

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA VENTILAÇÃO DE SALAS DE AULA DE UMA ESCOLA SECUNDÁRIA

Armando Pinto^{1*}, Ricardo Gomes¹

1: Departamento de Edifícios,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. Do Brasil n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal
e-mail: apinto@lnec.pt, rgomes@lnec.pt, web: <http://www.lnec.pt>

Palavras-chave: Ventilação, Qualidade do ar interior, conforto térmico, experimentação, simulação numérica

Resumo. *Em Portugal o setor dos edifícios (serviços e residencial) representa cerca de 60% do consumo total de eletricidade, tendo apresentando uma tendência de crescimento devido essencialmente ao aumento do número de equipamentos domésticos e de escritório, bem como devido às crescentes exigências de conforto e de qualidade do ar. Uma parte importante destes consumos de energia é determinada por questões comportamentais, podendo as mesmas por si só ser responsáveis por variações nos consumos de energia num fator de 4.*

A eficiência energética nos edifícios escolares reveste-se de particular importância pela redução do consumo de energia (e da fatura) e nomeadamente pela ação pedagógica na comunidade escolar, a qual poderá ter repercussões também no seu comportamento fora do contexto escolar. A avaliação desta influência está a ser estudada no âmbito do projeto MIT Net Zero Energy School – Reaching the Community.

Para o estudo da eficiência energética nos edifícios utilizam-se frequentemente modelos de simulação térmica em regime dinâmico, que se encontram validados essencialmente para condições em que é utilizado ar condicionado. Assim, no âmbito deste projeto foram realizados ensaios para avaliar experimentalmente as condições de conforto térmico e da qualidade do ar interior em salas de aula de uma escola secundária reabilitada situada em Lisboa, com o sistema de climatização desligado e com diferentes estratégias de ventilação natural. Estes ensaios destinavam-se a permitir avaliar experimentalmente o potencial das medidas passivas para assegurar condições interiores de conforto e para permitir obter resultados destinados a avaliar a qualidade do modelo de simulação térmica e energética do edifício, para estas condições ainda pouco estudadas. Assim, pretende-se contribuir para a validação de modelos de simulação dinâmica na análise de edifícios passivos, de forma a permitir efetuar estudos comparativos de medidas de melhoria.

Nesta comunicação apresenta-se a metodologia experimental, as particularidades do modelo de simulação e a sua validação. Neste trabalho conclui-se que, apesar de algumas incertezas, o modelo de simulação permite uma previsão adequada da evolução da temperatura interior se foram identificados adequadamente os padrões de utilização dos edifícios e as suas características. Os resultados obtidos, mostram que a utilização da ventilação natural através da abertura das janelas pode ser suficiente para assegurar a QAI em salas com baixa densidade de ocupação. Apesar da razoável qualidade térmica da envolvente e das boas práticas, ao princípio da manhã de dias frios a temperatura interior é insuficiente para assegurar condições de conforto térmico.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente foram reabilitadas diversas escolas do ensino secundário, com a introdução de diversos equipamentos e tecnologias para melhorar as condições de ensino, de conforto e de eficiência energética. A forma como estes equipamentos e tecnologias com “elevada” eficiência energética influenciam a educação das crianças e os seus comportamentos em relação ao uso racional da energia fora do contexto escolar ainda não está avaliado. Este aspeto foi objeto do projeto de investigação financiado pela FCT/MIT Portugal, com a designação “*Net Zero Energy School – Reaching the Community*”.

No âmbito do projeto foi necessário avaliar as características de comportamento térmico do edifício e dos seus sistemas. No projeto deu-se ênfase à avaliação do comportamento térmico passivo do edifício, pois esta avaliação em edifícios de serviços não é muito frequente e além disso corresponde à solução que reduz os consumos de energia e os custos de exploração do edifício. Nesse sentido, neste estudo, foram realizados ensaios com diferentes estratégias de ventilação natural destinadas a avaliar a sua eficácia e a recolher dados para apreciar a fiabilidade do modelo de simulação térmica no estudo deste tipo de edifícios.

A validação de modelos de simulação térmica de edifícios encontra-se normalmente subdividida em: i) validação empírica com base em resultados experimentais; ii) verificação analítica por comparação com resultados de soluções analíticas, iii) validação por comparação com outros modelos. Na validação empírica de modelos de simulação térmica de edifícios, existe uma extensa gama de trabalhos centrados na avaliação das necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento (por exemplo [1]). Existem trabalhos sobre a validação destes modelos com ensaios em células de teste adiabáticas [2], em células passivas [3], no estudo de edifícios climatizados [4] e de edifícios de habitação passivos [5].

