

• U



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo e análise de estratégias de arrefecimento para correção e melhoria das condições de conforto num edifício escolar

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Gonçalo Jorge Rodrigues dos Santos

Orientador

Prof. Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Coorientador

Eng. Carlos Diogo Costa da Silva

Júri

Presidente Professor Doutor Pedro Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



AC+Coger, Lda.

Coimbra, Setembro de 2012

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e gratidão. Na impossibilidade de agradecer a todos que de uma forma direta ou indiretamente contribuíram para o culminar desta caminhada, gostaria de agradecer a algumas pessoas em particular:

Ao Eng. Carlos Diogo, por todo o apoio prestado ao longo do trabalho, pela orientação, conhecimentos transmitidos, contante incentivo e amizade.

Ao Professor Adélio Gaspar pela disponibilidade para orientar este trabalho, pelas correções e pela disponibilidade.

Ao Eng. Magalhães, por me ter proporcionado a oportunidade de estagiar na AC+Coger, dando todas as condições para a realização deste trabalho, por todos os conhecimentos transmitidos e companhia diária.

Ao Eng. Telmo Costa, Eng. Machado e Eng. Tatiana pela partilha de conhecimentos e companhia diária.

Ao Cláudio Dinis e ao Pedro Rodrigues pela grande amizade, ajuda incansável, confiança transmitida, incentivo constante, força e horas perdidas para me ajudar em tudo que foi preciso.

A todos os meus amigos, que ao longo de todos estes anos estiveram ao meu lado. Ao Bruno Rodrigues, pela longa amizade, conhecimentos partilhados e pela constante ajuda nos últimos anos.

À minha família, mas em especial ao meus Pais e à Paula pelo apoio que sempre me deram em todos os momentos da minha vida.

À Carlota Carvalho pelo grande empurrão para conseguir terminar este trabalho, pelo incentivo incansável, ajuda constante, pelas horas perdidas por minha causa, pela compreensão nos momentos mais difíceis, obrigado por tudo.

Um OBRIGADO a todos!

Resumo

No presente trabalho, analisaram-se e definiram-se estratégias de arrefecimento (passivas e/ou ativas), com o objetivo de corrigir e melhorar as condições do ambiente interior num edifício escolar. Utilizou-se como caso de estudo, um edifício existente recentemente construído que possui uma elevada área de envidraçados e não contempla sistema de arrefecimento

O estudo foi efetuado com base num programa de simulação dinâmica de edifícios, o *DesignBuilder*. Para tal, criou-se um modelo de simulação com base no edifício escolar onde foram testadas os vários cenários.

Foram analisadas diversas estratégias de arrefecimento possíveis de implementar, optando-se pelo estudo de três cenários: no primeiro cenário testou-se a implementação de sistemas passivos de sombreamento (pala horizontal e grelhas); no segundo cenário simulou-se a introdução de um sistema de pré-arrefecimento do ar novo insuflado (Insuflação do ar a 20°C e 15°C) e por último realizou-se a combinação destes dois cenários (sombreamento e pré-arrefecimento do ar novo).

A influência da aplicação das estratégias de arrefecimento estudadas foi quantificada através da análise dos ganhos solares, das temperaturas interiores, dos consumos energéticos e dos índices de conforto, PMV e PPD.

Em todos os cenários conclui-se que a implementação das estratégias definidas provoca uma melhoria das condições do ambiente interior. Realçam-se os cenários onde se implementam as soluções de sombreamento com grelhas e a do conjunto de pré-arrefecimento do ar a 20°C e sombreamento com grelhas, que apresentam as melhores condições do ambiente interior de todos os cenários analisados.

Palavras-chave: Estratégias de arrefecimento, *DesignBuilder*, Índices de conforto (PMV e PPD).

Abstract

In the present work, cooling strategies (passive and/or active) for children school classrooms were analyzed and defined. The main objective was to rectify and improve the indoor environment inside the school building. The case study is a recently constructed building which has an high glazing area and does not have a cooling system.

The research was performed based on a building dynamic simulation program, *DesignBuilder*. For this purpose, a simulation model was created based on the school building and there were assayed several possibilities.

Few potential cooling strategies were studied, and three settings were chosen: in the first scenario an implementation of passive shading systems (horizontal shade and grids) was tested; in the second scenario the introduction of a pre-cooling system of inflated fresh air (inflation of air at 20°C and 15°C) was simulated; and lastly it was done a combination of these two scenarios (shading and pre-cooling of fresh air).

In order to quantify the influence of the cooling strategies employed in the present study, the following parameters were evaluated solar gains; internal temperatures, energy consumption and the thermal comfort indices, PMV and PPD.

Observing the results, it was found that the proposed strategies to be implemented lead to an improvement of the indoor environment conditions in all the scenarios. Although, the results also revealed that the best scenarios are the shading with grids and the pre-cooling air at 20°C combined with the shading grid. These two solutions present the best indoor air conditions among all the studied scenarios.

Keywords: Cooling strategies, *DesignBuilder*, thermal comfort indices (PMV and PPD).

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação e enquadramento do tema	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Estrutura do trabalho	3
2 Revisão teórica	5
2.1 Qualidade do ambiente interior.....	5
2.1.1 Qualidade do ar interior	6
2.1.2 Conforto térmico	7
2.1.3 Conforto Acústico	11
2.1.4 Conforto Visual	12
2.2 Transmissão de calor e ganhos solares associados aos vãos envidraçados	13
2.2.1 Condução, Convecção e Radiação.....	13
2.2.2 Ganhos Solares	15
2.3 Sistemas de AVAC	17
3 Caso de estudo	23
3.1 Descrição do edifício escolar	23
3.2 Estratégias estudadas	26
4 Metodologia adotada	29
4.1 Programa de simulação dinâmica	29
4.2 Modelo Base	30
4.3 Cenários adotados	33
4.3.1 Cenário I – Introdução de Sombreamento	35
4.3.2 Cenário II – Pré-Arrefecimento do Ar.....	35
4.3.3 Cenário III – Sombreamento e pré-arrefecimento do ar	37
5 Análise e Discussão de Resultados	39
5.1 Ganhos Solares	39
5.2 Temperatura do ar nas salas.....	41
5.3 Índices de Conforto.....	43
5.4 Consumo energético	45
6 Conclusões	49
7 Referências Bibliográficas	51
8 ANEXO A	53
9 ANEXO B	55
10 ANEXO C	57

