

DESEMPENHO TÉRMICO E QUALIDADE DO AR INTERIOR DE SALAS DE AULA DE UMA ESCOLA SECUNDÁRIA

Ricardo Gomes^{1*}, Armando Pinto¹ e C. Pina dos Santos¹

1: Departamento de Edifícios,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil,
Av. do Brasil nº101, 1700-066 Lisboa, Portugal
rgomes@lnec.pt, apinto@lnec.pt, pinasantos@lnec.pt, <http://www.lnec.pt>

Palavras-chave: Conforto térmico, Ventilação, Qualidade do ar interior, Simulação numérica

Resumo. *Tem-se registado um aumento continuado dos consumos de energia nos edifícios em Portugal, sustentado em parte, pela alteração dos padrões de conforto e a utilização cada vez maior de equipamentos. As preocupações de conservação de energia e da eficiência energética, quer na perspetiva de redução do impacte ambiental, quer da dependência energética externa, conduziu a União Europeia à publicação da Diretiva sobre a eficiência energética nos edifícios em 2002 e à sua recente reformulação em 2010. A eficiência energética nos edifícios envolve uma componente tecnológica e aspetos comportamentais dos ocupantes.*

As escolas, atendendo à sua utilização predominantemente diurna, são edifícios cujo consumo de energia pode ser minimizado através de uma envolvente adaptada ao clima e de uma adequada utilização pelos seus ocupantes. Encontra-se a decorrer um projeto de investigação no qual se está a estudar uma escola secundária de Lisboa, remodelada ao abrigo do Programa de Modernização das Escolas do Ensino Secundário, dirigido pela Parque Escolar, E.P.E. Este projeto, entre outros objetivos, visa avaliar a influência de fatores relevantes no consumo de energia da escola e identificar medidas de melhoria de conforto dos seus utilizadores.

Com a remodelação da escola em estudo, a envolvente dos edifícios foi objeto de alterações significativas, realçando-se: a melhoria do isolamento térmico das paredes, da cobertura e das janelas e a alteração de janelas e dos respetivos dispositivos de proteção solar. Para assegurar a satisfação dos requisitos regulamentares foram instalados sistemas de climatização na maioria dos espaços interiores.

Neste artigo apresentam-se os resultados obtidos da simulação térmica computacional de um bloco da escola. Foram analisados diferentes cenários comportamentais adotados (ou a adotar) pelos ocupantes, ao nível da atuação de portas e janelas (ventilação passiva); da atuação da proteção solar (ganhos térmicos e iluminação natural) e da iluminação artificial. Em função desses resultados foi avaliado o impacte dos diferentes cenários estudados nas condições de conforto, qualidade do ar interior e nos consumos energéticos estimados.

As conclusões deste artigo apontam para um potencial de poupança energética reduzido, mas também para o estabelecimento de práticas de funcionamento da escola e comportamentais que asseguram uma boa qualidade do ar e o conforto térmico dos seus ocupantes.

1. INTRODUÇÃO

Tem-se registado um aumento continuado dos consumos de energia nos edifícios em Portugal, sustentado, em parte, pela alteração dos padrões de conforto e pela utilização crescente de equipamentos. As preocupações de conservação de energia e de eficiência energética, na perspetiva de redução do impacte ambiental e da dependência energética externa, conduziu a União Europeia à publicação da Diretiva sobre a eficiência energética nos edifícios em 2002 [1] e à sua recente reformulação em 2010 [2]. A eficiência energética nos edifícios envolve uma componente tecnológica (muito valorizada na regulamentação nacional atual), e aspetos comportamentais dos ocupantes. Efetivamente, vários estudos mostram que os comportamentos podem afetar significativamente o consumo de energia.

As escolas, atendendo à sua utilização predominantemente diurna, são edifícios cujo consumo de energia pode ser minimizado através de uma envolvente adaptada ao clima e de uma adequada utilização pelos seus ocupantes [3]. Encontra-se a decorrer um projeto de investigaçãoⁱ no qual se está a estudar uma escola secundária de Lisboa [4],[5],[6] e[7]. A escola estudada faz parte de um conjunto de edifícios de ensino integrados no Programa de Modernização das Escolas do Ensino Secundário (Fase 2) dirigido pela empresa Parque Escolar, E.P.E, tendo a sua reabilitação terminado no início de 2011. Um dos objetivos deste projeto visa avaliar a influência de medidas passivas e ativas no conforto térmico e na qualidade do ar interior.

Com a remodelação da escola em estudo, a envolvente dos edifícios foi objeto de alterações significativas, realçando-se: a melhoria do isolamento térmico das paredes, da cobertura e das janelas e a alteração do tipo de janelas e dispositivos de proteção solar. Para assegurar a satisfação dos requisitos regulamentares relativos a condições de conforto térmico, a caudais de ar novo e a índices de eficiência energética (IEE), foram instalados sistemas de climatização, sobretudo de aquecimento e de ventilação mecânica na maioria dos espaços interiores.

