



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONSELHO DIRETIVO
Projecto Especial Edificação Sustentável

Proc. 5101/14/17250

NET ZERO ENERGY SCHOOL – REACHING THE COMMUNITY

Escola Secundária Vergílio Ferreira

**Simulação computacional dinâmica do comportamento térmico
e de cenários de melhoria do conforto ambiente do bloco H+I**

Projecto MIT-Pt/SES-SUES/0037/2008

Lisboa • março de 2013

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 265/2013 – CD/ES

Net Zero Energy School – Reaching the Community
ESCOLA SECUNDÁRIA DE VERGÍLIO FERREIRA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DINÂMICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO
E ANÁLISE DE MEDIDAS DE MELHORIA DO CONFORTO AMBIENTE DO
BLOCO H+I

RESUMO

Ao abrigo do programa MIT-Portugal desenvolveu-se um projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) denominado “Net Zero Energy School – Reaching the Community” (Ref.^a MIT-Pt/SES-SUES/0037/2008), no qual participam o Instituto Superior Técnico (IST), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto de Ciências Sociais (ICS).

Um dos objetivos deste projeto é avaliar o impacto de ações, ativas e passivas, na melhoria das condições de conforto ambiente e de eficiência energética implementadas numa escola “tradicional”.

Numa primeira fase do projeto de investigação em curso, procedeu-se à caracterização da escola antes da intervenção, com a realização de diversos levantamentos pontuais das condições ambientes interiores. Após o início da intervenção de reabilitação da escola executaram-se novas campanhas de medições com o intuito de avaliar o impacto resultante das obras de reabilitação da escola.

Com vista a minimizar situações assinaladas de desconforto térmico dos alunos e de má qualidade do ar interior nas salas de aula, procedeu-se à simulação computacional dinâmica do bloco H+I.

Na simulação dinâmica foram estudados vários cenários de intervenção ao longo do ano, avaliando o potencial de medidas ativas e passivas na melhoria do conforto térmico dos alunos e da qualidade do ar interior das salas de aula.

Com base nos resultados da simulação dinâmica, tentou-se traçar uma linha orientadora de medidas passivas e de alterações comportamentais dos utentes da escola, que conduza à melhoria das condições de conforto, sem comprometer as questões económicas e de sustentabilidade.

No presente documento apresenta-se a análise dos resultados obtidos da simulação dinâmica do comportamento térmico da escola.

Net Zero Energy School – Reaching the Community
VERGÍLIO FERREIRA'S SCHOOL
**DYNAMIC COMPUTER SIMULATION OF THERMAL BEHAVIOR AND
SCENARIOS TO IMPROVE ENVIRONMENTAL COMFORT IN BUILDING H+I**

Net Zero Energy School – Reaching the Community
ÉCOLE VERGÍLIO FERREIRA
**SIMULATION INFORMATIQUE DYNAMIQUE DU COMPORTEMENT
THERMIQUE ET DE SCENARIOS VISANT AMÉLIORER LE CONFORT DE
L'ENVIRONNEMENT DU BLOC H+I**

Net Zero Energy School – Reaching the Community
ESCOLA SECUNDÁRIA DE VERGÍLIO FERREIRA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DINÂMICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO
E DE CENÁRIOS DE MELHORIA DO CONFORTO AMBIENTE DO BLOCO H+I

ÍNDICE DO TEXTO

	Pág.
1. Introdução	1
2. Descrição da escola	5
2.1. Descrição dos espaços estudados	5
2.2. Soluções construtivas	8
2.3. Soluções de climatização e de ventilação	9
2.3.1 Ventilação mecânica e climatização.....	9
2.3.2 Ventilação natural.....	11
3. Simulação computacional	12
3.1. Características geométricas do modelo	13
3.2. Descrição das cargas internas, utilização dos espaços e sistema de AVAC.....	15
3.2.1 Ocupação	16
3.2.2 Iluminação artificial	16
3.2.3 Equipamentos	16
3.2.4 Atuação das proteções solares interiores	17
3.2.5 Abertura das janelas e portas/ventilação natural	17
3.2.6 Climatização e ventilação mecânica	18
3.3. Cenários alternativos de melhoria	18
3.4. Resultados obtidos nos cenários estudados	21
3.5. Análise comparativa dos resultados obtidos.....	27
4. Conclusões	31
Bibliografia.....	34

Net Zero Energy School – Reaching the Community
ESCOLA SECUNDÁRIA DE VERGÍLIO FERREIRA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DINÂMICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO
E ANÁLISE DE MEDIDAS DE MELHORIA DO CONFORTO AMBIENTE DO
BLOCO H+I

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema da intervenção realizada na escola	3
Figura 2. Planta da escola secundária - adaptado de Projeto de Arquitetura [5]	6
Figura 3. Bloco H (a amarelo) + I (a verde) – adaptado de Projeto de Arquitetura [5]	7
Figura 4. Bloco H (a amarelo) + I (a verde) – adaptado de Projeto de Arquitetura [5]	7
Figura 5. Esquema e fotografia dos vãos envidraçados utilizados	9
Figura 6. Sala de aula do bloco H+I	10
Figura 7. Modelo geométrico do bloco H+I, vista poente	13
Figura 8. Modelo geométrico do bloco H+I, vista nascente	13
Figura 9. Modelo geométrico do bloco H+I, vista sul	14
Figura 10. Modelo geométrico do bloco H+I, vista norte	14
Figura 11. Modelo geométrico do bloco H+I em corte, planta do piso 0	14
Figura 12. Modelo geométrico do bloco H+I em corte, planta do piso 1	15
Figura 13. Modelo da rede nodal de ventilação: piso 0 e sala H010 (nós a vermelho)	18
Figura 14. Período de aquecimento: comparação de cenários	22
Figura 15. Período de arrefecimento: comparação de cenários	22
Figura 16. Semana de inverno sala H001: comparação de cenários	23
Figura 17. Semana de meia-estação sala H001: comparação de cenários	23

ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1. Características das soluções construtivas	8
Quadro 2. Características dos vãos envidraçados	9
Quadro 3. Caudais de ventilação de projeto das salas H001 e H010	10
Quadro 4. Características da UTAN que serve a ala nascente do bloco H	10
Quadro 5. Densidades de iluminação das salas do bloco H+I	16
Quadro 6. Cenários analisados através de simulação dinâmica computacional	20

Net Zero Energy School – Reaching the Community
ESCOLA SECUNDÁRIA DE VERGÍLIO FERREIRA
SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DINÂMICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO
E ANÁLISE DE MEDIDAS DE MELHORIA DO CONFORTO AMBIENTE DO
BLOCO H+I

1. Introdução

Ao abrigo do programa MIT-Portugal desenvolveu-se um projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) denominado “Net Zero Energy School – Reaching the Community” (Ref.^a MIT-Pt/SES-SUES/0037/2008), no qual participam o Instituto Superior Técnico (IST), coordenador do projeto, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Instituto de Ciências Sociais (ICS).

Em Portugal o setor dos edifícios (serviços e residencial) representa cerca de 60% do consumo total de eletricidade, apresentando uma tendência de aumento devido às crescentes necessidades de níveis de conforto e à proliferação de equipamentos domésticos e de escritório. É urgente racionalizar o uso da energia e promover a eficiência energética num âmbito interdisciplinar, envolvendo simultaneamente as dimensões tecnológicas e sociológicas. Neste processo, torna-se necessário desenvolver abordagens estratégicas a curto, médio e longo-prazo.

Um dos campos centrais nas dinâmicas de mudança prende-se com a educação. Através das crianças e adolescentes, que atuam como embaixadores junto das famílias, é possível alcançar o setor residencial, difundindo os comportamentos de eficiência energética para além do contexto escolar. No contexto escolar, em paralelo com a disseminação de ações de sensibilização neste domínio, diversas escolas estão a ser objeto de intervenções, mais ou menos profundas, que afetam a qualidade do edificado e dos sistemas disponíveis (nomeadamente, controlo ambiente, iluminação e tecnologias de informação). Em consequência destas intervenções, novos “ambientes” e expectativas serão criados e a relação com o uso de energia sofrerá alterações face aos padrões tradicionais.

Um dos objetivos deste projeto é avaliar o impacto de ações, ativas e passivas, na melhoria das condições de conforto ambiente e de eficiência energética implementadas numa escola “tradicional”.

Para o desenvolvimento do projeto foi possível selecionar um edifício escolar que 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.