Para avaliar o comportamento térmico do edifício e estudar medidas de melhoria da eficiência energética de edifícios passivos afigura-se essencial validar o modelo de simulação. No estudo deste edifício escolar foi utilizado o software *EnergyPlus*, que se encontra validado de acordo com a norma ASHRAE 140. Este software é utilizado extensamente no estudo de diversos edifícios, contudo a sua utilização em edifícios passivos é menos frequente.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados experimentais de medições da temperatura e da concentração interior de CO₂ em salas de aula de uma escola secundária situada em Lisboa, na qual foram implementadas diferentes estratégias de controlo da ventilação mecânica e da ventilação natural. Estas experiências destinam-se a apreciar experimentalmente diferentes estratégias de exploração do edifício, bem como a obter dados experimentais para validar o modelo de simulação térmica do edifício e a utilização do software *EnergyPlus*, para permitir avaliar o impacto dessas estratégias no comportamento do edifício ao longo de um ano [6].

Os resultados apresentados centram-se em salas do bloco H+I após a sua reabilitação que foi concluída no princípio de 2011. Foi escolhido este bloco porque os resultados de inquéritos aos utilizadores evidenciaram que este apresentava condições menos favoráveis, quer na perspetiva do conforto térmico, quer da qualidade do ar interior [7], [8], [9] e [10].

No ponto 3, descreve-se o edifício estudado, no ponto 4 apresentam-se os resultados experimentais e no ponto 5 os resultados numéricos que permitiram avaliar a qualidade do modelo de simulação. No ponto 6 são apresentadas as conclusões principais.

2. METODOLOGIA

2.1. Aspetos gerais

Para estudar o edifício e avaliar a eficácia do modelo de simulação térmica em diferentes condições de utilização, foi planeada uma campanha experimental na qual foram implementadas diferentes estratégias de ventilação natural, bem como de ventilação mecânica. Cada experiência teve a duração de um dia.

No âmbito deste estudo foi realizada uma identificação da envolvente, dos equipamentos e dos seus padrões de utilização. Foram realizados ensaios destinados a medir o caudal de ventilação mecânica e as características de perda de carga das janelas oscilo-batentes quando abertas, bem como o efeito dos dispositivos de proteção solar no escoamento do ar.

2.2. Caracterização do edifício e dos sistemas

A caracterização do edifício foi realizada com os elementos de projeto e com a sua validação no decurso das visitas à escola. As principais características do edifício, das instalações e dos equipamentos são apresentadas na seção 3.1.

Os caudais de ventilação mecânica foram obtidos com base na medição da velocidade do ar e no produto dessa velocidade pela área da grelha. A velocidade média de escoamento em cada grelha foi determinada medindo a velocidade com um anemómetro de turbina, em 10 pontos. Cada grelha de ventilação tem as dimensões de 0,405 m x 0,115 m.

A caracterização da área livre das janelas oscilo-batente, na posição basculante e na posição de batente, foi realizada medindo com uma fita métrica a menor seção de escoamento do ar. Dada a relevância deste componente nos caudais de ventilação natural e nas condições de conforto, com recurso a uma porta ventiladora foram realizados ensaios de pressurização para determinar experimentalmente as características dessa abertura. Com a porta ventiladora foi criada uma diferença de pressão entre o interior da sala e o exterior e foi registada a diferença de pressão e o caudal escoado em pressão e em depressão. Devido aos limites do equipamento de ensaio, foi possível realizar ensaios para as diferenças de pressão de 5, 10 e 15 Pa, quando a janela se encontra na posição basculante e de 5 Pa quando a janela se encontra aberta na posição de batente. Através da subtração de resultados de ensaios sucessivos foi possível determinar experimentalmente o coeficiente de perda de carga do vão com a janela oscilo-batente nas seguintes condições:

- Janela aberta na posição basculante, sem cortina interior;
- Janela aberta na posição de batente, sem cortina interior;
- Janela aberta na posição basculante, com cortina interior;
- Janela aberta na posição de batente, com cortina interior.

Em relação à permeabilidade ao ar da envolvente, apenas foi possível verificar que existia uma abertura relevante entre a sala e o átrio.

2.3. Cenários para validação empírica do modelo de simulação

O efeito das diferentes estratégias de ventilação na qualidade do ar interior e nas condições de conforto térmico foi avaliado através de ensaios com a duração de um dia nos quais foram adotadas as seguintes soluções:

Ensaio de ventilação natural (a ventilação mecânica encontra-se desligada):

- N1, As janelas eram deixadas no modo basculante durante as aulas e os intervalos.
- N2, As janelas eram deixadas no modo basculante durante as aulas e os intervalos e as portas interiores eram deixadas abertas durante os intervalos.
- N3, As portas e janelas estavam fechadas de acordo com a vontade dos ocupantes.
- N4, As janelas estavam fechadas e a porta interior aberta nos intervalos.

Ensaio de ventilação mecânica:

- M1, a ventilação mecânica encontrava-se ligada das 8h25 às 15h00.
- M2, a ventilação mecânica encontrava-se ligada das 8h25 às 15h00 e as janelas abertas no modo basculante.

Foram realizados ensaios no período de inverno (ensaios de fevereiro de 2012) e ensaios no período da meia-estação (ensaios de maio de 2012). Nesta comunicação apresentam-se apenas os resultados dos ensaios de inverno.

No período de ensaio foram registadas as diferentes utilizações e acionamento de dispositivos

relevantes para a contextualização dos ensaios e para a realização das simulações, bem como foi medida em contínuo a temperatura do ar e a concentração interior de CO₂.