11 ANEXO D..... 59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. – Fatores que influenciam a qualidade ambiental interior (adaptado de Alfano <i>et al.</i> , 2010).....	6
Figura 2.2. – Escala de conforto com sete pontos da ASHRAE (adaptado de Charles, 2003).....	8
Figura 2.3. – PPD em função de PMV (adaptado de Orosa, 2009).....	9
Figura 2.4. – Influência da temperatura na produtividade relativa (PR), em escritórios (Wargocki e Wyon, 2007 <i>apud</i> Alfano <i>et al.</i> , 2010).....	11
Figura 2.5. – Condução, convecção e radiação num vão envidraçado (adaptado de Carmody <i>et al.</i> , 2004).....	14
Figura 2.6. – Percurso do sol no período de verão e inverno (adaptado de Greenwood <i>et al.</i> , 2000).....	15
Figura 2.7. – Efeitos de transmissão e absorção da radiação solar incidente num vão envidraçado (adaptado de Moret Rodrigues <i>et al.</i> , 2009).	16
Figura 2.8. – Representação esquemática dos principais fluxos de calor do edifício (adaptado a partir de (Kaltschmitt <i>et al.</i> , 2007).....	18
Figura 3.1. – Fachada principal da Escola Básica e Jardim-de-infância EB1/J1de Vilela.	24
Figura 4.1. – Vista da fachada principal do edifício e a correspondente do modelo criado no DB.	31
Figura 4.2. – Planta em AutoCAD do rés-do-chão do edifício escolar.....	31
Figura 4.3. – Planta do rés-do-chão inserida no DB com o zoneamento realizado.....	32
Figura 4.4. – Representação esquema dos cenários adotados.	34
Figura 4.5. – Cenário I (introdução de sombreamento).....	35
Figura 4.6. – Cenário II (pré-arrefecimento do ar novo).....	36
Figura 4.7. – Cenário III (sombreamento e pré-arrefecimento do ar).	37
Figura 5.1. – Ganhos solares máximos no interior das salas.....	39
Figura 5.2. – Vista pelo exterior (modelo base).	40
Figura 5.3. – Vista do interior das salas de aula (modelo base).	40
Figura 5.4. – Vista pelo exterior (sombreamento com pala horizontal).....	40
Figura 5.5. – Vista interior das salas (sombreamento com pala horizontal).	40
Figura 5.6. – Vista pelo exterior (sombreamento com grelhas).	40
Figura 5.7. – Vista do interior das salas (sombreamento com grelhas).....	40
Figura 5.8. – Percentagens de horas por categoria de conforto dos diversos cenários.....	43
Figura 8.1. – Planta do 1º piso inserida no DB com o zoneamento realizado.....	53

Figura 8.2. – Planta em AutoCAD do 1º piso do edifício escolar.....	53
Figura 10.1. – Perfil de ocupação.....	57
Figura 10.2. – Perfil de Iluminação.....	57
Figura 10.3. – Perfil do sistema de AVAC.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. – Categorias de ambiente térmico global obtidas pela previsão da percentagem de insatisfeitos (PPD) e com base no índice PMV (Orosa, 2009). ...	10
Tabela 2.2. – Recomendações da norma ASHRAE 55 (Orosa 2009).	10
Tabela 3.1. – Número de espaços existentes em cada piso do edifício escolar.	23
Tabela 3.2. – Constituição das envolventes e respetivos coeficientes de transmissão térmica.	25
Tabela 3.3. – Soluções ativas e passivas. Adaptado de: Bradshaw, 2006).	27
Tabela 5.1. – Ganhos solares anuais e máximo diário.	41
Tabela 5.2. – Número de horas em função dos intervalos de temperaturas e temperaturas máximas registada (cenário I, II e III).	42
Tabela 5.3. – Índices de conforto, PMV e PPD de todos os cenários.	44
Tabela 5.4. – Consumos anuais de energia final e primária.	46
Tabela 9.1. – Zoneamento do edifício escolar e respetivos parâmetros característicos.	55

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

τ_s – transmitância solar (-)

ρ_s – refletância (-)

α_s – absorvância (-)

τ_v – transmitância visível (-)

$\tau_s \times I$ – taxa de energia incidente transmitida instantaneamente para o interior (W/m^2)

q_i – taxa de energia absorvida que passa posteriormente para o interior (W/m^2)

q_e – taxa de energia absorvida que passa posteriormente para o exterior (W/m^2)

g_v – fator solar do vidro (-)

I – radiação solar incidente (W/m^2)

U – coeficiente de transmissão térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

R – resistência térmica ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$)

Siglas

AQS – Águas quentes Sanitárias

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

COP – *Coefficient of Performance*

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*

DB - *DesignBuilder*

E+ - *EnergyPlus*

PMV – *Predicted Mean Vote*

PPD – *Predicted Percentage Dissatisfied*

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e enquadramento do tema

Nos últimos anos, a preocupação com a qualidade do ambiente interior, tanto em edifícios residenciais como de serviços, tem vindo a aumentar. Este facto deve-se não só ao aumento da exigência das pessoas, mas também ao incremento de conhecimento e investigação na área. Está provado que uma gestão cuidada da qualidade ambiental interior pode trazer um enorme benefício em diversos aspetos, desde a saúde e bem-estar dos ocupantes, até ao aumento da sua produtividade. Estes fatores traduzem-se num aumento do padrão de qualidade das condições de conforto baseadas, na maioria das vezes, em estratégias de controlo que recorrem a equipamentos e sistemas de climatização.

Os novos projetos desenvolveram-se de modo que, quando um novo edifício é construído, ou restaurado, se tenha em atenção mais aspetos, em relação ao que acontecia no passado. Assim, são cumpridos de uma forma mais rigorosa, requisitos como a segurança, poupança de energia, manutenção, sustentabilidade e conforto dos ocupantes. Tornou-se inevitável uma avaliação mais cuidada na implementação de medidas que visem o desenvolvimento sustentável. Estas medidas passam pelo uso de materiais de construção adequados na envolvente do edifício, pela utilização de sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento ou ainda pela utilização de energias renováveis.

“O sector residencial e terciário, a maior parte do qual constituído por edifícios, absorve mais de 40 % do consumo final de energia da Comunidade e encontra-se em expansão, tendência que deverá vir a acentuar o respetivo consumo de energia e, por conseguinte, as correspondentes emissões de dióxido de carbono” (Comissão Europeia, 2002). Perante esta problemática, na Diretiva 2002/91/CE, a União Europeia (2002) publicou um incentivo aos seus estados membros com o intuito de promover uma melhoria do desempenho energético dos edifícios, levando a que exista um maior cuidado nas considerações introdutórias no momento do projeto (condições climáticas externas e condições locais), e também a uma maior exigência no que concerne ao clima interior e rentabilidade económica.

A diretiva foi transposta para Portugal através de regulamentação específica para os edifícios, (Decretos-Lei 78,79,80 de 2006). O Decreto-Lei 78 de 2006, traduz-se no Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios (SCE), sistema este que certifica os edifícios quanto à boa aplicação do Regulamento Dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios (RSECE) e Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). O RSECE regula a instalação e a utilização de sistemas energéticos de climatização nos edifícios, com o objetivo de economizar e promover uma utilização mais racional da energia. Por sua vez o RCCTE visa implementar medidas de redução dos consumos energéticos associados ao conforto térmico e à qualidade do ambiente interior, através da melhoria da qualidade térmica da envolvente.

O presente trabalho surge então nesta problemática, mais precisamente no estudo de um edifício escolar. Nos últimos anos, verificou-se uma nova requalificação do parque escolar nos quais, fruto dos atuais padrões de conforto e qualidade do ar interior, estão a ser generalizados os sistemas de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC). A introdução destes sistemas pressupõe um aumento dos consumos energéticos, razão pela qual, em algumas zonas do país, apenas contemplam sistema de aquecimento. Devido à elevada estanquicidade, verificada nos edifícios construídos recentemente, verifica-se uma degradação das condições de conforto térmico nos períodos de maior calor. As intervenções corretivas, as adaptações e melhoramentos entretanto efetuados processaram-se de forma isolada, quer por iniciativa das Direções Regionais de Educação e/ou das próprias escolas, quer no âmbito de programas específicos de reequipamento da responsabilidade do Ministério da Educação.

Neste âmbito, os programas de simulação dinâmica de edifícios são ferramentas essenciais para a realização de estudos de otimização. Estes permitem uma avaliação dos parâmetros que influenciam o comportamento térmico e o conforto interior, contribuindo assim para a escolha de soluções cada vez mais eficientes. No presente estudo utiliza-se o software *DesignBuilder* (DB) para fazer a simulação do edifício escolar em questão.

