
	<i>Desvio qd CO2&gt;900ppm [ppm]</i>	-	10.9	-
<b>Consumo de Energia</b> [kWh/m2]	<i>Aquec [kWh térmico]</i>	-	2.3	8.6
	<i>Arref [kWh térmico]</i>	-	3.3	3.3
	<i>Ventil [kWh eléctrico]</i>	-	2.9	4.6
	<i>Total [kWh eléctrico]*</i>	-	4.5	7.9
<b>Potência Aquecimento</b> [W térmico]	<i>Média</i>	-	101.1	431.9
	<i>Máx.</i>	-	1783.2	2189.3
	<i>Mín.</i>	-	0.0	0.0
<b>Potência Arrefecimento</b> [W térmico]	<i>Média</i>	-	187.6	317.5
	<i>Máx.</i>	-	2190.4	2247.7
	<i>Mín.</i>	-	0.0	0.0
<b>Potência Ventilação</b> [W eléctrico]	<i>Média</i>	-	79.1	127.3
	<i>Máx.</i>	-	126.0	127.3
	<i>Mín.</i>	-	54.6	127.3

## 5.2. Ventilação Natural versus ventilação mecânica com controlo de CO<sub>2</sub>

A Tabela 4 resume os resultados de modelação obtidos para a sala de aula tipo considerando ventilação natural – e caudais médios de ventilação de 1,5 e 3 renovações de ar por hora –, e considerando o sistema de ventilação mecânica com controlo de CO<sub>2</sub> (DCV).

Os resultados dizem respeito ao período entre dezembro e fevereiro, dias úteis do calendário escolar das 8h00 às 18h00, num total de 511 h.

Tabela 4. Caracterização do desempenho da sala de aula tipo com o sistema com controlo de CO<sub>2</sub> (DCV) e comparação com o desempenho da mesma sala ventilada de modo natural (1,5 ren./h e 3,0 ren./h). Apresentam-se ainda dados do ambiente exterior. (\*: A energia total foi determinada admitindo um EER de 3 para produção de água gelada e um COP de 4 para obtenção de água quente [14]).

		Ambiente Exterior	Ambiente Interior – Sala SUL		
			DCV	Vent.Nat. 1,5 ren./h	Vent.Nat. 3,0 ren./h
<b>Vent. Natural [ren./h]</b>	<i>Média</i>	-	0.4	1.5	3.0
	<i>Desv.Padrão</i>	-	0.1	0.5	1.0
	<i>Máx.</i>	-	0.8	3.0	6.0
	<i>Min.</i>	-	0.0	0.0	0.0
<b>Vent. Mecânica [ren./h]</b>	<i>Média</i>	-	2.8	-	-
	<i>Desv.Padrão</i>	-	0.7	-	-
	<i>Máx.</i>	-	5.6	-	-
	<i>Min.</i>	-	1.7	-	-
<b>Temperatura</b>	<i>Média [°C]</i>	12.0	23.8	22.7	19.8
	<i>Desv.Padrão [°C]</i>	2.7	1.6	2.5	2.5
	<i>Máx. [°C]</i>	18.7	26.2	30.3	26.6
	<i>Min. [°C]</i>	4.2	18.0	14.5	11.5
	<i>h com Tint&lt;20°C [%]</i>	100.0	2.4	12.7	55.3
	<i>h com Tint&gt;26°C [%]</i>	0.0	9.6	11.6	0.8
	<i>Desvio qd Tint&lt;20°C [°C]</i>	-8.0	-0.6	-1.3	-2.0
	<i>Desvio qd Tint&gt;26°C [°C]</i>	-	0.0	1.2	0.5
<b>Concentração de CO2</b>	<i>Média [ppm]</i>	400.0	875.8	1418.3	977.2
	<i>Desv.Padrão [ppm]</i>	0.0	66.8	642.5	511.5
	<i>Máx. [ppm]</i>	-	975.0	7456.7	6203.4
	<i>Min. [ppm]</i>	-	612.6	759.3	614.6
	<i>h com CO2&gt;900ppm [%]</i>	0.0	65.7	82.7	25.3
	<i>Desvio qd CO2&gt;900ppm [ppm]</i>	-	11.4	624.4	497.8
<b>Consumo de Energia [kWh/m2]</b>	<i>Aquec [kWh térmico]</i>	-	1.7	0.0	0.0
	<i>Arref [kWh térmico]</i>	-	0.0	0.0	0.0
	<i>Ventil [kWh eléctrico]</i>	-	0.7	0.0	0.0
	<i>Total [kWh eléctrico]*</i>	-	1.1	0.0	0.0
<b>Potência Aquecimento [W térmico]</b>	<i>Média</i>	-	193.7	0.0	0.0
	<i>Máx.</i>	-	1783.2	-	-
	<i>Min.</i>	-	0.0	-	-
<b>Potência Arrefecimento [W térmico]</b>	<i>Média</i>	-	0.2	0.0	0.0
	<i>Máx.</i>	-	0.9	-	-
	<i>Min.</i>	-	0.0	-	-
<b>Potência Ventilação [W eléctrico]</b>	<i>Média</i>	-	63.5	0.0	0.0
	<i>Máx.</i>	-	126.0	-	-
	<i>Min.</i>	-	55.2	-	-

Da Tabela 4 conclui-se:

- A ventilação natural da sala de aula com 1,5 ren./h permite ambientes térmicos interiores, em média, aceitáveis; porém, com concentração média de CO<sub>2</sub> muito elevada (se bem que em linha com o reportado em [15]), observando-se em 82,7% do tempo concentrações superiores a 900 ppm e desvio médio relativamente a esta concentração apreciável: 624,4 ppm.
- A ventilação natural da sala de aula com 3,0 ren./h reduz a concentração média de CO<sub>2</sub> para valores aceitáveis, próximos dos 900 ppm; contudo, o ambiente térmico interior torna-se mais desconfortável, com temperaturas interiores médias baixas e uma percentagem de horas com temperaturas abaixo de 20°C elevada (55,3%).
- A aleatoriedade da temperatura exterior origina desvios padrão de temperatura interior elevados nos casos com ventilação natural, denunciando maior desconforto, face às maiores percentagem de horas com temperaturas interiores abaixo de 20°C e acima de 26°C e os maiores desvios médios relativamente a estas temperaturas.
- As renovações de ar devidas à ventilação mecânica com o sistema DCV são em média 2,8 h<sup>-1</sup> (a que acresce, em média 0,4 h<sup>-1</sup> por infiltrações).
- O sistema DCV permite ambientes confortáveis, mas com temperatura interior média elevada – aproximadamente 24°C –, resultado dos elevados ganhos de calor.
- O sistema DCV origina uma percentagem de horas com concentração de CO<sub>2</sub> superior a 900 ppm elevada (65,7%), mas isto resulta do controlo implementado porque, como se observa, o desvio médio da concentração relativamente aos 900 ppm é de apenas 11,4 ppm.

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos estudos realizados e nos resultados de modelação obtidos conclui-se que:

- i) Tabela 4: A ventilação natural introduz uma variabilidade no comportamento térmico e na QAI da sala de aula incompatível com a “rigidez” do estabelecido na regulamentação nacional [6].
- ii) Se a formulação dos limites de aceitabilidade térmica e de QAI em salas de aula previr a possibilidade de incumprimento até uma determinada percentagem máxima de horas durante o período de utilização da sala (como sugerido em [13], Anexo G, que exemplifica desvios relativamente aos limites legislados em 3 ~ 5% do tempo), e se essa percentagem não for demasiado restritiva, torna-se possível ventilar naturalmente salas de aula. Uma possibilidade consistiria na imposição de valores limite de “concentrações-hora” de poluentes, em lugar dos atuais limites de concentração.
- iii) Um sistema de ventilação mecânica com caudal constante (CAV) que se baseie nas exigências regulamentares nacionais de caudais de ar exterior permite manter concentrações de CO<sub>2</sub> na sala de aula significativamente abaixo de 1000 ppm (limite definido em [6]). Assim, caso se aceite para indicador de QAI numa sala de aula a concentração de CO<sub>2</sub> (como admitido em [13]), o caudal de ar exterior regulamentar de 30 m<sup>3</sup>/h/ocupante [6] é excessivo.
- iv) Um sistema de ventilação mecânica com controlo de CO<sub>2</sub> (DCV) permite manter concentrações de CO<sub>2</sub> em sala de aula abaixo de 900 ppm com caudais de ar exterior inferiores a 30 m<sup>3</sup>/h/ocupante. Quando comparado com um sistema de caudal constante (CAV) e igual a 30 m<sup>3</sup>/h/ocupante, a redução anual do consumo de energia final por uso do sistema com controlo de CO<sub>2</sub> é da ordem de 40%.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. Mumovic *et al.*, “Winter indoor air quality, thermal comfort and acoustic performance of newly built secondary schools in England”, *Building and Environment*, Vol. **44**, pp.1466–1477, (2009).
- [2] K. Gertis, K. Sedlbauer, “Schulsanierung”, *Bauphysik*, Vol. **32**, Heft 2, pp. 100-109, (2010).
- [3] Parque Escolar, EPE, Sítio na internet, <http://www.parque-escolar.pt/>, (acedido a 19 de Setembro de 2012).

- [4] Parque Escolar, EPE, Relatório de Sustentabilidade 2009, <http://www.parque-escolar.pt/pt/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade.aspx>, (acedido a 19 de Setembro de 2012).
- [5] Decreto-Lei n.º 78/2006, de 4 de Abril. Publicado no Diário da República, I Série-A, N.º 67. Aprova o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios.
- [6] Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril. Publicado no Diário da República, I Série-A, N.º 67. Aprova o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios.
- [7] EnergyPlus, *EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations*, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, (2011).
- [8] Parque Escolar, EME, *Manual de Projeto: Arquitetura, Versão 2.1*, Parque Escolar, EME, (2009) (<http://www.parque-escolar.pt/publicacoes-parque-escolar.php>, acedido a 19 de setembro de 2012).
- [9] Parque Escolar, EME, *Liceus Escolas Técnicas e Secundárias*, Parque Escolar, EPE, (2010) (<http://www.parque-escolar.pt/pt/programa/livros-parque-escolar.aspx>, acedido a 19 de setembro de 2012).
- [10] S. Emmerich, A. Persily, *State-of-the-Art Review of CO2 Demand Controlled Ventilation Technology and Application*, NISTIR 6729 Report, (2001).
- [11] A. Persily, et al, *Simulations of Indoor Air Quality and Ventilation Impacts of Demand Controlled Ventilation in Commercial and Institutional Buildings*, NISTIR 7042 Report, (2003).
- [12] Parque Escolar, EME, *Parque Escolar 2007-2011 – Intervenção em 106 Escolas*, Parque Escolar, EPE, (2011) (<http://www.parque-escolar.pt/pt/programa/livros-parque-escolar.aspx>, acedido a 19 de setembro de 2012).
- [13] EN15251, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, CEN, (2007).
- [14] Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril. Publicado no Diário da República, I Série-A, N.º 67. Aprova o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.
- [15] M. Santamouris *et al.*, “Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation”, *Energy and Buildings*, Vol. **40**, pp.1833–1843, (2008).