2.4. Critérios de validação do modelo de simulação

Para a validação de modelos de simulação foi utilizado o erro quadrático médio (expressão 1), bem como foi utilizado a média dos desvios e o valor máximo e mínimo do desvio entre as simulações e as medições. Para o erro quadrático médio foi considerado 1°C como um valor aceitável. De trabalhos de validação de modelos de simulação e ensaios em células de teste passivas em condições de ventilação e de ganhos de calor internos controlados, foram registados erros (RMSD) entre 0,2 e 1,0°C [3] e em células adiabática foram registados valores de 0,5 °C [2]. No estudo de soluções envidraçadas em células de teste, Dawson [5], considerou aceitável um erro (RMSD) de 1°C. Nestas avaliações em células de teste “adiabáticas” registam-se diferenças entre a temperatura máxima medida e calculada entre 2 a 3°C.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{\text{simulado}} - T_{\text{medido}})^2 / n} \quad (1)$$

3. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

3.1. Descrição geral do edifício e dos espaços

O estudo foi realizado no bloco H+I numa escola secundária situada no interior da zona urbana de Lisboa, que entre 2009 e 2011 foi objeto de uma extensa intervenção de reabilitação e que satisfaz aos requisitos do RSECE [11]. O bloco H+I é uma ampliação do antigo bloco I, tem dois pisos, destinando-se o bloco H a salas de laboratório e o bloco I a salas de desenho (Figura 1 e 2). No Quadro 1 resume-se a informação relativa às salas de aulas do bloco H+I.



Figura 1. Vista Nascente do modelo bloco H+I da Escola Secundária.

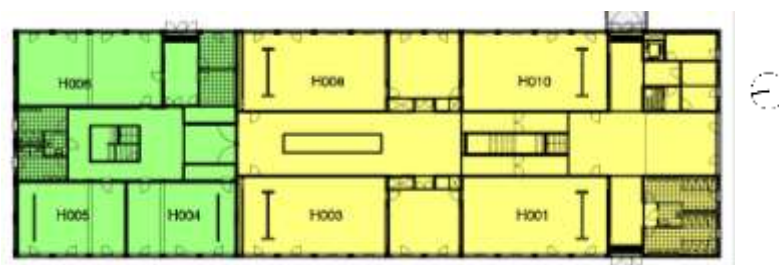


Figura 2. Bloco H (a amarelo) + I (a verde) plantas do piso 0 e 1.

Quadro 1. Elementos referentes às salas de aula do bloco H e I.

Sala de aula	Área de pavimento (m ²)	Área de fachada (m ²)	Fração envidraçada da fachada	Área de abertura/Área pavimento	Capacidade (alunos)
Salas de laboratório	103	38	46%	5%	25
Salas de desenho 1	71	28	47%	6%	25
Salas de desenho 2	95	38	46%	6%	25

Nota: O pé-direito das salas é de 2,70m

3.2. Soluções construtivas do bloco H+I

Na obra de reabilitação foi reforçado o isolamento térmico das paredes, da cobertura e dos vãos envidraçados. Foi aplicado isolamento térmico (40 mm) na caixa-de-ar das paredes, isolamento térmico (50 mm) sobre a laje de cobertura e isolamento térmico (40 mm) sobre o teto falso das salas de aula. As características térmicas do edifício estão resumidas no Quadro 2.

Quadro 2. Características das soluções construtivas

Solução construtiva	Espessura (m)	U (W/m ² .K)	Massa térmica útil (kg/m ²)	Outros parâmetros
Parede exterior	0,46	0,43	150	Cor clara, $\alpha=0,4$
Cobertura em terraço	0,45	0,37	2	Cor média, $\alpha=0,5$
Pavimento térreo	0,47	0,59	150	
Envidraçados	-	3,3	-	$g_{vidro}=0,5$, $\tau_v=0,7$
Pavimento intermédio	0,42	0,59	225	-
Paredes interiores	-	3,3	150	-

Nota: A massa térmica útil foi calculada de acordo com o RCCTE [12].

3.3. Sistema de climatização e de ventilação

O edifício tem um sistema centralizado de climatização e de ventilação. O sistema principal de climatização e ventilação é do tipo “tudo ar”, com três unidades de tratamento de ar na cobertura, com recuperação de calor e aquecimento com água, que insuflam e extraem ar das salas através de condutas. Uma unidade trata o ar das salas nascente do bloco H, outra o ar das salas a poente do bloco H e outra as salas do bloco I. A insuflação e a extração de ar nas salas de aula é realizada por grelhas retangulares colocadas ao nível do teto, apresentando o sistema uma eficiência de ventilação de aproximadamente 0,8. No projeto de AVAC, na sala de aula H010 está prevista a insuflação de 1700 m³/h (6,4 h⁻¹) e a extração de 1860 m³/h (6,7 h⁻¹). As UTAs da ala nascente e da ala poente têm uma potência específica de ventilação de 0,39 W/(m³/h) na insuflação e de 0,36 W/(m³/h) na extração, têm uma potência de aquecimento de 58 kW e um recuperador de calor com uma eficiência de sensivelmente 50%.