1.2 Objetivo

O presente estudo pretende definir estratégias de arrefecimento passivas e/ou ativas que permitam a melhoria das condições do ambiente interior num edifício escolar, localizado na região do Porto localidade de Vilela.

O estudo destas estratégias deve-se ao facto de o edifício só ter sistema de aquecimento (por opção) e após o início de utilização, verificou-se que existiam alguns problemas de elevadas temperaturas nas salas de aula. Devido a inexistência de sistema de arrefecimento foi necessário estudar algumas possíveis medidas de intervenção, para a resolução desse problema.

Todas as estratégias e medidas de correção que são efetuadas neste estudo são realizadas através da utilização do programa de simulação dinâmico DB.

Para cumprir com o objetivo, este trabalho foi dividido em quatro partes:

1. Contato inicial e familiarização com o programa de simulação dinâmica;
2. Implementação do edifício escolar no software;
3. Teste de soluções passivas e ativas;
4. Análise crítica dos resultados obtidos nas simulações efetuadas.

1.3 Estrutura do trabalho

Depois da apresentação do tema em estudo e descrição dos objetivos deste trabalho (capítulo 1), o texto da dissertação encontra-se dividido em cinco capítulos fundamentais.

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão teórica dos fundamentos necessários para a elaboração do trabalho. São descritos conceitos relacionados com a qualidade do ambiente interior; da transmissão de calor e ganhos solares nos vãos envidraçados e sistemas de AVAC.

O capítulo 3 apresenta a descrição do edifício escolar em estudo e também as estratégias analisadas para a melhoria da condição do ambiente interior.

No capítulo 4 são apresentadas as metodologias adotadas como estratégias de arrefecimento. É feita uma apresentação do programa de simulação utilizado (DB) e feita uma descrição de todos os cenários estudados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados relativos aos ganhos solares, às temperaturas nas salas, aos índices de conforto (PMV e PPD) e consumos energéticos, com a respetiva análise e discussão.

No capítulo 6 as conclusões referem as principais constatações ao longo do trabalho. São também apresentadas algumas sugestões para futuros estudos.

2 REVISÃO TEÓRICA

Como o objetivo deste trabalho está englobado na temática da qualidade do ambiente interior, ao longo deste capítulo são apresentados temas como conforto térmico, qualidade do ar interior e uma breve descrição do conforto visual e acústico.

Neste capítulo são também abordados temas como a transmissão de calor e ganhos solares, fundamentais para a compreensão do trabalho efetuado.

Por último é feita uma breve descrição de sistemas de climatização, com especial atenção para os sistemas de arrefecimento.

2.1 Qualidade do ambiente interior

Um ambiente interior confortável proporciona um bom desempenho e produtividade de um indivíduo. As condições ambientais interiores afetam diretamente os consumos energéticos de um edifício, sendo importante determinar os fatores que influenciam a qualidade do ambiente no momento em que se avalia ou projeta um dado edifício. De acordo com Alfano *et al.* (2010), estes fatores são:

- Condições exteriores (sol, temperatura exterior, ruído ambiente, luz natural);
- Tipo de edifícios (fachada, mobiliário, materiais de construção);
- Sistema do edifício (iluminação, sistemas AVAC);
- Atividades humanas (limpezas, utilização de equipamentos).

Como se pode visualizar na Figura 2.1, a qualidade ambiental interior é diretamente dependente da coexistência de quatro componentes básicos: o conforto térmico, a qualidade do ar interior, o conforto acústico e o conforto visual.

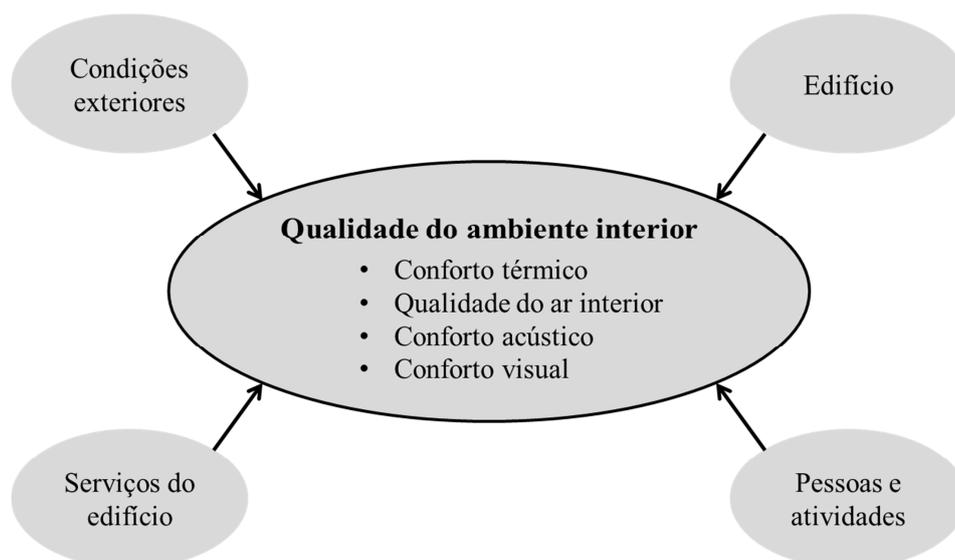


Figura 2.1. – Fatores que influenciam a qualidade ambiental interior (adaptado de Alfano *et al.*, 2010).

Tem-se verificado uma crescente preocupação com o conforto térmico e com a qualidade do ar no interior dos edifícios, especialmente nos edifícios escolares que apresentam características particulares. O público-alvo destas instalações são crianças e jovens, para os quais cuidados a ter ao nível da qualidade do ar deverão ser necessariamente redobrados, uma vez que são um público mais sensível tanto à poluição atmosférica, como temperatura (Cartieaux *et al.*, 2011).

2.1.1 Qualidade do ar interior

A Qualidade do Ar Interior (QAI) é avaliada de acordo com parâmetros físicos, químicos e biológicos. Os parâmetros físicos são a temperatura e a humidade relativa; os indicadores químicos englobam o dióxido de carbono (CO₂), o monóxido de carbono (CO), o formaldeído (HCHO) e os compostos orgânicos voláteis (COV) e, finalmente, dos indicadores biológicos fazem parte os fungos, as bactérias e a *Legionella* (Asadi *et al.*, 2011). De entre os fatores que afetam a QAI destacam-se a poluição exterior, os equipamentos de ventilação, os equipamentos e mobiliários e a atividade humana (Clements-Croome *et al.*, 2008).

Segundo Clements-Croome *et al.* (2008), uma baixa qualidade do ar no interior dos edifícios pode ser responsável por uma diminuição do desempenho dos alunos. Por sua vez, uma boa qualidade de ar no interior das salas de aula pode melhorar a concentração dos alunos e até aumentar a produtividade dos professores. Por este motivo, as escolas

devem ser projetadas, construídas e mantidas de forma a minimizar e controlar as fontes de poluição. Isto é conseguido utilizando uma adequada exaustão e ventilação do ar exterior, quer por meio natural ou mecânico, e devem garantir condições de temperatura e humidade apropriadas (EPA, 2000).

2.1.2 Conforto térmico

De acordo com a norma ASHRAE 55 (2004), conforto térmico pode ser definido como a condição da mente de um indivíduo que expressa satisfação relativamente ao ambiente térmico que o rodeia. Segundo Alfano *et al.* (2010), para que seja atingido o conforto térmico geral considera-se o corpo como um todo, não se podendo verificar desconforto térmico local, relacionado com a transferência térmica de partes do corpo. O conforto térmico geral está estritamente relacionado com a manutenção constante da temperatura interna corporal. Por outras palavras, os sistemas de termorregulação do organismo permitem que o corpo mantenha uma neutralidade térmica, uma vez que conservam a temperatura interna a 37°C, ao mesmo tempo que a externa pode variar entre um máximo de 45°C e um mínimo que depende da parte do corpo.