No âmbito da fase 2 do programa estava prevista a reabilitação de 75 escolas localizadas de norte a sul do País com o objetivo principal de recuperar e modernizar os edifícios, potenciando uma cultura de aprendizagem, divulgação do conhecimento e aquisição de competências.

Com base em diversos critérios de seleção, nomeadamente, a calendarização das obras de modernização da escola e a caracterização sociocultural da sua população, o estabelecimento escolar selecionado para desenvolvimento do referido estudo foi a escola secundária de Vergílio Ferreira, situada na Quinta dos Inglesinhos em Lisboa.

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 dos respetivos dispositivos de proteção solar. Para assegurar a satisfação dos requisitos regulamentares relativos a caudais mínimos de ar novo e ao Índice de Eficiência Energética (IEE), foram instalados sistemas de climatização (sobretudo de aquecimento e de ventilação mecânica) na maioria dos espaços interiores.

Na Figura 1 esquematiza-se a intervenção efetuada na escola, relevantes para o ambiente interior e da análise de medidas de melhoria ao abrigo do projeto *Net Zero Energy School*.

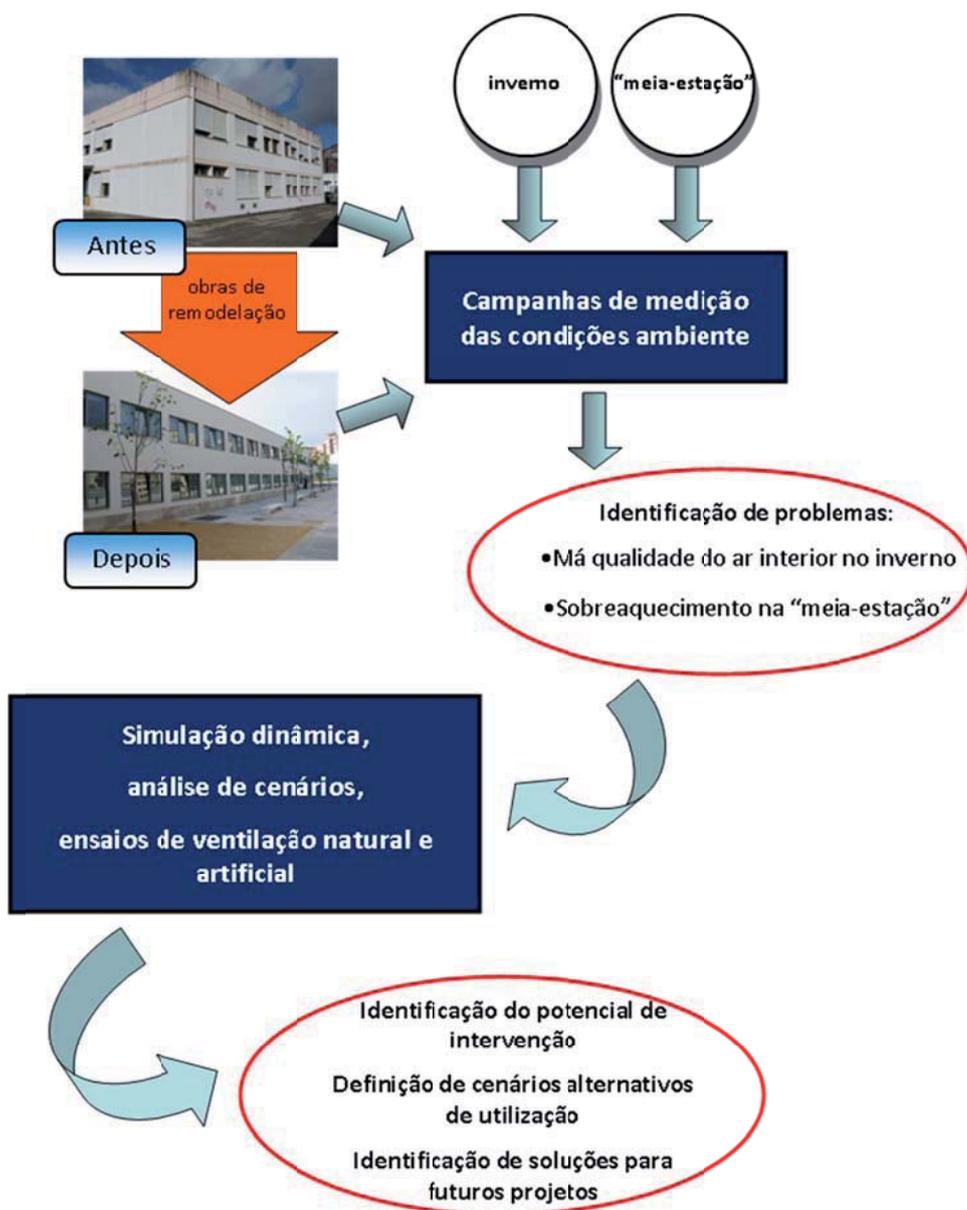


Figura 1. Esquema da intervenção realizada na escola

Numa primeira fase do projeto de investigação em curso, procedeu-se à caracterização da escola antes da intervenção, com a realização de diversos levantamentos pontuais das condições ambientes interiores, abrangendo períodos de inverno e de meia-estação. Após o início da intervenção de reabilitação da escola executaram-se novas campanhas de medições em períodos climáticos idênticos. Estas novas campanhas pretenderam avaliar o impacte resultante das obras de reabilitação da escola, tanto nas condições ambientes das salas de aula como na satisfação manifestada pelos alunos face ao ambiente interior, de forma a permitir efetuar uma comparação com

as campanhas realizadas antes da intervenção. Os levantamentos foram orientados para a medição de diversos parâmetros ambientes (temperatura, humidade relativa e velocidade do ar) relevantes para a avaliação das condições de conforto térmico, e foram acompanhados pelo preenchimento pelos alunos presentes de um questionário específico sobre este tema. Complementou-se a avaliação de conforto térmico com uma avaliação ambiente mais vasta, orientada para aspetos de qualidade do ar interior.

De forma a avaliar o comportamento térmico das salas de aula e estudar a influência de medidas passivas e ativas na minimização do desconforto dos alunos, foram também efetuadas campanhas de medição em contínuo e ensaios de ventilação natural e mecânica, tanto no período de inverno como na meia-estação.

As campanhas de medição realizadas evidenciaram um maior desconforto térmico dos alunos, depois da intervenção na escola, especialmente na meia-estação. O aumento da temperatura operativa interior e as elevadas expectativas dos alunos com a remodelação da escola justificam o maior desconforto sentido (de acordo com a opinião expressa nos inquéritos realizados).

Com vista a minimizar situações assinaladas de desconforto térmico dos alunos e de má qualidade do ar interior nas salas de aula [1, 2, 3 e 4], procedeu-se à simulação computacional dinâmica do bloco H+I.

Na simulação dinâmica foram estudados vários cenários de intervenção ao longo do ano, avaliando o potencial de medidas ativas e passivas na melhoria do conforto térmico dos alunos e da qualidade do ar interior das salas de aula.

Com base nos resultados da simulação dinâmica, tentou-se traçar uma linha orientadora de medidas passivas e de alterações comportamentais dos utentes da escola, que conduza à melhoria das condições de conforto, sem comprometer as questões económicas e de sustentabilidade.

No presente documento apresenta-se a análise dos resultados obtidos da simulação dinâmica do comportamento térmico da escola.

2. Descrição da escola

2.1. Descrição dos espaços estudados

A escola Secundária de Vergílio de Ferreira está situada na antiga Quinta dos Inglesinhos, na confluência geográfica de duas freguesias: Carnide e Lumiar, em Lisboa. Em 1923, a Quinta dos Inglesinhos foi transformada num conjunto de instituições escolares.

A escola foi inaugurada em 1983, servindo nesta data apenas uma população estudantil do 3º ciclo do Ensino Básico, distribuída por 36 turmas. Em 1986 a escola viu aumentados os seus recursos físicos, sendo ampliada com a construção de mais três blocos.

Em 1995, para fazer face ao aumento da carga curricular do 12º ano, a escola é novamente ampliada com a construção de mais um bloco.

A construção do pavilhão gimnodesportivo dá-se em 1999 e, em 2002 foi construído o Centro Documental Multimédia – a partir de um velho edifício pertencente ao recinto escolar cuja traça original se respeitou [5].

Com a intervenção da Parque Escolar a escola sofreu alterações significativas, nomeadamente: renovação (em alguns casos ampliação) dos espaços; alteração da disposição e funcionalidade dos espaços interiores e correção de eventuais anomalias existentes.