Num outro artigo [8] são apresentados os resultados das medições experimentais efetuadas e a validação de um modelo de simulação térmica, do bloco H+I dessa escola. Este bloco foi selecionado como objeto de estudo por ter apresentado condições menos favoráveis, quer de conforto térmico quer de qualidade do ar interior. Os principais problemas de conforto registados foram a ocorrência de períodos com sobreaquecimento, na meia-estação [7], e a baixa qualidade de ar interior no período de inverno [6].

Neste artigo apresentam-se os resultados da análise da simulação de cenários a adotar pelos ocupantes com vista a melhorar as condições ambientes interiores nomeadamente: atuação de portas e de janelas (ventilação passiva); atuação da proteção solar (ganhos térmicos e iluminação natural) e padrão de recurso à iluminação artificial.

2. CASO DE ESTUDO

2.1. Descrição dos espaços estudados

A escola secundária estudada está situada em Lisboa, tendo sido intervencionada pela empresa Parque Escolar, entre 2009 e 2011, registando-se alterações significativas, nomeadamente: renovação (em alguns casos ampliação) dos espaços; alteração da disposição e funcionalidade dos espaços interiores e correção de eventuais anomalias existentes. Relativamente ao comportamento térmico dos edifícios é importante realçar a aplicação de isolamento térmico nos novos blocos, tanto nas paredes exteriores como nas coberturas, e a substituição das janelas

ⁱ - 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) cofinanciado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), e no qual participam o Instituto Superior Técnico (IST), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto de Ciências Sociais (ICS).

existentes por outras, com diferentes caixilharias, vidros e dispositivos de proteção solar. O bloco em estudo, H+I, é uma ampliação do antigo bloco I e é constituído por dois pisos. O bloco divide-se em duas zonas, H e I, sendo a zona H uma área onde se localizam as salas de laboratório. Na zona I situam-se as salas de desenho. O bloco apresenta três tipos de sala de aula: “salas de laboratório” “salas de desenho 1” e “salas de desenho 2” (Quadro 1). Na figura seguinte (Figura 1) apresenta-se as plantas do bloco H+I.

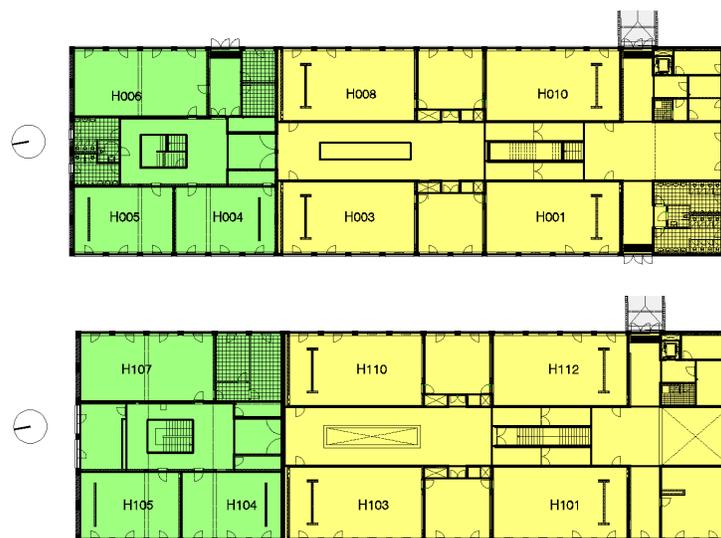


Figura 1. Bloco H (a amarelo) + I (a verde) plantas do piso 0 e 1

A envolvente exterior do edifício influencia o comportamento térmico das zonas. Refira-se que o edifício é sombreado, parcialmente, a nascente por outro bloco e a poente por um muro exterior.

2.2. Caracterização das salas de aulas do bloco H e I

No Quadro 1 sintetiza-se a informação relativa às salas de aulas do bloco H+I. No quadro referem-se as áreas úteisⁱⁱ dos pavimentos e dos vãos envidraçados.

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

Sala de aula	Área de pavimento (m ²)	Área de fachada (m ²)	Área dos vãos envidraçados (m ²)
Salas de laboratório	103	38	17,4
Salas de desenho 1	71	28	13,1
Salas de desenho 2	95	38	17,4

Nota: O pé-direito das salas (medido em desenhos de corte do projeto de Arquitetura) é de 2,70m

2.3. Soluções construtivas

As soluções construtivas predominantes da envolvente exterior do bloco H+I são as seguintes:

ⁱⁱ - Valores medidos em planta do projeto de Arquitetura.