Deste modo, o corpo humano apresenta-se como um sistema termodinâmico, que gera energia térmica e interage com o meio ambiente. Esta interação ocorre por fenómenos de troca calor por convecção, radiação, respiração e evaporação, sendo o balanço térmico do corpo humano expresso pela equação (2.1):

$$S = M - W - E - E_{\text{res}} - C_{\text{res}} - C - R - K \quad (2.1)$$

em que:

S = taxa de armazenamento de calor corporal (W);

M = taxa de metabolismo (W);

W = trabalho mecânico exterior (W);

E = potência térmica por evaporação na pele (W);

E_{res} = potência térmica por evaporação na respiração (W);

C_{res} = potência térmica por convecção na respiração (W);

C = potência térmica por convecção (W);

R = potência térmica por radiação (W);

K = potência térmica por condução (W).

A equação do balanço térmico expressa o estado térmico do corpo humano. Este atinge o conforto térmico global quando o armazenamento de calor corporal é nulo. No entanto, é importante ter em conta que este equilíbrio pode ser atingido sem que se tenha alcançado o conforto térmico, pois pode atingir-se o equilíbrio térmico sob condições de desconforto.

De modo a determinar as condições térmicas apropriadas, os especialistas criaram normas, como a ISO 7730 (CEN, 2005) e a ASHRAE 55 (2004). Estas definem as escalas de temperatura que devem promover uma satisfação térmica a pelo menos 80 % dos ocupantes de um determinado espaço. As referidas normas baseiam-se em modelos matemáticos desenvolvidos em 1970 por Povl Ole Fanger e seus colegas, com base em estudos de laboratório e em câmaras climáticas. Foi assim desenvolvido o modelo de conforto térmico global, conhecido pelo parâmetro PMV (*Predicted Mean Vote*), votação média previsível. Nestes estudos os participantes vestiam roupas normalizadas/protótipadas e realizavam tarefas padronizadas, em que a variável era a exposição a diferentes ambientes térmicos. Num dos casos os participantes eram questionados sobre a sensação de quente ou frio, perante determinadas condições térmicas, usando para isso a escala de 7 pontos de sensação térmica da ASHRAE como se pode ver na Figura 2.2. Noutros estudos eram os próprios participantes que escolhiam a temperatura ambiente, ajustando-a ao ponto neutro.

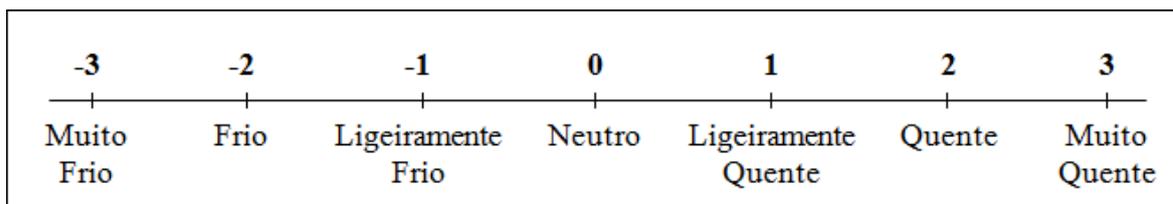


Figura 2.2. – Escala de conforto com sete pontos da ASHRAE (adaptado de Charles, 2003).

O modelo PMV combina quatro variáveis físicas - temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante, e humidade relativa - e duas variáveis pessoais – isolamento térmico do vestuário e nível da atividade física. Este índice fornece um resultado que corresponde à escala de sensação térmica da ASHRAE e representa a média de sensação térmica sentida por um grupo grande de pessoas, num determinado espaço. Assim, o índice PMV é utilizado essencialmente para avaliar as condições de conforto ou de desconforto térmico, em ambientes fechados.

Fanger (1970) baseou o cálculo do índice PMV, assumindo que existe uma relação entre a sensação térmica e a carga térmica (L). Esta relação é definida como a diferença entre a produção de calor interna ($M - W$) e a perda de calor para o ambiente circundante. Neste pressuposto assume que se trata de um indivíduo com valores de conforto da temperatura média da pele e da secreção de suor no nível real da atividade. O mesmo autor assumiu ainda que na condição de neutralidade térmica, a carga térmica é igual a zero. Deste modo, a equação que descreve a relação entre PMV e a carga térmica é dado por (2.2) :

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (2.2)$$

Fanger desenvolveu ainda outro índice designado de PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*), na literatura portuguesa designado de percentagem de pessoas insatisfeitas. Este índice é calculado a partir do PMV e representa a percentagem de pessoas insatisfeitas, com determinado ambiente térmico a que estão sujeitas, votando um valor absoluto acima de ± 2 na escala de conforto (ver Figura 2.2). A relação entre PMV e PPD é dada pela seguinte equação (2.3):

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (2.3)$$

Graficamente, o PMV e o PPD formam uma relação em forma de U, onde a percentagem de insatisfeitos aumenta para valores de PMV acima e abaixo de zero (temperatura neutra) (Charles, 2003; Alfano *et al.*, 2010).

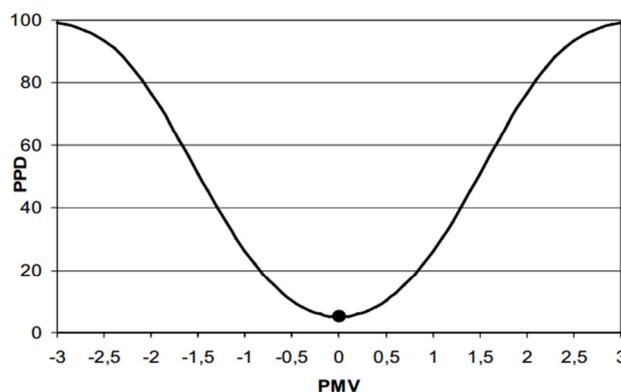


Figura 2.3. – PPD em função de PMV (adaptado de Orosa, 2009).

De acordo com este modelo, podem ocorrer três categorias de conforto térmico global, dependendo das variações aceitáveis de PPD e de PMV. Estas três condições de conforto apresentam-se expressas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. – Categorias de ambiente térmico global obtidas pela previsão da percentagem de insatisfeitos (PPD) e com base no índice PMV (Orosa, 2009).

Conforto	PPD (%)	Variação do PMV
A	< 6	- 0,2 < PMV < 0,2
B	< 10	- 0,5 < PMV < 0,5
C	< 15	- 0,7 < PMV < 0,7

Se se tomar o corpo como um todo, os índices PMV e PPD tornam-se excelentes ferramentas para avaliar as condições de conforto ou desconforto. Todavia, é necessário ter em linha de conta eventuais situações de desconforto térmico local (indesejado aquecimento ou arrefecimento de uma parte particular do corpo), que podem tornar insuficiente o recurso a este modelo na avaliação das condições de conforto ou desconforto térmico. De entre os fatores que podem causar desconforto térmico local, destacam-se: as correntes de ar, as diferenças de temperatura de ar na vertical, os pavimentos demasiado quentes ou frios e as assimetrias na temperatura radiante.