No que respeita 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 existentes por outras, com diferentes caixilharia, vidros e dispositivos de proteção solar.

Além de se manterem alguns dos blocos existentes, outros foram remodelados e construídos novos blocos. A planta de implantação dos blocos da Escola Secundária de Vergílio de Ferreira é apresentada de seguida.



Figura 2. Planta da escola secundária - adaptado de Projeto de Arquitetura [5]

Conforme se constata na Figura 2, a escola é composta por diversos blocos. As campanhas de medição efetuadas bem como a simulação dinâmica computacional recaíram sobre o bloco H+I, tanto pela sua dimensão (o maior dos blocos da escola) como, segundo os alunos, por apresentar problemas de conforto [1, 2, 3 e 4].

Assim, de seguida será feita uma breve descrição da escola [5], apresentando-se com maior detalhe o bloco em estudo.

O bloco EN, localiza-se na entrada principal da escola e funciona como edifício administrativo. Tem ligação direta com os blocos A, B e D.

O bloco A tem espaços destinados à Direção, Administração e salas exclusivas para os professores.

No bloco B localizam-se a biblioteca escolar (no piso térreo), e as salas de informática (no piso 1).

O bloco C, tem apenas um piso térreo e seis salas de aula normais. O bloco apresenta duas casas-de-banho, um armazém e uma área de circulação. Este bloco tem ligação exterior coberta ao bloco D.

No bloco D localizam-se os espaços de convívio e bar/cafetaria (no piso térreo) com ligação ao bloco E (refeitório e cozinha). No piso superior localizam-se salas de aula normais. O bloco G tem ligação direta ao bloco D através do segundo piso, e apenas tem salas de aula normais.

O bloco F tem ligação térrea ao bloco G e tem, exclusivamente, salas de aula normais em ambos os pisos. I

O bloco **H+I** é uma ampliação do antigo bloco I, tem dois pisos e é onde se localizam as salas de laboratório (bloco H). No bloco I situam-se as salas de desenho.

Nas figuras seguintes apresentam-se plantas do bloco H+I.



Figura 3. Bloco H (a amarelo) + I (a verde) - adaptado de Projeto de Arquitetura [5]



Figura 4. Bloco H (a amarelo) + I (a verde) - adaptado de Projeto de Arquitetura [5]

2.2. Soluções construtivas

As soluções construtivas da envolvente exterior do bloco H+I são as seguintes [5]:

- 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.
- cobertura em terraço com a seguinte constituição, do exterior para o interior: revestimento de impermeabilização sobre isolamento em lã de rocha (50 mm) e betonilha de regularização; laje de betão; espaço de ar; isolamento em lã de rocha (40 mm) e placas de gesso cartonado perfurado (teto).
- pavimento intermédio (entre pisos) constituído por: revestimento vinílico sobre betonilha de regularização; laje de betão; espaço de ar; isolamento em lã de rocha (40 mm) e placas de gesso cartonado perfurado (teto).
- pavimento térreo 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 na envolvente exterior do bloco em estudo.

Quadro 1. Características das soluções construtivas

Solução construtiva	Espessura total (m)	Coefficiente de transmissão térmica [W/(m².°C)]	Massa superficial útil (kg/m²)¹
Parede exterior	0,46	0,43	150
Cobertura em terraço	0,45	0,37	2
Pavimento intermédio	0,42	0,59	-
Pavimento térreo	0,47	0,54	150

1 - Cálculo da massa superficial útil de acordo com o Decreto-Lei 80/2006, RCCTE [12]

As salas de aula em estudo têm vãos envidraçados com 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 tem perfis de alumínio termolacados na cor cinzenta. A proteção solar dos envidraçados é assegurada com uma tela interior perfurada e de cor clara.

O peitoril dos vãos é em pedra e a verga em betão.

Na Figura 5 apresenta-se a solução utilizada, esquematicamente e em fotografia, para os vãos envidraçados das salas de aula.



Figura 5. Esquema e fotografia dos vãos envidraçados utilizados

No Quadro 2 indicam-se as características relevantes dos vãos envidraçados.

Quadro 2. Características dos vãos envidraçados

Coeficiente de transmissão térmica [W/(m².°C)]	Fator solar do vidro	Fator solar do vidro com a tela	Transmitância visível
3,3	0,5	0,25	0,7

2.3. Soluções de climatização e de ventilação

2.3.1 Ventilação mecânica e climatização

De acordo com o projeto de instalações de condicionamento de ar e ventilação [6] instalou-se no bloco H+I um sistema centralizado de climatização e ventilação. O sistema é do tipo "tudo ar", com três unidades de tratamento de ar na cobertura que efetuam o tratamento de ar das salas através de condutas de insuflação e de retorno. No bloco H, uma unidade efetua o condicionamento das salas da ala nascente, outra efetua o condicionamento das salas da ala poente. A terceira unidade efetua o condicionamento das salas da zona I. 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 com base em água quente produzida numa

caldeira, podendo também só ventilar os espaços com ar exterior, sem aquecimento. As unidades de tratamento de ar estão dotadas de recuperação de calor através de placas com fluxos cruzados e com uma eficiência de cerca de 50%. No Quadro 3 apresentam-se os caudais de ventilação previstos para a sala H001 e H010.

Devido à dificuldade de acesso a estas máquinas, não foi possível recolher dados relativamente às suas características, apresentando-se os elementos do projeto no Quadro 4.

Quadro 3. Caudais de ventilação de projeto das salas H001 e H010

	Caudal (m ³ /h)	RPH (h ⁻¹)
Insuflação	1700	6,1
Extração	1860	6,7

Quadro 4. Características da UTAN que serve a ala nascente do bloco H

Caudal insuflado (m ³ /h)	8300
Caudal extraído (m ³ /h)	9100
Eficiência de recuperação de calor (%)	50
Pressão estática (Pa)	180 (insuflação) 120 (extração)

Na Figura 6 apresentam-se fotografias de salas de aulas estudadas, evidenciando alguns componentes do sistema de climatização e de ventilação existente.



Figura 6. Sala de aula do bloco H+I

2.3.2 Ventilação natural

Todas as salas podem ser ventiladas naturalmente através da abertura das janelas. Efetivamente, as salas dispõem de janelas na fachada exterior (exposição simples), dotadas de folhas oscilo-batentes cada uma com uma área livre máxima de 1,2 m², quando a folha se encontra aberta no modo de batente.

3. Simulação computacional

A simulação dinâmica computacional com modelos detalhados permite avaliar o comportamento térmico e energético dos edifícios e estudar diferentes cenários que possam otimizar o desempenho do edifício.

Atendendo às múltiplas variáveis que influenciam o comportamento térmico real dos edifícios e às incertezas quanto aos dados e modelação dos fenómenos físicos, neste trabalho foi desenvolvido um modelo do edifício escolar com a informação mais fiável disponível no que concerne quer às características geométricas e construtivas do edifício, quer aos sistemas mecânicos, perfis de ocupação e de cargas internas.

De forma a avaliar a adequação do modelo de simulação para o estudo das situações de ventilação natural e de ventilação mecânica foi inicialmente realizada uma comparação dos resultados do modelo de simulação e dos resultados experimentais. Face aos resultados satisfatórios obtidos [13], foram estudadas diferentes estratégias para melhorar o comportamento térmico e energético do edifício, abrangendo ações passivas e mudanças comportamentais por parte dos alunos, professores e funcionários.

A definição do cenário *real* de utilização do edifício servirá de base para efetuar a comparação com outros cenários. Assim, para o cenário *real* foi necessário definir com a maior exatidão possível as condições reais de utilização do edifício. Nesse sentido efetuaram-se visitas técnicas ao local e, através do diálogo com professores, alunos e funcionários, analisaram-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 [5], nomeadamente plantas, cortes e pormenores construtivos. Os modelos foram construídos com o *software GoogleSketchup* versão 7. A análise das cargas térmicas do edifício foi realizada com o *software EnergyPlus* versão 6.

Na definição das zonas térmicas do modelo de simulação foram considerados 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. Não foi realizada a junção de vários espaços do mesmo tipo numa única zona térmica, para permitir avaliar o comportamento de cada sala e permitir especificar para cada espaço diferentes horários de ocupação, de iluminação, de abertura de janelas e de portas, e de utilização de sistemas de climatização e ventilação. Deste modo é possível analisar com maior detalhe cenários com diferentes medidas de intervenção [9].

3.1. Características geométricas do modelo

Nas figuras seguintes (Figura 7 a Figura 12) apresenta-se a vista exterior do modelo geométrico utilizado na simulação do bloco H+I, incluindo os edifícios adjacentes com vista a avaliar o efeito das respetivas sombras no bloco H+I.