As salas de aula encontram-se dotadas de quatro janelas, que permitem a ventilação natural desses espaços. As janelas têm dimensões de 1,0 m x 1,6 m. Cada janela tem uma área livre de abertura de 0,3 m² na posição basculante e de 1,4 m² na posição de batente. Para as 4 janelas existentes na sala H010, estas aberturas são cerca de 1% a 5% da área de pavimento da sala.

3.4. Iluminação e equipamentos

As salas de aula estão dotadas de luminárias refletoras, com lâmpadas fluorescentes T5 e com balastros eletrônicos, tendo uma elevada eficiência. No Quadro 3 apresenta-se o valor da densidade de iluminação das salas de aula. O seccionamento dos circuitos de iluminação é realizado de forma progressiva em função da distância ao quadro multimédia. Nas instalações

sanitárias e nos corredores a potência de iluminação tem valores entre 2 e 10 W/m². Apesar da sala de aula estar dotada de meios audiovisuais (quadro eletrónico e computador de secretária), nos dias dos ensaios estes não foram utilizados e não se considerou o seu consumo.

Quadro 3. Densidades de iluminação das salas de aula (W/m²)

Sala	Densidade de iluminação
Salas de laboratórios	8,7
Sala de desenho 1	11,5
Sala de desenho 2	9,5

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1. Equipamento experimental e incerteza de medição

Na realização deste estudo foram utilizados equipamentos indicados no Quadro 4 para medir as condições exteriores e interiores. As sondas de temperatura, humidade e CO₂ são autónomas enquanto os restantes equipamentos estavam ligados a um sistema de aquisição de dados.

Quadro 4. Equipamento experimental e incertezas.

Grandeza	Gama	Incerteza
Temperatura do ar	-10 °C a 60°C	0,1 °C
Humidade relativa	0 a 100 %	0,8 %rh
Concentração de CO ₂	0 a 10.000 ppm	100 ppm
Velocidade do vento	1 a 96 m/s	0,5 m/s
Rumo do vento	0 a 360°	8°
Radiação superfície horizontal	0 a 2000 W/m ²	20 W/m ²
Anemómetro de turbina	0,25 a 30 m/s	1%
Porta ventiladora – Diferença de pressão	-1250 a 1250 Pa	1%
Porta ventiladora – Caudal de ar	20 a 10365 m ³ /h	4%

4.2. Avaliação experimental das características de ventilação natural das janelas

Para estimar o fluxo de ar através de aberturas é utilizada a expressão 2. Através da realização de ensaios sucessivos de pressurização e despressurização é possível estabelecer as curvas pressão versus caudal e determinar experimentalmente a área livre da abertura.

$$Q=C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho} \quad (2)$$

Em que:

Q – caudal de ar escoado através da abertura em (m³/s);

C_d- coeficiente de descarga da abertura;

A – área livre da abertura (m²);

ΔP – diferença de pressão uniforme na abertura (Pa);

ρ - massa volúmica do ar (kg/m³).

O valor de C_d para aberturas com bordos retos toma o valor típico de 0,61, existindo variações em torno do mesmo (até 1,0), dependendo do tipo de enquadramento do vão, relação largura/altura da abertura, distância ao pavimento e teto e das variações de pressão na abertura. Para as janelas na posição de basculante e na posição de batente, verificou-se que é aplicável a

expressão 2, com uma incerteza de 3%, o que é compatível com as incertezas experimentais e dos equipamentos de medição. Quando se realizou a medição com as proteções solares interiores descidas, verificou-se que existia uma redução do caudal escoado pelas janelas, inferindo-se que a cortina introduz uma perda de carga e reduz a área útil da abertura das janelas em 10% para a posição basculante e em 50% para a posição de batente. Este resultado evidencia a necessidade de considerar o efeito das proteções solares ou outras obstruções no escoamento do ar através das janelas abertas. Quando a janela se encontra na posição de batente o efeito da cortina é maior porque esta encosta à abertura da janela induzindo uma redução mais importante da secção de escoamento do que quando a janela se encontra na posição basculante, em que a cortina encosta pontualmente na janela e não obstrui por completo a secção de escoamento de ar.

Quadro 5. Efeito da cortina na área útil de abertura das janelas.

Abertura da folha	Basculante	Basculante	Batente	Batente
Posição da Cortina	Subida	Descida	Subida	Descida
$A_{livre}/A_{abertura}$	1,0	0,90	1,0	0,50

4.3. Caudal de ventilação mecânica

No decurso das medições realizadas com o sistema de ventilação mecânica ligado, obteve-se um caudal de ar insuflado na sala H010 de 2400 m³/h e um caudal de ar extraído de 1550 m³/h. O caudal de insuflação é 40% superior ao valor de projeto e o caudal de ar extraído é 17% inferior ao caudal de projeto, evidenciando uma regulação insuficiente da instalação, bem como a sala não se encontra em subpressão como pretendido. Para as taxas de ocupação observadas, os caudais de ventilação medidos são 4,5 vezes superiores aos requeridos para assegurar uma concentração média diária (período de ocupação) de 1500 ppm [13].