Baseada no modelo PMV, a norma ASHRAE 55 recomenda as condições de conforto térmico aceitáveis para o inverno e para o verão. Estas condições de temperatura encontram-se representadas na Tabela 2.2 e pressupõem que uma vez aplicadas, 90 % dos ocupantes se sintam termicamente satisfeitos (Orosa, 2009).

Tabela 2.2. – Recomendações da norma ASHRAE 55 (Orosa 2009).

Estação do ano	Temperatura operativa	Variação aceitável
Inverno	22°C	20-23°C
Verão	24,5°C	23-26°C

Estas condições assumem uma humidade relativa de 50 %, uma velocidade média relativa inferior a 0,15 m/s, uma temperatura média radiante igual à temperatura do ar e uma taxa metabólica de 69,78 W/m². A resistência térmica do vestuário foi definida de 0,1395 m².°C/W no inverno e 0,0775 m².°C/W no verão (Orosa, 2009).

Vários estudos têm revelado que a temperatura na sala de aula irá afetar a capacidade de compreensão dos estudantes. Pequenas alterações na temperatura ambiente, mesmo dentro da zona de conforto, afetam a capacidade dos alunos de desempenharem tarefas mentais que requeiram concentração, como adição, multiplicação e compreensão de textos. Globalmente, a temperatura mais elevada tende a reduzir o desempenho, enquanto a temperatura mais baixa reduz a destreza e a velocidade (Zeiler e Boxem, 2009).

No ano de 1997 o departamento da educação do Reino Unido recomendava que os sistemas de controlo de temperatura mantivessem o ar interior a uma temperatura compreendida entre os 18-21°C (Orlowski *et al.*, 1997). Segundo Zeiler e Boxem (2009), temperaturas acima dos 23,9°C produzem um aumento da respiração, diminuem o desempenho físico e proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento de doenças. Os mesmos autores indicam que reduzindo a temperatura da sala de aula de 25°C para 20°C, o desempenho dos estudantes melhora (Wargocki e Wyon, 2007). De acordo com Seppänen *et al.*, (2005), *apud* Alfano *et al.*, (2010) a temperatura afeta de forma significativa a produtividade. Esta relação encontra-se representada na Figura 2.4, onde se verifica que a média da produtividade reduz cerca de 2 %, por cada grau Celsius, acima dos 25°C.

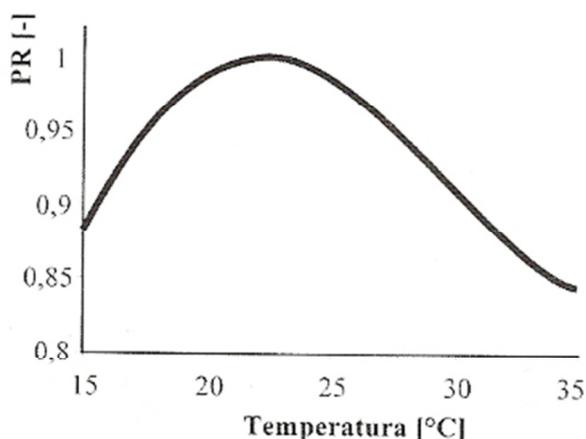


Figura 2.4. – Influência da temperatura na produtividade relativa (PR), em escritórios (Wargocki e Wyon, 2007 *apud* Alfano *et al.*, 2010).

2.1.3 Conforto Acústico

Boas condições acústicas são fundamentais numa sala de aula onde o excessivo barulho de fundo ou o eco interferem com o discurso, criando uma barreira acústica à aprendizagem. Um mau acondicionamento acústico das salas e o ruído proveniente do

exterior ou de outras divisões próximas, podem gerar incómodo com impacto direto no aluno e/ou professor: redução da concentração; diminuição da inteligibilidade do discurso e problemas na voz.

Em salas de aula com uma boa acústica o ensino é mais eficaz e gera menos stress, permite mais interações verbais e são necessárias menos repetições entre os professores e os alunos. Assim, a aprendizagem é mais fácil, melhor sedimentada e menos cansativa (Astolfi *et al.*, 2003; Alfano *et al.*, 2010).

2.1.4 Conforto Visual

O conforto visual é também um requisito importante que deve ser garantido numa sala de aula. O aspeto do ambiente da sala e a forma como é sentido pelos ocupantes está diretamente relacionado com a capacidade dos alunos se manterem concentrados durante o tempo da aula. A aprendizagem é facilitada se existir um nível de luminosidade adequado à superfície das secretárias e sobre o quadro/projeção, pois estas condições permitirão uma melhor escrita e leitura. No entanto, a intensidade luminosa não é o único aspeto importante para o conforto visual. Também é importante o aspeto qualitativo:

- Uma distribuição uniforme da luz na zona de trabalho, de forma a evitar stress e fadiga;
- Ausência de brilho devido à incidência direta ou refletida de uma fonte de luz;
- Possibilidade de obscurecer o ambiente ou, pelo contrário, permitir a visualização do exterior,
- Perceção das variações climáticas e do avançar do dia.

Para obter boas condições globais de luminosidade é fundamental garantir uma contribuição da luz natural, de modo a desenvolver um ambiente luminoso mais apazível, com as cores a transmitirem um aspeto natural. Para além disso, a luz natural permite um decréscimo no consumo da eletricidade. O relógio biológico é também influenciado pela iluminação, regulando processos fisiológicos como: o ciclo circadiano; temperatura corporal e estado de atenção. Deste modo, uma iluminação deficiente pode contribuir para irritação ocular, dores de pescoço, dores ombros, fadiga e dores de cabeça (Astolfi *et al.*, 2003).

2.2 Transmissão de calor e ganhos solares associados aos vãos envidraçados

Visto que o edifício escolar, em estudo, tem uma elevada área de envidraçados, neste subcapítulo, são abordados conceitos como condução, convecção e radiação. Para além destes processos de transferência de calor, são analisados temas como o percurso do sol e respetiva influência nos ganhos solares do edifício. Os parâmetros que permitem quantificar as trocas de calor, que ocorrem a nível de um vão envidraçado, como o coeficiente de transmissão térmica e o fator solar, são também objeto de estudo.

2.2.1 Condução, Convecção e Radiação

A transferência de calor pode resultar de três fenómenos:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

A condução ocorre sobretudo nos sólidos, mas também em gases e líquidos. Este processo é definido como a transferência de calor de um ponto a uma temperatura mais elevada para um ponto a uma temperatura mais baixa, devido à excitação de átomos e moléculas que constituem a matéria.

A convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido (líquido ou gás) que se encontra em movimento adjacente à superfície. A convecção envolve, simultaneamente, os efeitos da condução e do movimento do fluido, visto que engloba não só a colisão interna entre átomos e moléculas, mas também o movimento das partículas que constituem o fluido. Este modo de transferência de calor pode ser dividido em dois tipos: a convecção forçada e a natural.

Como é possível verificar na Figura 2.5, as correntes de convecção, num vão envidraçado, ocorrem em três locais. Junto às faces interiores e exteriores do vidro e, no caso de um vidro duplo, a convecção ocorre também entre os dois vidros.

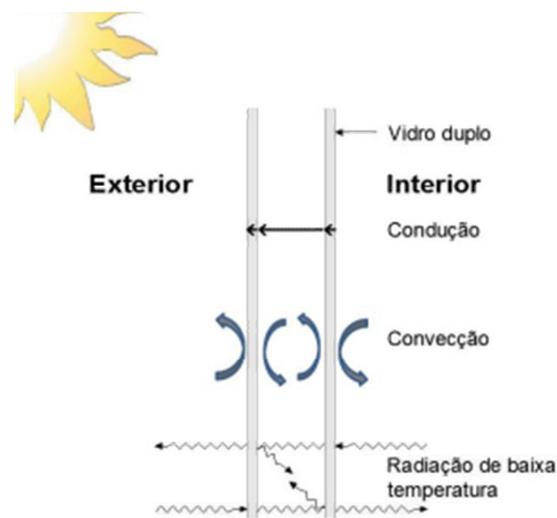


Figura 2.5. – Condução, convecção e radiação num vão envidraçado (adaptado de Carmody *et al.*, 2004).