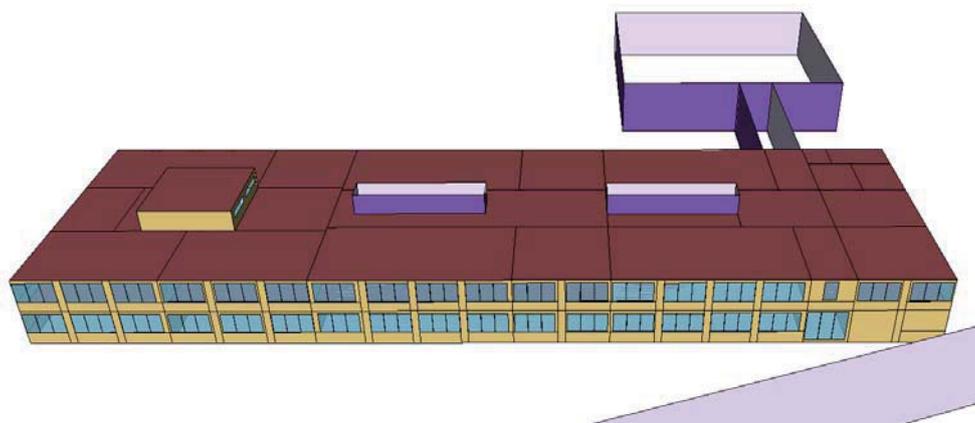


Figura 7. Modelo geométrico do bloco H+I, vista poente

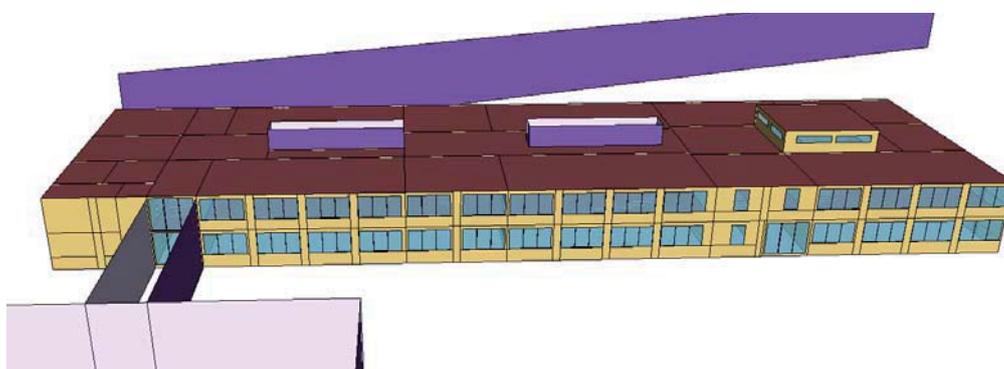


Figura 8. Modelo geométrico do bloco H+I, vista nascente

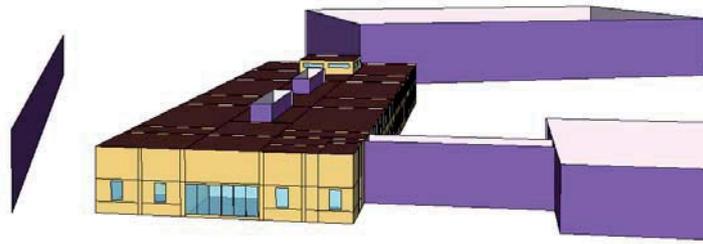


Figura 9. Modelo geométrico do bloco H+I, vista sul

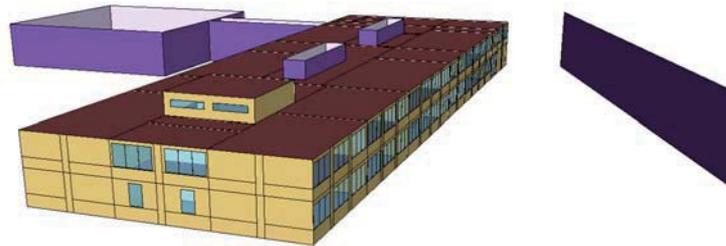


Figura 10. Modelo geométrico do bloco H+I, vista norte

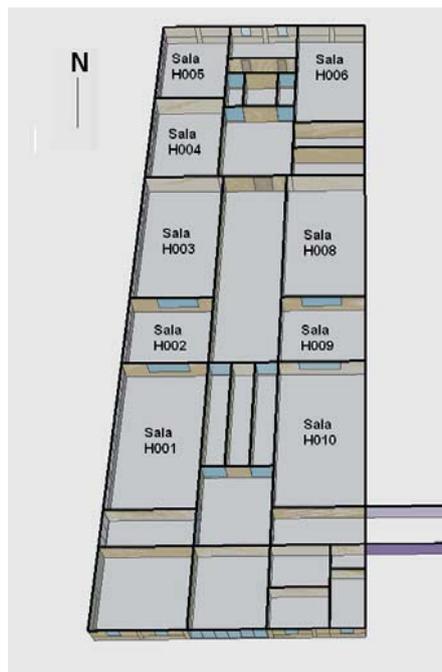


Figura 11. Modelo geométrico do bloco H+I em corte, planta do piso 0

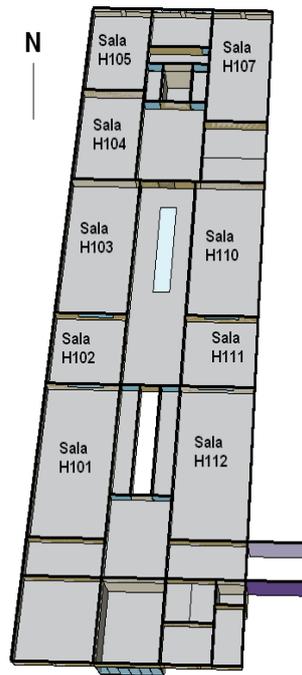


Figura 12. Modelo geométrico do bloco H+I em corte, planta do piso 1

Os elementos envolventes (outros edifícios, muros, relevo, etc.) do bloco em estudo podem influenciar o comportamento térmico das salas e aula, especialmente devido ao efeito de sombreamento dos vãos envidraçados e da envolvente opaca. Através de visitas ao local e da análise da planta de implantação dos blocos, foram definidos, no modelo, os edifícios circundantes. O bloco H+I é sombreado parcialmente a nascente pelo bloco D e a poente por um muro de delimitação da escola.

3.2. Descrição das cargas internas, utilização dos espaços e sistema de AVAC

Nos pontos seguintes faz-se uma breve descrição das cargas internas: ocupação, iluminação e equipamentos consideradas no cenário *real* (utilização *habitual* do bloco H+I de acordo com o observado na escola). É também descrito o padrão de abertura de janelas e portas, bem como da utilização das telas interiores de proteção solar dos vãos envidraçados e do funcionamento do sistema de climatização e ventilação artificial.

3.2.1 Ocupação

Apesar das salas de aula do bloco H+I terem capacidade para 24 alunos e um professor, o número típico de ocupantes por sala de aula é de 12 ocupantes, uma vez que as aulas nestes edifícios costumam ser por turnos (metade da turma).

Considerou-se que a atividade metabólica é de 108 W/ocupante, valor referente a uma pessoa sentada a escrever [10].

O horário de ocupação (alunos e professor) das salas de aula foi definido com base no horário da escola, com aulas de manhã e de tarde, compreendendo os intervalos entre aulas e o intervalo de almoço. As aulas começam às 8h20 e terminam às 17h00.

As salas de aula encontram-se ocupadas durante os dias de semana e durante os períodos letivos de acordo com o horário típico de aulas da escola. Nos intervalos das aulas as salas de aula não tinham ocupantes. Considerou-se também que não existia ocupação das zonas de circulação, salas de apoio e casas de banho. Na simulação computacional considerou-se que a escola estava fechada nos períodos de férias escolares.

3.2.2 Iluminação artificial

De forma a definir as potências de iluminação para cada zona térmica foi analisado o projeto de iluminação da escola [11], apresentando-se no quadro seguinte os valores de densidade de iluminação:

Quadro 5. Densidades de iluminação das salas do bloco H+I

Espaço	Densidade de iluminação (W/m²)
Salas de laboratório (bloco H)	8,7
Salas de desenho 1 (bloco I)	11,5
Salas de desenho 2 (bloco I)	9,5

As salas de aula analisadas na simulação dinâmica foram salas de laboratório. Na simulação os horários relativos à utilização da iluminação artificial coincidiram com os horários das aulas.