4.4. Resultados da avaliação experimental do comportamento térmico da sala H010

No Quadro 6 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos na avaliação do comportamento térmico da sala de aula H010 (sala de laboratório). Os resultados referentes à sala reportam-se ao período letivo entre as 8h30 e as 17h00. Os resultados experimentais da avaliação em condições de ventilação natural são apresentados na figura 3 e na figura 4 os resultados da ventilação mecânica. Dos resultados obtidos, pode concluir-se:

- Com as janelas abertas no modo basculante é possível assegurar uma concentração média de CO₂ inferior a 1000 ppm, inferindo-se que a taxa de renovação de ar é satisfatória para esta sala de aula com uma taxa de ocupação de 9 m²/aluno.
- O facto de se ventilar adequadamente a sala de aula (pela abertura das janelas) não conduz a um arrefecimento excessivo (ensaio N2), face aos ensaios em que as janelas permaneceram fechadas (ensaios N3 e N4)
- A utilização do sistema de ventilação mecânica (que neste caso apresenta um caudal de ar novo excessivamente elevado), permite controlar adequadamente a concentração interior de CO₂, conduzindo contudo a um arrefecimento mais relevante do ar interior (cerca de 2°C mais frio do que nos cenários com a ventilação natural.
- Com a ventilação natural através da abertura das janelas, foi estimada uma taxa de renovação de ar média de 1,3h⁻¹, mas chegou-se a alcançar 2,7 h⁻¹. Este caudal foi suficiente para controlar a QAI. Estas taxas de renovação de ar foram estimadas com base na taxa de decaimento da concentração de CO₂.

Em síntese, os resultados experimentais são coerentes com as diferentes estratégias de ventilação adotadas e permitem suportar a avaliação do modelo de simulação térmica.

Quadro 6. Síntese dos resultados dos ensaios na sala H010.

	N1	N2	N3	N4	M1	M2
Dia do ensaio	14-Fev	15-Fev	16-Fev	17-Fev	1 e 2 Mar	5 e 6 Mar
T _{exterior} (°C)	12,9	11,1	12,2	11,6	14,3	15,6
T _{sala} (°C)	15,9	16,2	16,9	16,9	17,5	18,6
CO ₂ sala (ppm)	747	969	>1750	>1580	621	585
N.º Ocupantes	7 (11)	7 (12)	4 (10)	7 (12)	5 (11)	13 (16)

Nota: Valores médios de um dia letivo (8h30 – 17h00). Entre parêntesis ocupantes durante a aula.

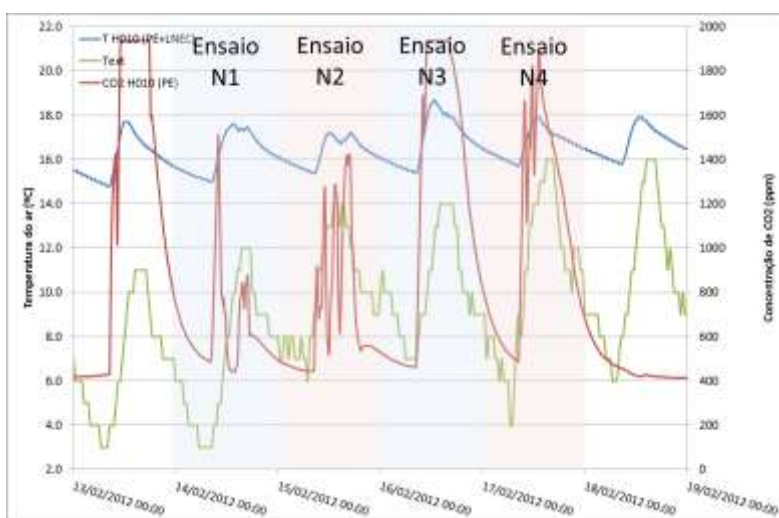


Figura 3. Resultados dos ensaios com ventilação natural.

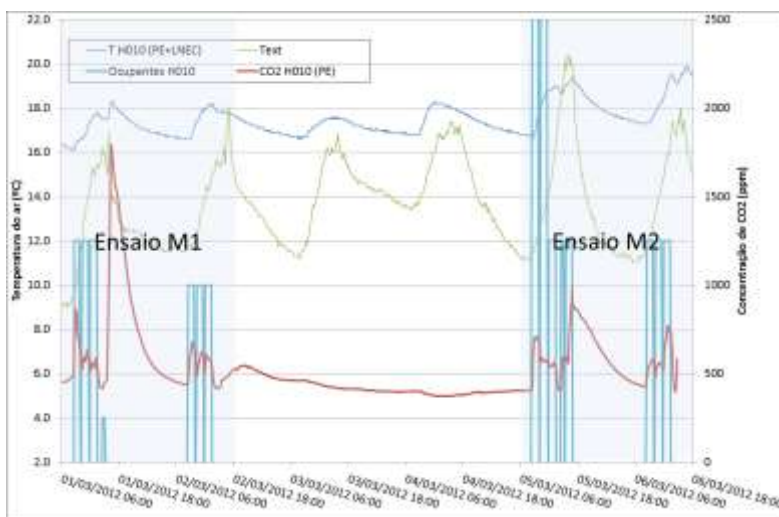


Figura 4. Resultados dos ensaios com ventilação mecânica.