Por último, de acordo com (Grupo de Trabalho do Atlas, 1988 *apud* Cole, 1980), a radiação é a forma de transferência de energia que não requer meio intermédio, nem contacto com o corpo radiante. A radiação solar é a emissão de energia, sob a forma de ondas eletromagnéticas, provenientes do Sol e pode ser dividida em radiação solar direta e difusa. A radiação solar direta corresponde àquela que atravessa unidireccionalmente a atmosfera e atinge a superfície terrestre, ao contrário da radiação solar difusa que sofre diversos desvios nas partículas da atmosfera. A radiação que atinge o vão envidraçado é constituída por estes dois tipos de radiação solar.

A transferência de calor por radiação pode ser dividida ainda em radiação de grande comprimento de onda e de baixo comprimento de onda. Carmody *et al.* (2004) referem que todos os corpos que se encontram à mesma temperatura (mesmo à temperatura ambiente), emitem sempre radiação, existindo uma troca de calor entre si. Este tipo de radiação é designado por radiação de grande comprimento de onda, ou de baixa temperatura, e engloba uma gama de comprimentos de onda dos 3 aos 50 μ m. Já a radiação de baixo comprimento de onda provém diretamente do sol e verifica-se para comprimentos de onda a variar entre 0.3 e 2.5 μ m. Esta é constituída pela radiação ultravioleta, visível e infravermelha.

2.2.2 Ganhos Solares

Os ganhos solares num vão envidraçado dependem de diversos parâmetros, entre os quais, a radiação solar, o percurso do sol ao longo do ano, o coeficiente de transmissão térmica e o fator solar.

O percurso do sol varia ao longo do dia e ao longo do ano. Os ganhos solares, no vão envidraçado, dependem do ângulo de incidência dos raios solares que o atingem. No verão, o percurso solar é mais próximo do zénite, de modo que numa fachada orientada a sul, a incidência de raios solares faz-se com ângulos menores. Em relação ao inverno acontece o contrário, isto é, o percurso do sol é quase perpendicular aos vãos envidraçados. Deste modo, no período de inverno, numa fachada orientada a sul existe uma maior radiação solar direta a incidir no vão envidraçado, durante a manhã e início da tarde. Na Figura 2.6 encontra-se representado o percurso solar durante o período de inverno e de verão.

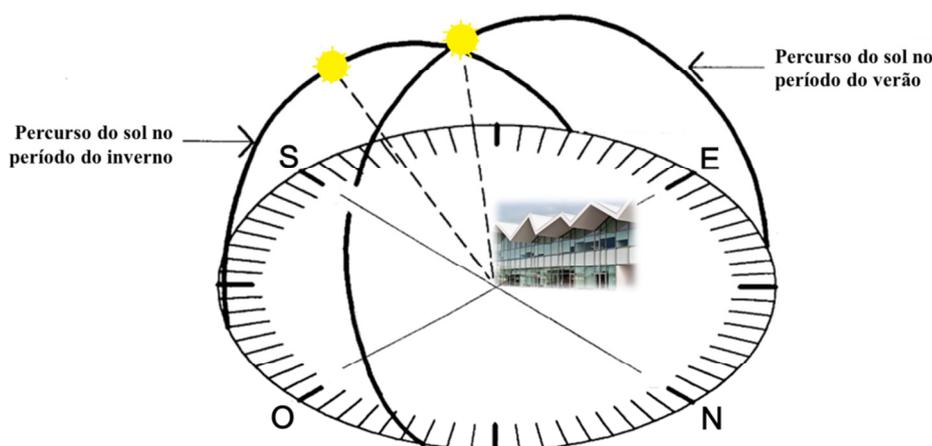


Figura 2.6. – Percurso do sol no período de verão e inverno (adaptado de Greenwood *et al.*, 2000).

Enunciados os aspetos necessários a fundamentação das trocas de calor por radiação no envidraçado, é possível explicar a ação da radiação solar no vidro de um vão envidraçado e apurar a parte desta que efetivamente é um ganho de calor para os edifícios.

Da radiação solar direta e difusa que incide no vão envidraçado, uma parte é transmitida para o interior, outra é refletida para o exterior e outra é absorvida pelo vidro. No entanto, parte da energia que é absorvida pelo vidro, volta para o exterior e a restante passa posteriormente para o interior. Como se verifica na Figura 2.7. O quociente entre cada uma das partes descritas anteriormente e a radiação total incidente representam as

propriedades óticas (solares) do vidro e são designadas por transmitância (τ_s), refletância (ρ_{sl}) e absortância (α_s).

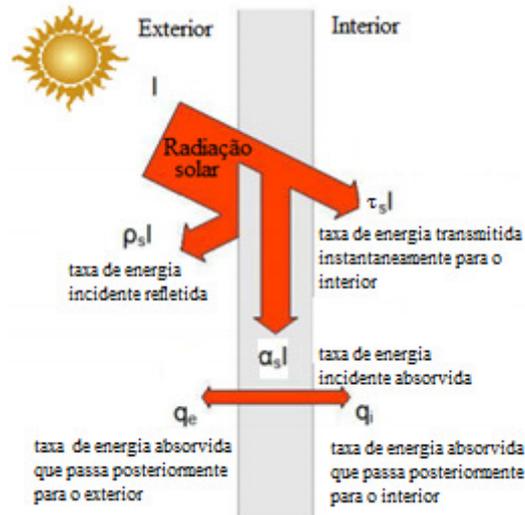


Figura 2.7. – Efeitos de transmissão e absorção da radiação solar incidente num vão envidraçado (adaptado de Moret Rodrigues *et al.*, 2009).

A transmitância é a percentagem de radiação que atravessa instantaneamente o vidro. Para além da transmitância solar existe a transmitância visível (τ_v), que corresponde a quantidade de luz visível que ultrapassa o vidro (quanto maior τ_v , maior a luz visível que transpõem o vidro). No que diz respeito a refletância, consta na capacidade do vidro em refletir parte da radiação incidente. Por último, a propriedade responsável pela absorção de parte da radiação incidente é a absorvância, esta é responsável pelo aumento de temperatura no vidro. Existe ainda uma propriedade que não foi enunciada, que é a emitância ou emissividade, corresponde a capacidade do vidro absorver e radiar energia a baixa temperatura.

A energia solar que passa através do envidraçado para o interior da habitação é constituído por duas parcelas, como se pode ver na Figura 2.7. Uma corresponde à parcela da energia incidente transmitida instantaneamente para o interior ($\tau_s \times I$) e outra a energia absorvida que passa posteriormente para o interior (q_i).

Existe um terceiro parâmetro que engloba as duas parcelas descritas anteriormente, que contempla a totalidade da radiação solar que entra na habitação. Esse parâmetro é o fator solar do vidro (g_v), que é definido no RCCTE (2006) como o quociente entre a energia solar transmitida para o interior ($\tau_s \times I + q_i$) através do vão envidraçado

com o respetivo dispositivo de proteção e a energia da radiação solar que nele incide (I). O fator solar do vidro é dado pela equação (2.4):

$$g_v = \frac{\text{Ganho de calor solar através do vidro}}{\text{Radiação incidente}} = \frac{\tau_s \times I + q_i}{I} \quad (2.4)$$

De acordo com Moret Rodrigues *et al.* (2009), o fator solar do vidro depende do ângulo de incidência da radiação, mas tem pouca variação até ângulos de incidência de radiação de cerca de 50° com a normal do vidro.