- parede exterior constituída por duplo pano de alvenaria de tijolo furado (ou de alvenaria de blocos de betão no pano interior), isolamento em placas de poliestireno expandido extrudido (40 mm) e caixa de ar.
- A cobertura em terraço apresenta a seguinte constituição, do exterior para o interior: revestimento sobre isolamento em lâ de rocha (50 mm) e betonilha de regularização; laje de betão; espaço de ar; isolamento em lâ de rocha (40 mm) e placas de gesso cartonado perfurado (teto).
- O pavimento intermédio (entre pisos) é constituído por: revestimento vinílico sobre massa de regularização; laje de betão; espaço de ar; isolamento em lâ de rocha (40 mm) e placas de gesso cartonado perfurado (teto).
- O pavimento térreo é constituído por: massame de betão; membrana de betume polímero; isolamento térmico com placas de poliestireno extrudido (60 mm); manta geotêxtil; betonilha armada com camada de regularização, e revestimento interior vinílico.

No quadro seguinte apresentam-se as características das soluções construtivas predominantes da envolvente exterior do bloco em estudo.

Quadro 2. Características das soluções construtivas existentes

Solução construtiva	Espessura total (m)	Coefficiente de transmissão térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Massa superficial útil (kg/m^2) ⁱⁱⁱ
Parede exterior	0,46	0,43	150
Cobertura em terraço	0,45	0,37	2
Pavimento intermédio	0,42	0,59	225
Pavimento térreo	0,47	0,54	150

2.4. Vãos envidraçados e proteção solar

As salas de aula estudadas apresentam vãos envidraçados (vidro duplo) constituídos por três folhas, sendo as folhas das extremidades fixas e a folha do meio oscilo-batente. Cada folha tem 1,60 m de altura e 1,00 m de largura (incluindo caixilharia). A caixilharia e o aro dos vãos envidraçados são em perfis de alumínio. A proteção solar dos vãos envidraçados exteriores é realizada por telas interiores de cor clara. No Quadro 3 indicam-se as características relevantes dos vãos envidraçados.

Quadro 3. Características dos vãos envidraçados exteriores das salas de aula

Coefficiente de transmissão térmica ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Fator solar	Transmitância visível
3,3	0,5	0,7

2.5. Sistema de climatização e de ventilação

Com a remodelação da escola, instalou-se no bloco H+I um sistema centralizado de climatização e ventilação. O sistema principal de climatização e ventilação é do tipo “tudo ar”, com unidades de tratamento de ar na cobertura que distribuem o ar para as salas através de condutas. A insuflação e a extração nas salas de aula do bloco H+I são feitas por grelhas e condutas circulares colocadas ao nível do teto. O sistema de climatização instalado nestas salas prevê apenas a possibilidade de aquecimento, podendo também só ventilar os espaços com ar exterior. A ventilação natural é possível em todas as salas, uma vez que estas têm janelas na respetiva fachada exterior (exposição simples), dotadas de folhas fixas e de folhas oscilo-batentes.

ⁱⁱⁱ - Cálculo da massa superficial útil de acordo com o Decreto-Lei 80/2006, RCCTE [9]

3. METODOLOGIA

A simulação dinâmica, validada pelos resultados obtidos das campanhas de medições na escola [8], permite a comparação de diferentes cenários de ações passivas e de mudanças comportamentais por parte dos alunos, professores e funcionários.

A definição do cenário real de utilização do edifício servirá de base para a validação do modelo e para efetuar a comparação com outros cenários. Assim, para o cenário real é necessário definir com a maior exatidão possível as condições reais de utilização do edifício. Nesse sentido procedeu-se a visitas técnicas ao local e ao diálogo com professores, alunos e funcionários analisando-se as rotinas existentes bem como o funcionamento dos equipamentos instalados.

A simulação dinâmica do bloco H+I, requereu a construção de um modelo geométrico computacional representativo do edifício. A construção deste modelo baseou-se nos elementos do projeto de Arquitetura, nomeadamente plantas, cortes e pormenores construtivos. O modelo do bloco H+I (Figura 2) foi construído com o software *GoogleSketchup* versão 7.



Figura 2. Vistas nascente e poente do modelo bloco H+I

A análise das cargas térmicas do edifício foi realizada com o software *EnergyPlus* versão 6. Na execução do modelo geométrico foi essencial definir as zonas térmicas de simulação, tendo-se, para tal, considerado os seguintes critérios: utilização do espaço; localização da zona relativamente ao exterior; sistemas de climatização e ventilação e resultados das campanhas experimentais efetuadas. Assim, as zonas térmicas foram divididas por salas de aula, circulações e outras áreas, como anexos ou sanitários. O facto de não se terem agregado várias zonas do mesmo tipo, como é comum em alguns trabalhos, permite especificar para cada zona diferentes horários de ocupação, de iluminação, de abertura de janelas e portas, e de utilização de sistemas de climatização e ventilação. Deste modo é possível analisar com maior detalhe cenários com diferentes medidas de intervenção [10].