3.2.3 Equipamentos

Na simulação computacional optou-se por não se considerar a utilização do projetor por se ter observado na altura dos ensaios efetuados na escola que a sua utilização foi pontual (nas salas estudadas).

Nas salas de aula também existe um computador (conjunto torre e ecrã) mas, tal como o projetor, constatou-se que, quando foram efetuadas medições na escola, a sua utilização foi pontual. O consumo do computador em *standby* tem um efeito residual nas condições térmicas das salas de aula.

3.2.4 Atuação das proteções solares interiores

Durante os levantamentos realizados nas campanhas de medição de inverno e de meia-estação observou-se que os professores, habitualmente, preferiam que os dispositivos de sombreamento dos vãos envidraçados estivessem ativados (telas descidas). As principais razões invocadas para tal facto estão relacionadas com o potencial de distração dos alunos com o que se passa no exterior da sala e com o encadeamento dos alunos. Assim, na simulação dinâmica (cenário *real*) considerou-se que os dispositivos de sombreamento estavam sempre ativados.

3.2.5 Abertura das janelas e portas/ventilação natural

No decorrer das campanhas de medição realizadas, observou-se que os professores, os funcionários e os alunos atuavam sobre a abertura das janelas exteriores e das portas interiores das salas de aula. Com base nestas observações na simulação dinâmica do cenário real do bloco H+I considerou-se o seguinte:

- no inverno, apenas são abertas duas janelas, no modo basculante¹;
- no período de meia-estação considerou-se que duas das janelas da sala se encontravam abertas no modo basculante e as restantes janelas (uma ou duas, consoante a sala tenha 3 ou 4 janelas) totalmente abertas;
- em qualquer período do ano as janelas são fechadas quando não há aulas no bloco;
- durante as aulas as portas das salas de aula encontram-se fechadas; as portas só são abertas nos intervalos, no período em que os alunos saem e entram na sala de aula; considerou-se que as portas das salas são

¹ - 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.

abertas 5 minutos após o término da aula e 5 minutos antes do início das aulas.

3.2.6 Climatização e ventilação mecânica

O sistema de climatização e de ventilação da escola está normalmente desligado. Tendo em conta a sua previsível escassa utilização considerou-se que no cenário *real* o sistema estava desligado, sendo o arejamento das salas assegurado apenas por ventilação natural. No entanto, com o intuito de verificar o efeito da ventilação mecânica no período de arrefecimento (especialmente em modo *free cooling*), o funcionamento do sistema existente foi simulado.

A simulação do escoamento do ar no edifício foi realizada utilizando uma rede nodal de ventilação (*airflownetwork*). Na Figura 13 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 e portas foi definida de acordo com o ponto 3.2.5. A simulação do cenário com ventilação mecânica foi realizada impondo os caudais de projeto (Quadro 3), continuando a ser simulada a rede de ventilação natural para considerar o efeito das infiltrações de ar e da abertura das janelas.

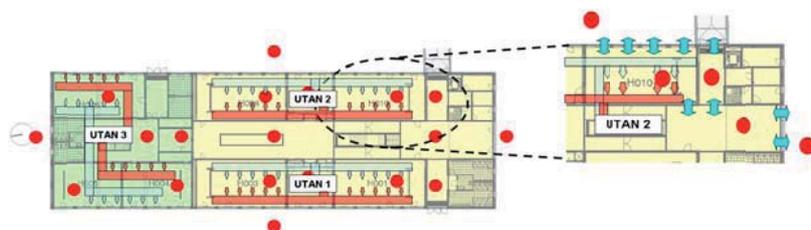


Figura 13. Modelo da rede nodal de ventilação: piso 0 e sala H010 (nós a vermelho)

3.3. Cenários alternativos de melhoria

Após a análise dos resultados obtidos nas campanhas de medição efetuadas no inverno e na meia-estação, verificou-se que é importante melhorar as condições ambientes das salas de aula, de modo a diminuir o desconforto sentido pelos alunos. O sobreaquecimento das salas de aula, constituiu, de acordo com as campanhas realizadas, a principal causa de desconforto térmico dos alunos, especialmente no período de meia-estação. No inverno, nos dias mais frios, as salas de aula apresentam temperaturas

relativamente baixas e, por vezes uma qualidade do ar menos satisfatória [1, 2, 3 e 4]. Dado que a utilização de climatização mecânica poderá traduzir-se por uma despesa significativa no orçamento escolar, é importante, tanto quanto possível, alterar as condições ambientes das salas de aula privilegiando a utilização de medidas passivas.

Com o objetivo de encontrar soluções para os problemas identificados e de contribuir para a melhoria das condições ambientais, foi utilizado um modelo de simulação dinâmica computacional para estudar vários cenários alternativos, com ênfase nas mudanças comportamentais, incluindo a abertura/fecho de janelas, a atuação das proteções solares e o funcionamento da ventilação mecânica.

Ao definir os cenários é essencial ter em conta a exequibilidade das medidas de intervenção, pois por se tratar de um edifício escolar existem algumas limitações relacionadas com a segurança (acesso às salas de aula por portas e janelas abertas sem vigilância) e rendimento escolar dos utilizadores do edifício (as telas interiores subidas poderão conduzir à distração dos alunos com o que acontece no exterior e a problemas de encadeamento pela incidência da luz natural).

Além de alternativas comportamentais dos utentes do edifício, foram estudados cenários em que o edifício apresenta uma envolvente física diferente da real, com o objetivo de estudar os seus efeitos no conforto térmico e na qualidade do ar interior e de contribuir para a definição de futuras obras de melhoramento do edifício.

Analizou-se também um cenário (base), em que o bloco apresenta as condições de referência propostas na regulamentação em vigor para estabelecimentos de ensino – RSECE [12], nomeadamente ao nível da ocupação, da iluminação, de equipamentos e renovação de ar. No Quadro 6 apresentam-se os vários cenários estudados, realçando-se as semelhanças e diferenças entre os mesmos.

Quadro 6. Cenários analisados através de simulação dinâmica computacional

Cenário	Descrição	Envolvente física	Ventilação	Ocupação e equipamentos	Iluminação e proteção solar dos envidraçados
Cenário real	Bloco com condições de ocupação, iluminação, densidade de equipamentos e abertura de janelas e portas de acordo com o observado em campanhas de medição. Envolve real	Real	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado)	Aulas por tunos (12 alunos), ausência de equipamentos	Iluminação com horário das aulas. Proteção solar através da solução existente (telas interiores) sempre ativada
Cenário de base	Bloco com condições de ocupação, iluminação, densidade de equipamentos e RPH referenciada na legislação nacional [12]	Real	0,6 renovações de ar por hora [12]	Horários, densidade de equipamentos e ocupação RSECE [7]	Horários RSECE [7]
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 basculante durante a noite	Real	Portas abertas no intervalo. Durante o período de <i>arrefecimento</i> são abertas duas janelas no modo basculante também durante a noite	Aulas por tunos (12 alunos), ausência de equipamentos	Iluminação com horário das aulas. Proteção solar através da solução existente (telas interiores) sempre ativada
Cenário B	Cenário que analisa uma envolvente física diferente da real, considerando-se sombreamento dos vãos através de palas verticais e proteção solar exterior	Palas verticais com largura de 1m ao longo da fachada entre os vãos envidraçados, e proteção solar exterior	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado)	Aulas por tunos (12 alunos), ausência de equipamentos	Iluminação com horário das aulas. Proteção solar através da solução existente (telas interiores) sempre ativada
Cenário C	Cenário que analisa a influência da utilização das 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)	Aulas por tunos (12 alunos), ausência de equipamentos	Iluminação desligada nas salas a nascente de manhã (só depois das 9h00 no período de <i>aquecimento</i>) e desligada nas salas a poente à tarde (até às 16h00 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	Real	Natural (abertura de janelas e portas de acordo com o observado durante o período de inverno e janelas totalmente abertas na meia-estação)	Aulas por tunos (12 alunos), ausência de equipamentos	Iluminação com horário das aulas. Proteção solar através da solução existente (telas interiores) sempre ativada
Cenário E	Cenário que considera <i>freecooling</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 5h00 às 9h00 no período de arrefecimento	Aulas por tunos (12 alunos), ausência de equipamentos	Iluminação com horário das aulas. Proteção solar através da solução existente (telas interiores) sempre ativada

3.4. Resultados obtidos nos cenários estudados

A comparação de cenários foi efetuada tendo em conta os dois períodos considerados mais relevantes na análise de conforto térmico dos utentes: o período de *aquecimento* ou de inverno (meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) e o período de *arrefecimento* ou de meia-estação (meses de abril, maio, junho e setembro). Com o objetivo de verificar a influência da orientação solar nas salas, foram consideradas duas salas semelhantes, ambas no piso 0, com orientações opostas: nascente (sala H010) e poente (sala H001).