Por último (para quantificar o fluxo de calor que ocorre ao nível de uma janela) é necessário introduzir o parâmetro denominado de coeficiente de transmissão térmica (U), que é expresso em W/m².°C. Segundo descrito no RCCTE (2006) o coeficiente de transmissão térmica é a quantidade de calor por unidade de tempo que passa por uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que a separa. De uma forma mais clara, U representa o fluxo de calor que atravessa 1m² da superfície para uma diferença de temperatura de 1°C entre o interior e o exterior. É também inversamente proporcional à resistência térmica R, ou seja quanto maior o isolamento térmico, menor o coeficiente térmico de uma janela. O coeficiente de transmissão térmica num vão envidraçado pode ser apresentado de duas maneiras:

- U apenas para os vidros;
- U para todo o vão, isto é, incluindo também o efeito dos caixilhos na transmissão de calor;

Conclui-se assim que o coeficiente de transmissão térmica para o vão envidraçado vai depender da área da caixilharia e do tipo de vidro.

2.3 Sistemas de AVAC

Neste subcapítulo pretendem-se apresentar as principais características dos sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) nos edifícios em geral. Em algumas ocasiões, serão referidos casos específicos ocorridos em edifícios escolares. Este tipo de sistema tem como objetivo obter o conforto térmico dos ocupantes, mas também uma boa QAI, por ventilação e com uma adequada filtragem (Alfano *et al.*, 2010).

Este tipo de instalação deve ser capaz de manter todo o ano, e em todos os ambientes condicionados, a temperatura desejada e humidade relativa aceitável. Tem que assegurar dentro das zonas ocupadas, a velocidade do ar nos limites requeridos para proporcionar condições de conforto.

Num edifício podem encontrar-se vários fluxos de energia (ver Figura 2.8). A energia é principalmente fornecida por intermédio de sistemas de aquecimento, calor criado pelos indivíduos, luminosidade e eletrodomésticos (vulgarmente designados de ganhos de calor internos) e ganhos térmicos devido ao Sol, (calor criado pelas superfícies transparentes). As perdas ou ganhos de calor (dependendo da temperatura ambiente) ocorrem devido à condutividade térmica da envolvente do edifício. Outras perdas de calor são atribuídas à ventilação e infiltração requeridas, geralmente, para manter uma determinada qualidade do ar e/ou prevenir o sistema de exceder os níveis prescritos de dióxido de carbono (CO_2) e outras substâncias prejudiciais, humidade do ar e alguns odores. No interior do edifício, pode-se absorver ou re-irradiar energia adicional através da massa térmica disponível na forma de radiação solar absorvida. A massa térmica pode ainda absorver e armazenar calor no caso de sobreaquecimento. O calor é apenas libertado se a massa térmica se tornar mais quente do que a temperatura ambiente (Kaltschmitt *et al.*, 2007).

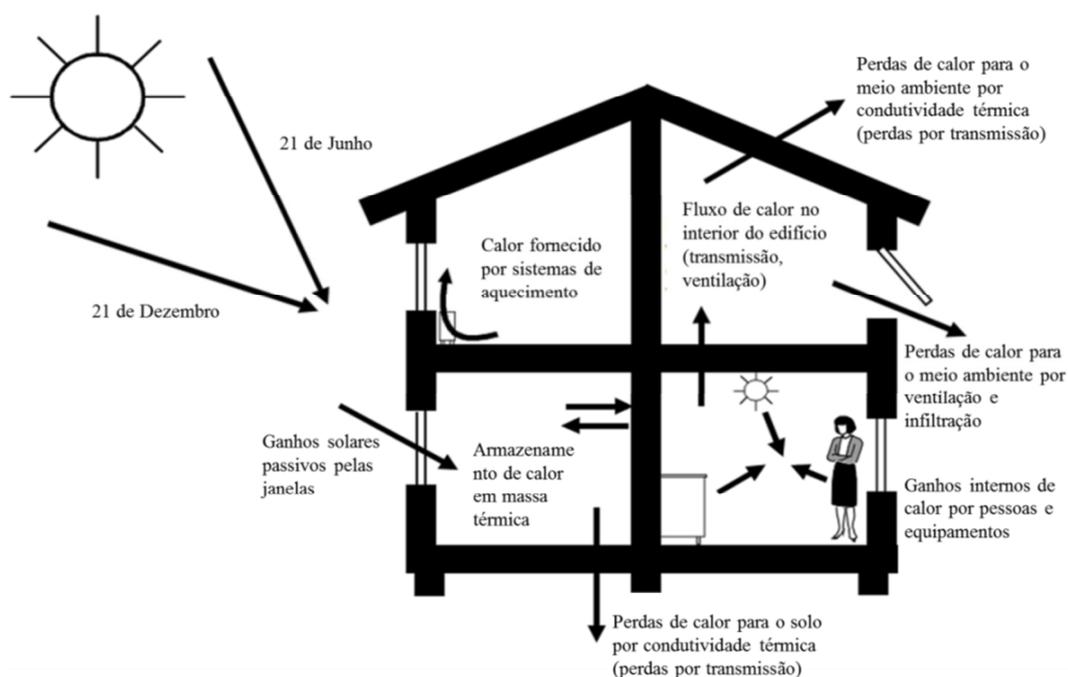


Figura 2.8. – Representação esquemática dos principais fluxos de calor do edifício (adaptado a partir de (Kaltschmitt *et al.*, 2007).

Um problema que se coloca neste tipo de sistemas/instalações é o de conseguir a manutenção de temperaturas em diferentes zonas, dentro dos limites estabelecidos pelo projeto. Esta questão coloca-se essencialmente quando num edifício existam determinadas zonas que necessitam de ser aquecidas e outras ser arrefecidas. Este fato acontece porque as cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, evoluem no tempo de forma diferente em diferentes zonas de um edifício. Isto deve-se a influência da radiação solar, temperatura exterior, variação de ocupação e outras causas (Chaves, 2009).

Conforme a necessidade dos locais a climatizar (e verbas para colocação de um sistema de AVAC), é possível instalar apenas sistemas de aquecimento, de arrefecimento ou ambos. No entanto, neste último caso, só alguns sistemas permitem aquecimento e arrefecimento em simultâneo, ou seja, arrefecer algumas zonas e ao mesmo tempo aquecer outras (normalmente estes tipos de necessidades ocorrem na meia estação). Se o sistema instalado não permitir o aquecimento e arrefecimento em simultâneo, a instalação funcionará apenas num dos regimes. Deste modo, as corretas condições apenas são garantidas em algumas salas (Roriz, 2007b).

Quanto a caracterização dos sistemas é possível agrupá-los de duas formas:

- Área servida pelo sistemas
- Tipo de fluido térmico

No que diz respeito à área servida pelo sistema, esta divide-se em:

- Sistema centralizado: serve a maior parte do edifício ou mesmo a sua totalidade. O circuito primário encontra-se na zona técnica e a climatização das zonas é feito através do fluido térmico que circula no circuito secundário;
- Sistema individual: é apenas um aparelho ou um conjunto de aparelhos que serve apenas uma parte do edifício (ex: splits);
- Sistema semi-centralizado: é o caso de volume de refrigerante variável (VRV), existe apenas um circuito primário (fluido frigorígeno) que vai até aos locais a climatizar.