De forma a poder simular o comportamento térmico do bloco H+I foi necessário definir as cargas térmicas do edifício que neste caso estão relacionadas com:

- ganhos internos resultantes da ocupação pelos alunos e professores e da iluminação artificial;
- ganhos/perdas de calor associados às infiltrações e à ventilação (natural e mecânica);
- transferência de calor através dos elementos opacos da envolvente;
- ganhos solares diretos através dos vãos envidraçados;

A seguir discriminam-se os diferentes perfis horários considerados para o cenário real.

3.1. Horário de ocupação das salas de aula

Na simulação dinâmica considerou-se que cada aula tem 12 ocupantes (aulas por turnos) visto que este foi o número médio observado nas aulas, aquando da realização dos levantamentos na escola. Considerou-se também, que a atividade metabólica é de 108 W/ocupante referente uma pessoa sentada a escrever [11].

O horário de ocupação (alunos, professores e funcionários) considerado para as diferentes zonas térmicas foi definido tendo por base um horário típico deste bloco, com aulas de manhã e de tarde, compreendendo os intervalos entre aulas e o intervalo de almoço. As aulas começam às 8:30 e terminam às 17:00.

O edifício só se encontra ocupado durante os dias de semana e durante os períodos letivos. Os períodos de férias foram também considerados, tendo em atenção que as aulas começam dia 8 de setembro e acabam dia 9 de junho. Nas zonas de circulação, salas de apoio e casas de banho não foi considerada a presença de ocupantes.

3.2. Horário e potência de iluminação artificial

De forma a definir as potências de iluminação para cada zona térmica analisou-se o projeto de iluminação da escola, apresentando-se no Quadro 4 os valores de densidade de iluminação:

Quadro 4. Densidades de iluminação das salas de aula (W/m²)

Sala de aula do bloco H+I	Densidade de iluminação (W/m ²)
Sala de laboratórios	8,7
Sala de desenho 1	11,5
Sala de desenho 2	9,5

Na simulação, os horários relativos à utilização da iluminação artificial foram os horários das aulas.

3.3. Funcionamento do sombreamento interior das janelas

Durante os levantamentos realizados nas campanhas de medição de inverno e de meia-estação observou-se que os professores, normalmente, preferiam que os dispositivos de sombreamento dos vãos envidraçados estivessem ativados (telas corridas). Assim, na simulação dinâmica do cenário real considerou-se que os dispositivos de sombreamento estavam sempre ativados.

3.4. Abertura das janelas e portas/Ventilação Natural

No decorrer das campanhas de medição realizadas, observou-se a atuação dos professores, das funcionárias e dos alunos, sobre as janelas exteriores e as portas das salas de aula. Para efeitos da simulação dinâmica do cenário real do bloco H+I, considerou-se o seguinte:

- as salas de aula do bloco H+I têm ou três ou quatro vãos envidraçados. De acordo com observações efetuadas nas campanhas de medição, considerou-se que, no inverno, apenas são abertas duas janelas, no modo oscilante^{iv}. No período de meia-estação considerou-se que duas das janelas da sala se encontravam abertas no modo oscilante e outras duas totalmente abertas. Nas salas com apenas três janelas, considerou-se que duas janelas estavam no modo oscilante inverno e que na meia-estação a outra janela estava totalmente aberta;
- em qualquer período do ano, as janelas são fechadas quando não há aulas no bloco;

^{iv} - Apenas quando a temperatura da sala é superior a 22 °C. A atribuição deste valor é empírica, representando o comportamento habitual da maioria dos professores observado no decorrer das aulas.

- durante as aulas as portas das salas de aula encontram-se normalmente fechadas. As portas só são abertas nos intervalos. Considerou-se que as portas das salas são abertas 5 minutos após o término da aula e 5 minutos antes do início das aulas.

3.5. Climatização e ventilação

Nas campanhas de medição efetuadas durante os anos letivos de 2010/2011 e 2011/2012, o sistema de ventilação e climatização raramente foi utilizado, salvo no final do ano letivo (só ventilação), e em alguns testes do sistema durante o ano. Tendo em conta a previsível escassa utilização do sistema (por razões económicas), considerou-se que no cenário real o sistema estava também desligado, sendo feito o arejamento das salas assegurado apenas por ventilação natural. Todavia, com o intuito de verificar o efeito da ventilação mecânica no período de *arrefecimento* (em modo *free cooling*), o funcionamento do sistema existente foi simulado.