A comparação incide sobre as temperaturas do ar interior registadas e as diferenças obtidas relativamente ao cenário *real*.

Nas figuras seguintes (Figura 14 e Figura 15) apresentam-se as temperaturas interiores, nos períodos de *aquecimento* e de *arrefecimento*, para os vários cenários considerados. Os valores da temperatura média indicados nessas figuras correspondem à temperatura média durante o período de aulas (das 8h20 às 17h00).

Para analisar com melhor detalhe os cenários propostos e estudados apresenta-se também uma semana de inverno (Figura 16) e uma semana da meia-estação (Figura 17).

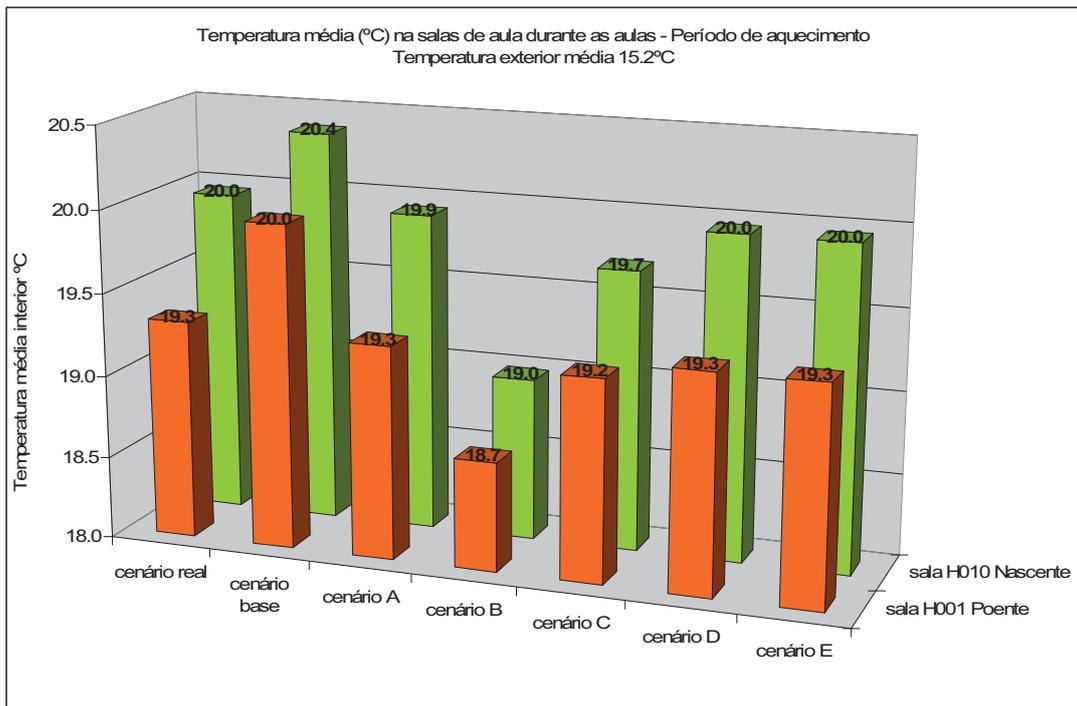


Figura 14. Período de aquecimento: comparação de cenários

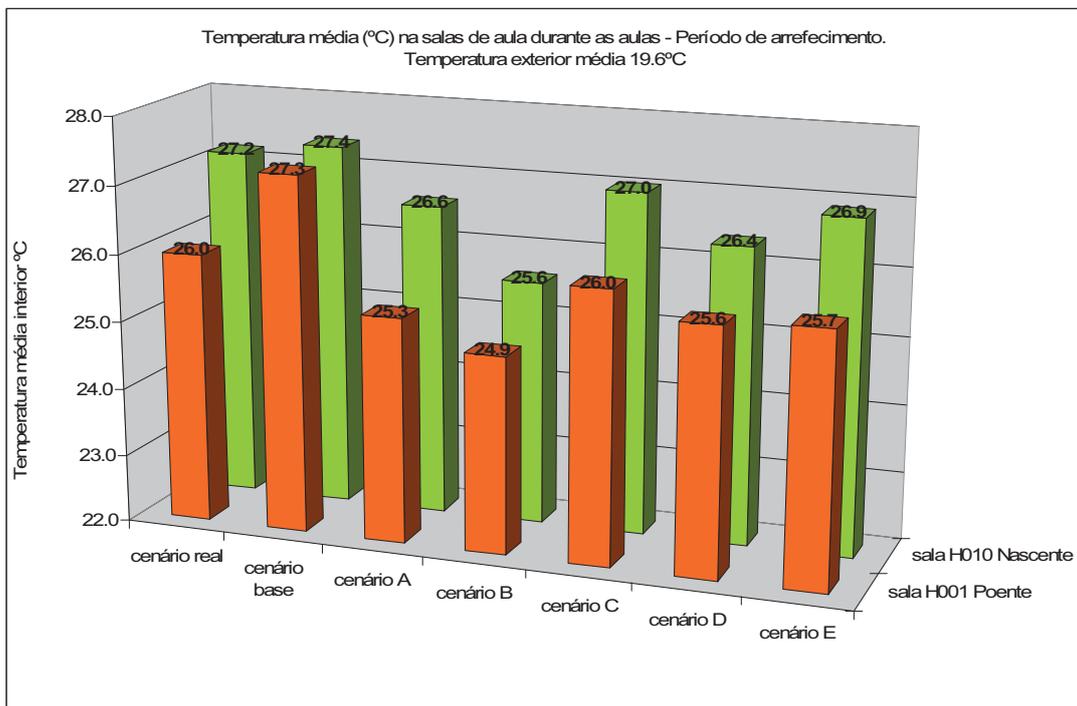


Figura 15. Período de arrefecimento: comparação de cenários

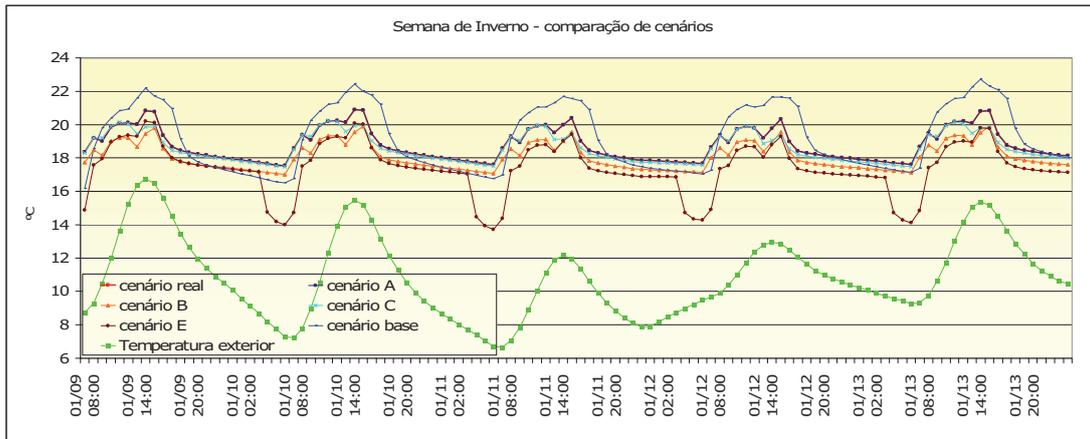


Figura 16. Semana de inverno sala H001: comparação de cenários

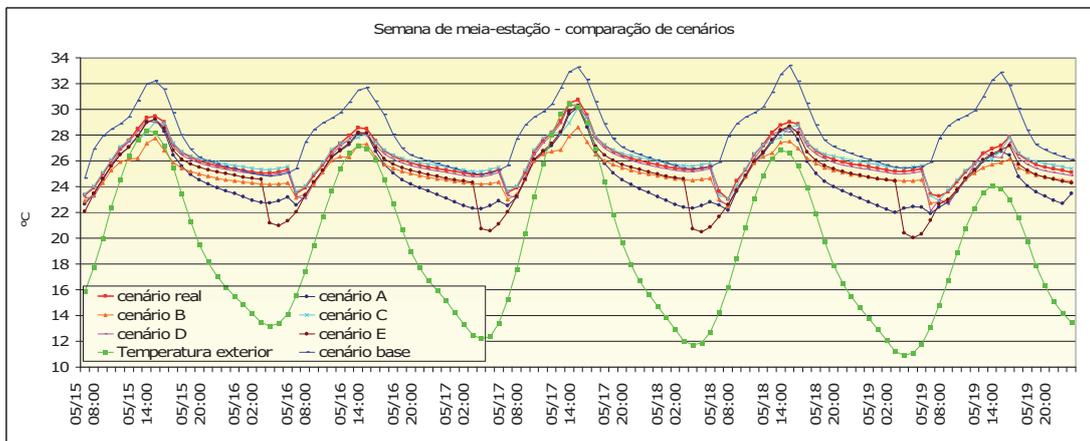


Figura 17. Semana de meia-estação sala H001: comparação de cenário

Ao analisarem-se os resultados da Figura 14 e Figura 15 constata-se que em todos os cenários estudados a temperatura interior média das salas, durante as aulas, é sempre superior na sala orientada a nascente, tal como se observou nos resultados das campanhas de medição [13]. Tendo em conta que os ganhos internos das salas são independentes da orientação, a diferença de temperaturas está provavelmente relacionada com os ganhos/perdas de calor para o exterior. Devido ao bom isolamento térmico das paredes exteriores e à reduzida permeabilidade ao ar das caixilharias, os ganhos de calor (internos e solares) conduzem a um aumento da temperatura do ar das salas a nascente, desde as primeiras horas do dia. Acresce o facto das salas a poente estarem parcialmente sombreadas por um muro exterior à escola, tendo por isso uma menor incidência de radiação solar direta.

De seguida apresenta-se uma breve análise dos resultados obtidos para cada um dos cenários descritos no Quadro 6.

Cenário real:

A temperatura interior média obtida para as salas em estudo, no período de aquecimento, foi de 19,6 °C. Ao observar a Figura 16 constata-se que a temperatura interior na sala H001 para este cenário oscila entre 17 e 21 °C para uma semana típica de inverno.

No período de arrefecimento obtiveram-se temperaturas interiores elevadas nas salas de aula, conforme se tinha constatado em campanhas de medição realizadas na escola [13]. Neste período a temperatura interior média nas salas em estudo, obtida na simulação deste cenário, foi de 26,4 °C, chegando a atingir 27 °C na sala a nascente.

Analisando uma semana do período da meia-estação/início do verão na sala H001 (Figura 17) observa-se que o intervalo de temperaturas varia entre 23 e 31°C.

Cenário base: *ganhos internos 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.

Relativamente a uma semana típica de inverno (Figura 16) observa-se que a temperatura interior oscila entre 16 e 23 °C, enquanto numa semana típica de meia-estação/início de verão (Figura 17) a temperatura interior varia entre 25 e 33 °C.

Cenário A: *portas abertas no intervalo das aulas e duas janelas abertas no modo basculante durante a noite*

Este cenário, orientado para a melhoria da qualidade do ar das salas de aula, não apresentou diferenças significativas relativamente às temperaturas interiores médias obtidas nas salas 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*, em que, além da abertura da porta no intervalo, também se considerou a abertura de duas janelas no modo basculante durante a noite, a diferença obtida nas temperaturas médias, comparada com o cenário *real*, foi de menos 0,6°C.

Ao analisar o cenário A considerando uma semana de inverno (Figura 16), observa-se que a abertura de portas apenas no intervalo não tem influência na temperatura interior da sala.

Durante a meia-estação (Figura 17) verifica-se que a abertura de janelas no modo basculante durante a noite provoca a descida da temperatura da sala em cerca de 2-3°C, subindo a temperatura para valores semelhantes aos observados no cenário *real*, durante o dia letivo.

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 (em média

0,8 °C no período de aquecimento e 1,2 °C no período de arrefecimento) está relacionada claramente com a redução dos ganhos solares através dos envidraçados.

Ao analisar uma semana de inverno (Figura 16) observa-se que a temperatura da sala H001 durante o horário das aulas está cerca de um 1°C abaixo da temperatura interior registada para o cenário *real*. Numa semana do período de meia-estação (Figura 17) observa-se que a temperatura interior é também inferior ao valor registado na sala H001 para o cenário *real*, realçando-se as maiores diferenças nas horas mais quentes do dia.