5. MODELO DE SIMULAÇÃO

5.1. Aspetos gerais

Para estudar o edifício e permitir otimizar a sua exploração foi realizado um modelo de simulação térmica e energética utilizando o programa de cálculo *Energyplus* versão 6, que se encontra validado segundo a norma ASHRAE 140. O software *EnergyPlus* resolve as equações de conservação de energia e de massa em regime dinâmico aplicadas a volumes de controlo. Neste trabalho, foi selecionado o método CTF (*ConductionTransfer Function*) e um intervalo de tempo de 15 minutos. Para a transmissão de calor por convecção nas superfícies interiores foi adotado o modelo *Simple*, enquanto para as superfícies exteriores foi adotado o modelo *SimpleCombined*. A simulação do escoamento do ar no edifício foi realizada utilizando uma rede nodal de ventilação (*Airflow network*).

Foi implementado um modelo térmico do bloco H+I considerando a geometria, materiais, equipamento e instalações descritos anteriormente no ponto 3. Na construção das zonas térmicas do modelo foram considerados os seguintes critérios: utilização do espaço, envolvente exterior, sistema de ventilação e climatização e as salas ensaiadas. Assim, o bloco H+I foi subdividido por salas de aula, zonas de circulação e outras áreas como anexos ou sanitários (total de 56 zonas). Neste trabalho optou-se por utilizar uma zona por sala para permitir individualizar os horários de ocupação, de iluminação, de abertura de janelas e portas e de utilização de sistemas de ventilação e climatização. Os dados climáticos para a simulação resultam de uma estação meteorológica afastada cerca de 4,4 km do edifício.

5.2. Ocupação, iluminação, equipamentos e utilização da tela interior de sombreamento dos envidraçados

Na simulação dinâmica considerou-se o mesmo perfil de ocupação da campanha de medição. Atendendo ao tipo de atividade observada, nomeadamente alunos sentados, considerou-se uma atividade metabólica de 108 W (~1 met). Para a iluminação considerou-se a densidade indicada no quadro 3 e que esta se encontrava ligada durante as aulas e desligada durante os intervalos, de acordo com o observado. Relativamente aos equipamentos existentes na sala de aula, foi observado que durante a campanha de medição, tanto o computador do professor como o projetor apresentaram uma utilização pontual. Desta forma, os consumos de energia e os ganhos de calor dos equipamentos não foram considerados na simulação.

Durante os dias de ensaio observou-se que as telas interiores de sombreamento estavam normalmente corridas. Apenas no dia 15 de Fevereiro as telas se encontravam abertas.

5.3. Sistema de ventilação

A simulação do escoamento do ar no edifício foi realizada utilizando uma rede nodal de ventilação (*airflownetwork*). Na Figura 5 apresenta-se um esquema do modelo implementado, com a indicação dos respetivos componentes. Cada sala foi tratada como um volume de controlo. A abertura das janelas foi implementada utilizando um controlo de acordo com o horário identificados nos ensaios (figura 5). No decurso dos ensaios as janelas foram abertas no modo basculante, pelo que na simulação foi adotada uma área livre de $0,9 \times 0,33 \text{ m}^2$ (quadro 5), para considerar o efeito da atuação da proteção solar interior.

A simulação dos ensaios com ventilação mecânica foi realizada impondo os caudais medidos (seção 4.3) através de um horário, continuando a ser simulada a rede de ventilação natural para considerar o efeito das infiltrações de ar e da abertura das janelas. Foi considerado o efeito de recuperação de calor ($\eta=0,50$) e o aquecimento promovido pelo ventilador de insuflação.

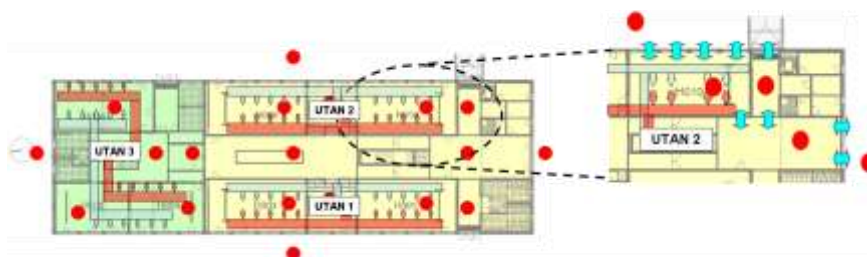


Figura 5. Modelo da rede nodal de ventilação: piso 0 e sala H010

5.4. Apreciação da validade do modelo face aos resultados experimentais

De forma a validar a simulação dinâmica procedeu-se à comparação da temperatura interior registada nos ensaios na escola, com os valores obtidos na simulação dinâmica para a sala H010 (Figura 6 e Figura 7). No quadro 7 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos.