4. CENÁRIOS

Ao utilizar a simulação dinâmica computacional foi possível estudar vários cenários alternativos de intervenção na escola (com o objetivo de contribuir para a melhoria das condições ambientais), através de diferentes medidas (mudanças comportamentais, abertura/fecho de janelas e proteções solares).

Ao definir os cenários é essencial ter em conta a exequibilidade das medidas de intervenção, pois por se tratar de um edifício escolar existem limitações relacionadas com a segurança e rendimento escolar dos utilizadores do edifício. A comparação dos vários cenários alternativos com o cenário real é efetuada com base na temperatura do ar interior dos espaços.

Para além de alternativas comportamentais dos utentes do edifício, foi estudado um cenário em que o edifício apresenta uma envolvente física diferente da real, para estudar os seus efeitos no conforto térmico e na qualidade do ar dos espaços. Como o edifício foi recentemente reabilitado, a análise de diferentes cenários da envolvente exterior serve apenas para comparar resultados, não tendo o intuito de propor medidas relacionadas com a alteração da envolvente.

Analisou-se também um cenário (base), em que o bloco apresenta as condições de referência propostas na regulamentação em vigor para estabelecimentos de ensino [12]. De referir que neste cenário não se considerou a climatização dos espaços, apenas a ventilação dos mesmos.

No quadro seguinte apresentam-se os vários cenários:

Quadro 5. Cenários analisados através de simulação dinâmica

Cenário	Descrição	Envolvente física	Ventilação	Iluminação e proteção solar dos envidraçados
Cenário real	Cenário real	Real	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado)	Iluminação com horário das aulas, proteção solar através da solução existente sempre ativada
Cenário base	Densidade de ocupação, iluminação e de equipamentos e infiltração definidas no RSECE [12]	Real	0,6 renovações de ar por hora	horário RSECE [12]
Cenário A	Cenário que privilegia a melhoria da qualidade do ar interior das salas, através da abertura de portas no intervalo e de janelas no modo oscilante durante a noite	Real	Portas abertas no intervalo e durante o período de <i>arrefecimento</i> são abertas duas janelas no modo oscilante também durante a noite	Iluminação com horário das aulas, proteção solar através da solução existente sempre ativada

Cenário	Descrição	Envolvente física	Ventilação	Iluminação e proteção solar dos envidraçados
Cenário B	Envolvente física diferente da real, considerando-se sombreamento dos vãos através de palas verticais e proteção solar exterior.	Palas verticais entre os vãos envidraçados, e proteção solar exterior	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado)	Iluminação com horário das aulas, proteção solar através de palas verticais e proteção exterior dos envidraçados
Cenário C	Cenário que analisa a influência da utilização de telas interiores e da iluminação artificial de acordo com a orientação da salas de aula.	Real	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado)	Iluminação desligada nas salas a nascente de manhã (só depois das 9:00 no período de <i>aquecimento</i>) e desligada nas salas a poente à tarde (até às 16:00 no período de <i>aquecimento</i>). Telas abertas de manhã a nascente e de tarde a poente
Cenário D	Cenário direcionado para o arrefecimento do edifício na meia-estação, considerando as janelas totalmente abertas na meia-estação	Real	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado durante o período de inverno e janelas totalmente abertas na meia-estação)	Iluminação com horário das aulas, proteção solar através da solução existente sempre ativada
Cenário E	Cenário que considera <i>free cooling</i> (arrefecimento com ar exterior) durante a noite para arrefecimento da sala de aula	Real	Ventilação mecânica: <i>free cooling</i> à noite (caudais de insuflação de projeto) das 5:00 às 9:00 no período de <i>arrefecimento</i>	Iluminação com horário das aulas, proteção solar através da solução existente sempre ativada

5. RESULTADOS E COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS

A comparação de cenários foi efetuada tendo em conta os dois períodos considerados mais relevantes na análise de conforto térmico dos utentes: os períodos de *aquecimento* (meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) e de *arrefecimento* (meses de abril, maio, junho e setembro). Como já foi referido anteriormente, a comparação incide sobre as temperaturas do ar interior registadas e as diferenças obtidas relativamente ao cenário real. É importante realçar que os valores apresentados representam a média da temperatura interior durante o período de aulas (das 8:30 às 17:00). De seguida apresentam-se as temperaturas interiores obtidas para os períodos de *arrefecimento* e de *aquecimento* (Figura 3 e Figura 4).