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. De facto, apesar de neste cenário os ganhos internos provenientes da iluminação artificial serem menores, como as telas interiores estão abertas para aproveitar a iluminação natural obtiveram-se também 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 bloco H+I estão totalmente abertas durante as aulas no período de *arrefecimento*, são inferiores às temperaturas obtidas no cenário *real* (0,6 °C). A diferença é superior na sala orientada a poente. Na semana analisada referente ao período de arrefecimento (Figura 17) não se observa uma diferença significativa comparativamente com a temperatura registada no cenário real.

Cenário E: *freecooling 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 basculante 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*.

Analisando uma semana do período da meia-estação (Figura 17), observa-se que ao insuflar na sala de aula ar exterior a cerca de 12-14 °C a temperatura na sala desce cerca de 3 °C (considerando caudais de projeto). No entanto, tal como se referiu anteriormente, quando as aulas começam a temperatura interior neste cenário é semelhante à observada no cenário *real*.

3.5. Análise comparativa dos resultados obtidos

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 no que refere a conforto térmico, qualidade do ar e poupança energética.

Através da simulação dinâmica, estudaram-se os efeitos da colocação de isolamento térmico na envolvente opaca exterior e da instalação de caixilharias pouco permeáveis ao ar nos vãos envidraçados. Estas intervenções no edifício conduziram à redução significativa das trocas de calor com o exterior traduzindo-se em temperaturas altas nos períodos de *arrefecimento* e mesmo no de *aquecimento* (excetuando as primeiras aulas da manhã e dias com temperaturas exteriores baixas).

No período de *aquecimento* a temperatura média das 8h20 às 17h00 no período escolar, foi superior a 19°C nos cenários em que foi considerada a envolvente opaca real (Figura 14). Também no período de *arrefecimento* se observaram temperaturas interiores altas (Figura 15), mesmo nos períodos em que duas janelas estavam abertas e a temperatura exterior era inferior à interior, concluindo-se que os ganhos internos eram elevados e a renovação natural do ar não foi suficiente para que as temperaturas interiores descessem significativamente.

O cenário *base*, que considera as condições definidas no RSECE apresentou temperaturas interiores das salas ligeiramente mais altas que as do cenário *real*. Esta diferença está relacionada com a consideração de maiores taxas de ocupação (nominal em vez do valor médio observado nos levantamentos) e com a utilização de equipamentos elétricos. Comparando com o intervalo de referência de temperatura interior 20-25 °C definido no RSECE [12], constata-se que no período de *arrefecimento* os valores obtidos excedem em aproximadamente 2 °C o limite de referência de 25 °C. De acordo com os resultados da simulação conclui-se que, nas condições definidas no regulamento, seria necessário o recurso à climatização mecânica para que a sala não ultrapassasse a temperatura de referência. Relativamente à qualidade do ar é importante realçar que, de acordo com as medições efetuadas na escola [13], a taxa de renovação de ar das salas de aula (sem funcionamento do sistema mecânico de ventilação e com as janelas fechadas) é inferior ao valor referido na regulamentação em vigor de 0,6 renovações por hora (RCCTE [12]).

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 (em modo basculante) durante a noite. Todavia, ao longo do dia a temperatura interior sobe, devido aos ganhos internos e solares, sendo então equiparável aos 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 nos dias mais quentes, 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, as taxas de renovação do ar observadas nas campanhas de medição [13] com porta interior e janelas fechadas (condições normais durante a noite) permitem que a concentração de CO₂, no início das aulas, seja bastante satisfatória (500-600 ppm).

Relativamente à abertura de portas interiores durante o intervalo das aulas, tal como se observou nas campanhas de medição [13], apesar de não se refletir na temperatura interior média das salas (se tempo de abertura for reduzido), pode em casos de excessiva concentração de CO₂ na sala, e juntamente com a abertura de janelas, ter um papel importante na melhoria da qualidade do ar interior [13].

No cenário B, em que se estuda o comportamento térmico do edifício considerando um cenário hipotético em que o bloco é dotado de palas verticais e de proteções solares dos envidraçados pelo exterior, verificou-se uma diminuição da temperatura média interior das salas de aula, devido, precisamente, à diminuição significativa dos ganhos solares. Contudo, tendo em conta que a escola foi recentemente reabilitada, a análise deste cenário foi meramente académica, não se prevendo que possa constituir uma alternativa viável a curto prazo, uma vez que implica a realização de novas obras no edifício (eventualmente, poderia apenas considerar-se a colocação de proteções exteriores).