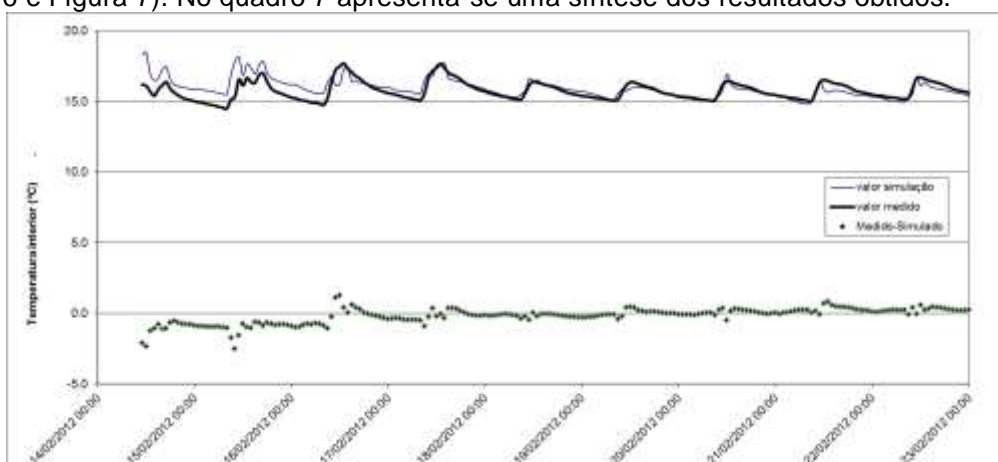


Figura 6. Comparação de valores da temperatura interior medidos e obtidos na simulação dinâmica da sala H010 – ventilação natural.

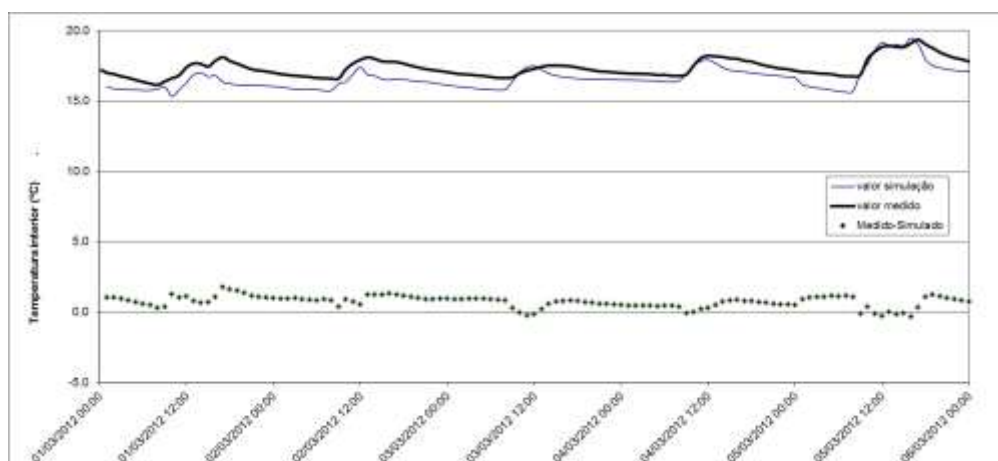


Figura 7. Comparação de valores da temperatura interior medidos e obtidos na simulação dinâmica da sala H010 – ventilação mecânica.

Quadro 7. Comparação entre resultados das campanhas e da simulação dinâmica.

Parâmetro	Ventilação natural		Ventilação mecânica	
	Campanha	Simulação	Campanha	Simulação
T _{média}	15,8°C	16,0°C	17,4°C	16,7°C
T _{máxima}	18,5°C	18,5°C	19,4°C	19,5°C
T _{mínima}	14,5°C	14,8°C	16,2°C	15,3°C
Erro (RMSD)	-	0,6°C	-	0,8°C
Diferença média (D)	-	-0,1°C	-	0,7°C
Diferença máxima (Dmax)	-	2,0°C	-	1,8°C
Diferença mínima (Dmin)	-	-2,5°C	-	-0,4°C

Ao comparar os resultados obtidos na simulação dinâmica com as campanhas experimentais observa-se que existe uma concordância geral dos resultados, sendo estimado um erro (RMSD) de 0,6°C para condição de ventilação natural e de 0,8°C para a simulação com ventilação mecânica. Estes valores satisfazem à condição inicialmente estabelecida do erro (RMSD) não exceder 1°C, típico de trabalhos em células de teste “adiabáticas”.

Contudo, existem diferenças na gama de 1°C, que podem ter explicação nos algoritmos do modelo de simulação, mas também nos dados de entrada e na complexidade do edifício.