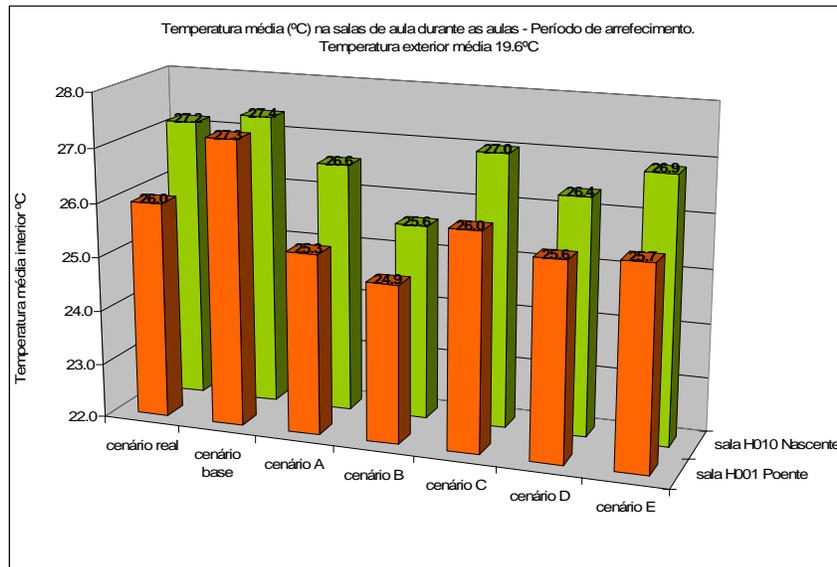


Figura 3. Período de *arrefecimento* – comparação de cenários

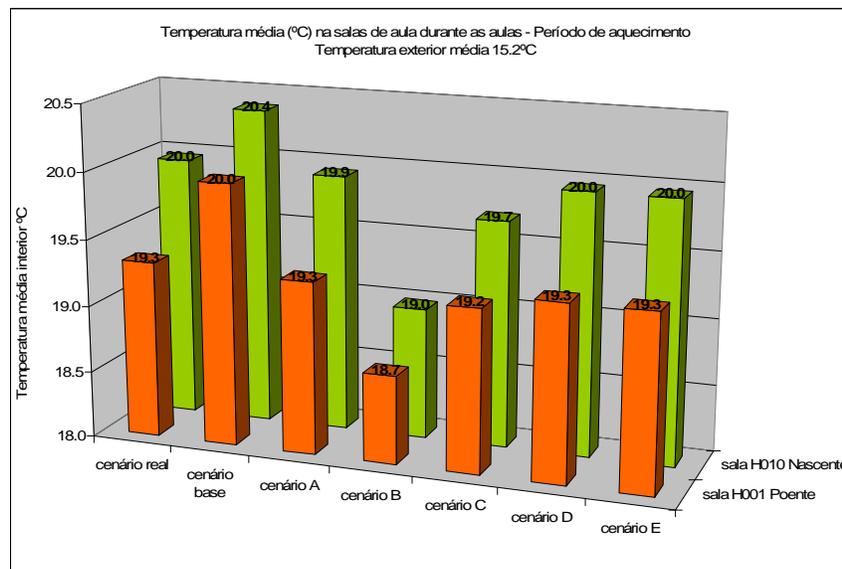


Figura 4. Período de *aquecimento* – comparação de cenários

Com o objetivo de verificar a influência da orientação solar nas salas, foram consideradas duas salas semelhantes, ambas do piso 0, com orientações opostas (nascente e poente). Ao analisarem-se os resultados das Figura 3 e Figura 4 constata-se que em todos os cenários estudados a temperatura interior média das salas durante as aulas é superior na sala orientada a nascente, tal como se observou nos resultados das campanhas de medição [8]. Tendo em conta que os ganhos internos das salas são independentes da orientação, a diferença está relacionada

com os ganhos/perdas de calor para o exterior. Devido ao bom isolamento térmico das paredes exteriores e à boa estanquidade das caixilharias, os ganhos de calor conduzem a um aumento da temperatura das salas a nascente, desde as primeiras horas do dia. Acresce o facto das salas a poente estarem parcialmente sombreadas por um muro exterior. De seguida apresenta-se uma breve análise dos resultados obtidos em cada um dos cenários:

Cenário real - A temperatura interior média obtida para as salas em estudo, no período de *aquecimento*, foi de 19,7 °C. No período de *arrefecimento* observaram-se temperaturas interiores elevadas nas salas, conforme se tinha constatado em campanhas de medição realizadas na escola [7]. Neste período a temperatura média nas salas estudadas, foi de 26,6 °C, chegando a 27,2 °C na sala a nascente.

Cenário base: ganhos internos e taxas de renovação de ar de acordo com RSECE: - Ao analisar os resultados obtidos na simulação quando considerados os valores definidos no RSECE [12] constata-se que comparativamente com o cenário real, o cenário base apresentou temperaturas interiores mais altas em ambos os períodos em análise.