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 (Quadro 5), 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 dos alunos com a abertura das telas interiores.

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*. De realçar que a diferença não é maior porque, conforme observado na escola e considerado no cenário *real*, é comum a abertura total de duas janelas durante as aulas. 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, por exemplo. De realçar que em algumas salas de aula do bloco H+I, não é possível abrir as janelas no modo batente por estas colidirem com torneiras

existentes nos balcões laboratoriais. Esta limitação operacional tem consequências negativas no conforto dos alunos.

O cenário E, que considera a utilização da ventilação mecânica (*free cooling* das 5h00 às 9h00) no período de arrefecimento, não apresentou temperaturas interiores significativamente mais baixas que o cenário real. O efeito do *free cooling* observa-se apenas nas primeiras aulas da manhã, tal como na utilização da ventilação natural durante a noite (cenário A).

Tendo em conta os custos de funcionamento da ventilação mecânica não se prevê que este cenário seja viável e compensatório.

4. Conclusões

Os resultados da simulação dinâmica computacional indicam, tal como observado nas campanhas de medição efetuadas na escola [1, 2, 3 e 4], que devido às obras de reabilitação da escola as salas de aula ficaram mais isoladas do exterior, diminuindo assim as trocas de calor e as taxas de renovação de ar. Deste modo, no inverno os ganhos internos de calor (sobretudo devidos à ocupação e à iluminação artificial), juntamente com os ganhos solares através dos vãos envidraçados, permitem que as salas tenham valores de temperatura interior dentro de um intervalo de conforto térmico, exceto nos dias muito frios e nas primeiras aulas da manhã.

Na meia-estação as temperaturas interiores das salas de aula foram elevadas, podendo, nos dias mais quentes, causar desconforto térmico aos seus ocupantes.

Outra conclusão da simulação dinâmica, corroborada pelas medições efetuadas na escola, foi de que as salas mais quentes são as orientadas a nascente e localizadas no piso superior do bloco H+I.

Com vista a colmatar os problemas de conforto identificados, foram testados e estudados vários cenários de intervenção através da simulação dinâmica computacional, concluindo-se que o potencial de intervenção no bloco H+I é reduzido. As limitações de intervenção estão principalmente relacionadas com algumas opções arquitetónicas do bloco H+I e com questões de segurança e de rendimento escolar dos alunos.

No entanto, foram identificadas algumas medidas baseadas em mudanças comportamentais dos alunos e professores que podem melhorar os níveis de conforto.

Concluiu-se que para melhorar a qualidade do ar interior, situação mais problemática no período de aquecimento [3], poderá considerar-se quer a abertura de janelas e porta da sala, quer a utilização da ventilação mecânica. Ambas diminuem a concentração de CO₂ para valores aceitáveis segundo a legislação em vigor [7].

Todavia, para manter ou melhorar as condições de conforto térmico no inverno, é de evitar a renovação de ar da sala através da ventilação mecânica sobretudo nas primeiras aulas da manhã. O facto do sistema de ventilação deste bloco funcionar sem o módulo de aquecimento de ar,

insuflando ar exterior mais frio, conduz à diminuição da temperatura interior das salas (isto apesar da existência de um sistema de recuperação de calor). Se por alguma razão for necessário recorrer à ventilação mecânica, será recomendável ligar o módulo de aquecimento do ar ou diminuir os caudais de insuflação.

No inverno, a abertura de janelas (uma ou duas) no modo basculante não diminui a temperatura interior da sala significativamente e serve como elemento de renovação de ar (apesar dos caudais de ar serem baixos). A abertura da porta para o corredor para arejar a sala em casos de má qualidade do ar poderá ser considerada por curtos períodos de tempo (intervalos entre aulas por exemplo).

Na meia-estação verifica-se que, para aulas por turnos (máximo de 15 alunos), a ventilação mecânica mantém a temperatura interior dentro de valores de conforto, excetuando em dias muito quentes (mais típicos de verão). Apesar disso não se verificaram diferenças significativas em comparação com os valores obtidos com ventilação natural. Obviamente, considerando os custos relacionados com a utilização da ventilação mecânica, não é aconselhável a sua utilização (pelo menos durante todo o dia letivo). Acresce o facto de o sistema de ventilação mecânica instalado no bloco não ter a opção de "ar-condicionado", não fazendo por isso o *arrefecimento* das salas. É preferível optar-se por ventilar a salas de uma forma natural, abrindo as janelas e a porta para o corredor.

Outra hipótese, embora com custos e só conduzindo a melhorias nas primeiras aulas da manhã, seria a utilização do sistema de ventilação a insuflar ar exterior nas salas durante o período noturno (*freecooling*).

Concluiu-se também que o planeamento dos horários poderá ter em conta a orientação e o piso onde se situam as salas de aula. Por exemplo, aulas com elevados ganhos internos podem ser lecionadas no lado poente do edifício e, preferencialmente, no período da manhã (salas mais frescas na meia-estação).

O potencial de poupança energética, no caso do bloco H+I, afigura-se 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. Encontra-se em estudo

a avaliação da iluminação artificial e natural das salas de aula, o que poderá conduzir à definição de medidas que permitam a redução da utilização da iluminação artificial.

Com o objetivo de estudar soluções construtivas para futuras intervenções na escola, foram estudadas soluções arquitetónicas diferentes das atuais, nomeadamente, introdução de palas verticais entre os vãos envidraçados e de sombreamentos dos vãos pelo exterior. Os resultados mostram que estas soluções são adequadas numa perspetiva de melhoria de conforto térmico, sobretudo na meia-estação.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em março de 2013

VISTO

O Chefe da Equipa de Projeto
Especial Edificação Sustentável



Carlos Alberto Pina dos Santos

O Conselho Diretivo



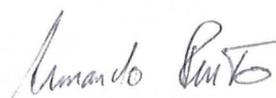
Maria de Lurdes Antunes
Vogal do Conselho Directivo

AUTORIAS



Ricardo Gomes

(Bolseiro de Investigação)



Armando Teófilo Pinto

(Investigador Auxiliar)



Carlos Alberto Pina dos Santos

(Investigador Principal)

Bibliografia

1. Matias, L.; Santos, C. Pina; Pinto, A. **Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientes no período de inverno de 2010.** Lisboa, LNEC, junho de 2010. Relatório 180/2010-ES/LNEC.
2. Matias, L.; Santos, C. Pina; Pinto, A. **Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientais no período de meia-estação de 2010.** Lisboa, LNEC, agosto de
3. Gomes, R.; Matias, L.; Santos, C. Pina; Pinto, A. **Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientais no período de inverno de 2011.** Lisboa, LNEC, agosto de 2011. Relatório 293/2011-ES/LNEC.
4. Gomes, R.; Matias, L.; Santos, C. Pina. **Net zero energy school – reaching the community Escola secundária. Condições ambientais no período de meia-estação de 2011.** Lisboa, LNEC, outubr
5. **Projeto de Reabilitação, Ampliação e Novas Construções Escola Secundária Vergílio Ferreira**, Caderno de encargos, Projeto de execução (Arquitetura).
6. **Instalações de condicionamento de ar e ventilação**, Condições técnicas, Escola Secundária Vergílio Ferreira. Revisão 01. Lisboa 25 de setembro de 2009.
7. /P/ - Leis, decretos, etc. – **Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios** Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril). Diário da República nº 67, I SÉRIE-A, p. 2416 a 2468.
8. Pinto, A.; Gomes, R. **Avaliação experimental e simulação numérica da ventilação de salas de aula de uma escola secundária**, 2012
9. Raftery, P.; Keane, M.; O'Donnell, J.; Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. Maio 2011.
10. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) **Handbook of Fundamentals** 2005, p. 8.
11. **Instalações elétricas**, Condições técnicas, Escola Secundária Vergílio Ferreira. Revisão 01. Lisboa 14 de outubro de 2009.
12. /P/ - Leis, decretos, etc. – **Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios** Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril). Diário da República nº 67, I SÉRIE-A, p. 2468 a 2513.
13. **Escola Secundária de Vergílio Ferreira Avaliação das Condições Ambiente e Análise de Medidas de Melhoria do Conforto Ambiente do Bloco H+I**, Net Zero Energy School Project, Lisboa, LNEC, 2013.