Na simulação do edifício com ventilação natural existe uma concordância elevada entre as medições e a simulação quando as janelas se encontram fechadas, face à situação em que as janelas se encontram abertas. Na condição das janelas estarem abertas considera-se que o erro é condicionado pela maior sensibilidade dos luxos de ar às incertezas na velocidade do vento (devido à extrapolação de valores entre a estação meteorológica e a escola) e aos coeficientes de pressão da fachada. Na simulação foi estimada uma taxa de renovação de ar de 1,1 h⁻¹ quando as janelas se encontram abertas, enquanto com base na evolução diária da concentração de CO₂ e na taxa de ocupação é estimada uma taxa de renovação de ar média de 1,3 h⁻¹, o que ajuda a explicar a menor temperatura simulada face à temperatura medida.

Na ventilação mecânica nota-se que a temperatura da simulação é inferior à temperatura medida, inerindo-se que tal se pode dever a um valor da eficiência de recuperação de calor ($\eta=50\%$) inferior ao valor efetivo de recuperação de calor, pois neste caso temos um caudal de ar insuflado maior do que o caudal extraído, o que conduz a um aumento da eficiência de recuperação de calor face ao cenário de equilíbrio entre os caudais de ar insuflados e extraídos.

Esta comparação entre os valores medidos e simulados valida o modelo de simulação térmica desenvolvido para o edifício e mostra que este é adequado para estudar situações de ventilação natural e de ventilação mecânica.

6. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentaram-se os resultados experimentais e numéricos correspondentes ao comportamento térmico passivo de uma sala de aula representativa de um edifício escolar situado em Lisboa e em diferentes cenários de utilização da ventilação natural e da ventilação mecânica. A sala de aula estudada foi uma das que apresentou piores condições de conforto térmico e de qualidade do ar face a levantamentos de campo e a inquéritos realizadas previamente.

Apesar das incertezas experimentais e dos limites do modelo de simulação, neste estudo mostra-se que através de uma caracterização adequada da envolvente, da identificação das taxas de ocupação, do regime de aberturas das janelas e da atuação das proteções solares é possível obter um boa concordância (erro(RMSD) $\leq 1^\circ\text{C}$) entre os resultados das temperaturas do ar das simulações e das medições, compatível mesmo com os erros existentes em alguns ensaios em células de teste e com condições bastante mais controladas.

Estes resultados evidenciam o elevado potencial da ventilação natural através da abertura das

janelas para assegurar a qualidade do ar interior, sem comprometer excessivamente o conforto térmico. Apenas ao princípio das manhãs foram registadas temperaturas inferiores a 16 °C, com temperaturas exteriores mínimas de 16 °C.

O estudo de cenários de melhoria com base neste modelo é apresentado na comunicação [6].

Este estudo foi realizado ao abrigo do programa MIT-Portugal, projeto *Net Zero Energy School- Reaching the Community* (Ref.^a MIT-Pt/SES-SUES/0037/2008) financiado pela FCT, no qual participam o IST, o LNEC e o ICS.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Raftery, M. Keane, J. O'Donnell, "Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology", *Energy and Buildings*, Vol 43, pp 2356-2364, (2011).
- [2] T. Dewson et al, "Model validation using the PASSYS test cells", *Building and Environment*, Vol 28, pp 153-165, (1993).
- [3] A. Pinto, *Aplicação da avaliação do ciclo de vida à análise energética e ambiental de edifícios*, IST, Dissertação de doutoramento, (2008).
- [4] R. Judkoff, J. Neymark, *Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140*, ASHRAE 2006 Annual Meeting, 2006, ASHRAE, Quebec (2006).
- [5] M. Tavares, H. Gonçalves, J. Bastos, *Thermal performance of residential buildings with large glazing areas in lisbon – Modeling and validation*. PLEA 2011, Louvain (2011).
- [6] R. Gomes, A. Pinto, C. Pina dos Santos, *Desempenho térmico e Qualidade do ar interior de salas de aula de uma escola secundária*. Congresso Construção 2012, Coimbra (2012).
- [7] L.M. Matias, C. Pina dos Santos, A. Pinto, *Net Zero Energy School – Reaching the Community, Condições ambientes no período de inverno de 2010*, LNEC, Relatório n.º 180/2010-ES/LNEC, (2010).
- [8] L.M. Matias, C. Pina dos Santos, A. Pinto, *Net Zero Energy School – Reaching the Community, Condições ambientais no período de meia-estação de 2010*. LNEC, Relatório n.º 269/2010-ES/LNEC, (2010).
- [9] R. Gomes, L.M. Matias, C. Pina dos Santos, A. Pinto, *Net Zero Energy School – Reaching the Community, Condições ambientais no período de inverno de 2011*. LNEC, Relatório n.º 293/2011-ES/LNEC, (2011).
- [10] R. Gomes, L.M. Matias, C. Pina dos Santos, *Net Zero Energy School – Reaching the Community, Condições ambientais no período de meia-estação de 2011*. LNEC, Relatório n.º 340/2011-ES/LNEC, (2011).
- [11] Decreto-Lei n.º 79/2008, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), de 4 de abril.
- [12] Decreto-Lei n.º 80/2008, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), de 4 de abril.
- [13] A. Pinto, *Aplicação para determinação de caudal de ar mínimo em regime variável para assegurar a QAI*. Contributos para a QAI e para a eficiência energética nos edifício, LNEC, Relatório, (2012).