Cenário A: portas abertas no intervalo das aulas e duas janelas abertas no modo oscilante durante a noite - Este cenário, orientado para a melhoria da qualidade do ar, não apresentou diferenças significativas relativamente às temperaturas interiores médias obtidas no cenário real. No período de *aquecimento*, em que se considerou a abertura das portas das salas para o átrio, não se obtiveram diferenças comparativamente com o cenário real. No período de *arrefecimento*, além da abertura da porta no intervalo, considerou-se a abertura de duas janelas no modo oscilante durante a noite. Neste caso, a diferença obtida nas temperaturas médias, comparada com o cenário real, foi de menos 0,6 °C.

Cenário B: sombreamento exterior por palas verticais e proteção solar exterior dos vãos envidraçados - A alternativa proposta para a envolvente exterior do bloco, nomeadamente a consideração de palas verticais entre os vãos envidraçados e o sombreamento exterior dos mesmos, apresentou diferenças consideráveis na temperatura interior das salas. A diminuição da temperatura foi em média 0,8 °C no período de *aquecimento* e 1,4 °C no período de *arrefecimento*.

Cenário C: utilização da iluminação e das telas interiores de acordo com a orientação da sala de aula - Esta opção não se traduz em diferenças da temperatura interior das salas de aula. Apesar de neste cenário os ganhos internos resultantes da iluminação artificial serem menores, como as telas interiores estão abertas obtêm-se maiores ganhos solares através dos vãos envidraçados.

Cenário D: Janelas totalmente abertas na meia-estação - As temperaturas médias interiores obtidas neste cenário, em que se considera que as janelas do estariam totalmente abertas durante as aulas no período de *arrefecimento*, são inferiores às temperaturas obtidas no cenário real (0,6 °C). A diferença não é maior porque, já é comum a abertura total de duas janelas (cenário real). De realçar que a diferença na sala orientada a poente é superior.

Cenário E: free cooling das 5h00 às 9h00 no período de arrefecimento - A opção de deixar o sistema de ventilação a insuflar ar exterior durante a noite, apenas resulta numa diminuição da temperatura interior nas primeiras aulas do dia. Tal como acontece com a abertura de janelas no modo oscilante durante a noite, quando comparados os valores médios de temperatura interior ao longo do dia não se verificam diferenças significativas em relação ao cenário real.

6. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados obtidos nos vários cenários de intervenção simulados, é possível tirar algumas conclusões sobre o potencial de intervenção no bloco H+I.

Um aspeto que influencia os resultados dos vários cenários de intervenção, está relacionado com a envolvente física do bloco H+I. De facto, após a remodelação da escola, esta apresenta um

significativo isolamento térmico na envolvente opaca exterior e baixas taxas de renovação de ar, especialmente devido às novas caixilharias dos vãos envidraçados. Estas intervenções no edifício conduziram a trocas de calor com o exterior baixas, traduzindo-se em temperaturas altas mesmo no período de *aquecimento* em que a temperatura média foi superior a 19 °C nos cenários em que foi considerada a envolvente opaca real. No período de *arrefecimento*, observaram-se também temperaturas interiores altas, mesmo nos períodos em que duas janelas estavam abertas e a temperatura exterior era inferior à interior, concluindo-se que a renovação natural não foi suficiente para evitar que as temperaturas interiores descessem significativamente.

O cenário base, que considera as condições definidas no RSECE [12], apresentou temperaturas interiores ligeiramente mais altas que as do cenário real. Esta diferença está relacionada com a consideração de maiores taxas de ocupação e com a utilização de equipamentos elétricos. Comparando com o intervalo de referência (20-25 °C) de temperatura interior definido no RSECE [12], constata-se que no período de *arrefecimento* os valores obtidos excedem em aproximadamente 2 °C o limite de 25 °C. De acordo com os resultados da simulação conclui-se que, nas condições definidas no regulamento, seria necessário o recurso à climatização artificial para que a sala atingisse as temperaturas de referência.

No cenário que privilegia a qualidade do ar interior (cenário A) obtiveram-se temperaturas interiores, no período de *arrefecimento*, ligeiramente inferiores às do cenário real. Denote-se que, nesse período, as primeiras aulas da manhã apresentaram temperaturas mais baixas devido ao facto de se ter considerado que duas janelas ficavam abertas (oscilantes) durante a noite, mas ao longo do dia a temperatura interior sobe, devido aos ganhos internos e solares, sendo então equiparável, em termos médios, ao valores obtidos no cenário real. Como a abertura de janelas durante a noite pode colocar problemas relacionados com a segurança da escola e não se prevendo diminuições significativas da temperatura interior da sala de aula, exceto nas primeiras aulas da manhã, esta medida pode ser considerada pouco interessante. É importante referir que, no que respeita à qualidade do ar interior, apesar da taxa de renovação do ar observada nas campanhas de medição [8] com porta interior e janelas fechadas (condições normais durante a noite) ser baixa, permite que a concentração de CO₂, no início das aulas, seja bastante satisfatória (500-600 ppm) [8].

Relativamente à abertura de portas interiores durante o intervalo das aulas, apesar de não se refletir na temperatura das salas (devido ao tempo de abertura reduzido), pode em casos de excessiva concentração de CO₂ na sala, juntamente com a abertura de janelas, ter um papel importante na melhoria da qualidade do ar interior [8]

No cenário B, em que se estuda o comportamento térmico do edifício considerando palas verticais e proteção solar dos envidraçados pelo exterior, verificou-se uma diminuição da temperatura média interior das salas de aula, devido à diminuição dos ganhos solares. Contudo, tendo em conta que a escola foi recentemente reabilitada, a análise deste cenário foi meramente académica, uma vez que implica a realização de novas obras no edifício.

O cenário C, em que se considera a iluminação artificial e a abertura das telas interiores de acordo com a orientação da sala de aula, não apresenta vantagens a nível de conforto térmico. Todavia poderá ser estudado numa perspetiva de poupança energética para a escola, se garantidos os níveis mínimos de iluminação natural e não surgirem problemas de encadeamento.

O cenário D, que considera a abertura total das janelas durante o período de *arrefecimento* (das 8h20 às 17h00) apresentou menores temperaturas interiores que o cenário real. Este cenário, apresenta limitações por questões de segurança, tendo por isso, de ser considerado com precaução. A abertura total das janelas poderá exigir novos comportamentos (vigilância) por parte dos funcionários da escola.

Ao analisar os cenários propostos, conclui-se que o potencial de intervenção no bloco H+I, no que respeita à melhoria do conforto térmico e da qualidade interior das salas de aula, é reduzido. As razões para tal, estão principalmente relacionadas com a remodelação da envolvente do

edifício, e com questões de segurança e de rendimento escolar dos alunos. No entanto, concluiu-se que para melhorar a qualidade do ar interior, situação mais problemática no período de *aquecimento* [6], poderá considerar-se a abertura de portas e de janelas nos intervalos de forma a proceder ao arejamento das salas de aula [8]. Relativamente ao sobreaquecimento, recomenda-se a abertura de janelas durante todo o dia (se possível). Outra hipótese, embora com custos e só com melhoria nas primeiras aulas da manhã, seria a utilização do sistema de ventilação a insuflar ar exterior nas salas durante o período noturno – *free cooling* (cenário E). O potencial de poupança energética do bloco H+I também se afigura baixo. De realçar, que atualmente a escola não utiliza os sistemas de climatização e ventilação por questões económicas, estando os consumos energéticos associados principalmente à iluminação artificial (no caso do bloco H+I) e à utilização pontual de equipamentos.

REFERÊNCIAS

- [1] *Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios*. Jornal Oficial das Comunidades Europeias (JOCE), L1, pp. 65-71, (2003).
- [2] *Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)*. Jornal Oficial da União Europeia (JOUE), L153, pp. 13-35, (2010).
- [3] Carvalho, L. e Paiva, J.A.V., “Regras de qualidade relativas ao conforto térmico dos edifícios escolares”. 1.º Projeto. LNEC, Lisboa (1979).
- [4] Matias, L.M.; Santos, C. Pina e Pinto, A. T. “Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientes no período de inverno de 2010”. LNEC, Lisboa, (2010).
- [5] Matias, L.M.; Santos, C. Pina e Pinto, A. T. “Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientais no período de meia-estação de 2010”. LNEC, Lisboa, (2010).
- [6] Gomes, R.M.; Matias, L.M.; Santos, C. Pina e Pinto, A. T. “Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientais no período de inverno de 2011”. LNEC, Lisboa, (2011).
- [7] Gomes, R.M.; Matias, L.M. e Santos, C. Pina; “Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientais no período de meia-estação de 2011”. LNEC, Lisboa, (2011).
- [8] Pinto, A. T.; Gomes, R.M. *Avaliação experimental e simulação numérica da ventilação de salas de aula de uma escola secundária*, ITECONS, Construção 2012, Coimbra (2012),
- [9] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, DL n.º 80/2006, de 4 de abril. Diário da República n.º 67, I SÉRIE-A, pp. 2468 a 2513.
- [10] Raftery, P.; Keane, M.; O'Donnell, J.; *Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology*. (2011).
- [11] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbook of Fundamentals, p. 8. (2005).
- [12] Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios. DL n.º 79/2006, de 4 de abril. Diário da República n.º 67, I SÉRIE-A, pp. 2416 a 2468.