Os sistemas podem também ser classificados quanto ao tipo de fluido térmico (fluido secundário) utilizado.

- Tudo-ar: a energia térmica para vencer as cargas térmicas dos espaços é distribuída por ar (antecipadamente aquecido ou arrefecido numa Unidade de Tratamento de Ar – UTA);
- Tudo-água: a energia térmica para vencer as cargas térmicas dos espaços é distribuída por água (água refrigerada ou aquecida);
- Ar-água: em que é utilizado simultaneamente como fluido térmico a água e o ar.

O aquecimento ou arrefecimento do fluido térmico pode ser conseguido de várias formas. O aquecimento ou arrefecimento pode ser conseguido recorrendo a diversos equipamentos, existentes no mercado, de modo que, um sistema AVAC não tem obrigatoriamente uma só solução fixa. Existe uma grande variedade de equipamentos que podem ser utilizados numa instalação de climatização. Esses equipamentos são: Caldeiras, Bombas de calor, Unidades de Arrefecimento de Ar (unidades compactas e *chillers* a ar), Unidades Produtoras de Água Refrigerada (UPARs), normalmente designada por *chiller* a água, painéis solares, equipamentos de cogeração, compressores de diferentes tipos que integram sistemas frigoríficos e as bombas de calor (Roriz, 2007a).

As várias combinações possíveis de equipamentos para um sistema AVAC, não significa que não existam outros tipos de estratégias de aquecimento e arrefecimento. O recuso a soluções passivas contribui para uma redução das necessidades energéticas de climatização. Este tema será abordado no capítulo 3.

Segundo Alfano *et al.* (2010), a seleção dos equipamentos e sistemas que podem ser usados nos edifícios escolares, dependem não só da opinião do projetista, mas também dos meses de funcionamento do sistema e das condições climáticas. As considerações iniciais que se devem ter em conta na altura da seleção do sistema, são:

- Instalar aquecimento e ventilação (sem a opção de arrefecimento), em climas particularmente frios;
- Instalar ar condicionado ou, pelo menos, um sistema de desumidificação, que funcione durante todo ano, solução típica de climas quentes e húmidos;
- Sistemas de arrefecimento por evaporação, em climas quentes e secos

Existem diversos tipos de sistemas AVAC e combinações para serem utilizados para controlar as condições ambientais no interior dos edifícios. O projetista deve ter sempre em conta todas as características de cada tipo de sistema, para além das condições

externas e internas do edifício. As condições exteriores como a temperatura, humidade relativa, vento, radiação solar, dependem da zona onde o edifício está localizado. O vento e a radiação solar dependem das disposições de cada sala/zona. Todas as condições exteriores do projeto afetam claramente as cargas térmicas de cada sala/zona. (Alfano et al. 2010).

3 CASO DE ESTUDO

O presente trabalho tem como objetivo a procura e análise de soluções que permitam a melhoria do conforto térmico no edifício escolar tido como caso de estudo. No presente capítulo efetua-se uma breve descrição das características principais do edifício e são analisadas algumas das soluções estudadas.

3.1 Descrição do edifício escolar

O edifício escolar em estudo é uma Escola Básica e Jardim-de-infância EB1/J1 localizado em Vilela, concelho de Paredes e tem uma área útil de 2690 m². O edifício foi recentemente construído, cumprindo os requisitos e exigências regulamentares estabelecidos no Decreto-Lei 79/2006 – RSECE. O edifício escolar está dividido em dois pisos: rés-do-chão e primeiro andar, albergando um total de 590 crianças, com idades compreendidas entre os 3 e os 10 anos. Na Tabela 3.1 estão indicados o número de espaços existentes no edifício. O rés-do-chão é constituído por 19 espaços e piso 1 por 20.

Tabela 3.1. – Número de espaços existentes em cada piso do edifício escolar.

Espaços	Quantidade	
	Rés-do-Chão	Piso 1
Sala de aula 1º ciclo	6	6
Sala de pré-escolar	3	-
Zona de entrada	2	-
Refeitórios	2	-
Cozinha	1	-
Salas de expressão artística	2	4
Gabinete médico	-	1
Posto socorro	-	1
<i>Ateliers</i>	-	3
Secretaria	1	-
Gabinete diretor	1	-
Biblioteca	-	1
Salas variadas	-	3
Zona de circulação	1	1

Para além dos espaços enumerados, existem as instalações sanitárias e uma zona com dois balneários de apoio ao pavilhão desportivo, que se encontra numa extremidade do edifício escolar.

Na Figura 3.1 encontra-se representado o edifício escolar. Este caracteriza-se pelo seu caráter longitudinal, com um total de 95 m, uma fachada principal envidraçada orientada a sudoeste (SO) e outra com as mesmas características orientada a nordeste (NE). O edifício apresenta uma arquitetura complexa, salientando-se a pala de sombreamento que acompanha a geometria elaborada da cobertura.



Figura 3.1. – Fachada principal da Escola Básica e Jardim-de-infância EB1/J1 de Vilela.

Na Tabela 3.2 apresenta-se os principais elementos construtivos da envolvente e os respetivos coeficientes de transmissão térmica, assim como os máximos permitidos pela regulamentação nacional.

Tabela 3.2. – Constituição das envolventes e respetivos coeficientes de transmissão térmica.

Tipo de envolvente e respetiva descrição	Coeficientes de transmissão térmica superficial (U) (W/m ² .°C)	
	do edifício	máximo regulamentar
Paredes Exteriores - Alvenaria simples constituídas por (do exterior para o interior): chapa metálica, espaço de ar ventilado, isolamento em poliestireno extrudido em placas (XPS – Condutibilidade térmica de 0,035 W/m.k) de 0,06m, blocos de betão leve de 0,25m e reboco estanhado.	0,47	1,6
Cobertura – do tipo chapa metálica, do tipo painel ondulado (sandwich), com isolamento térmico constituído por espuma rígida de poliuretano de 0,06 m, com uma densidade global média de 40 kg/m ³	0,34	1
Pavimentos – isolado pelo exterior com a seguinte constituição: acabamento interior, enchimento em betão leve, laje em betão armado, isolamento com 0,04m de XPS e acabamento exterior	Inverno 0,70 Verão 0,74	1
Vão envidraçado – Exterior: vidro Planilux (4 mm); PVB normal (0,38 mm); vidro Planilux (4 mm) e uma capa PLANITHERM ULTRA N; caixa-de-ar (12 mm). Interior: Vidro Planilux (4 mm); PVB normal (0,38 mm) e vidro Planilux (4 mm). Os vãos envidraçados terão proteção solar (tela pelo interior de cor clara)	1,6	
	Fator solar	
	0,52	0,56

Embora o edifício cumpra com os requisitos da regulamentação nacional nomeadamente o RSECE, após o início da sua utilização verificou-se que na generalidade dos espaços se registavam temperaturas elevadas, nomeadamente nas salas de aula. Durante o primeiro ano de utilização (2010) surgiram algumas queixas, por parte dos alunos e professores, devido às elevadas temperaturas existentes em algumas salas. As temperaturas elevadas verificam-se, principalmente, em 6 salas localizadas no rés-do chão, em que a envolvente exterior está orientada a SO, constituída apenas por vãos envidraçados. O conjunto das salas tem um comprimento que perfaz um total de 50m e estão destinadas aos alunos do primeiro ciclo (idades compreendidas entre 5-10 anos, do 1º ao 4º ano de escolaridade). Cada sala tem uma área de 52m² e está prevista para um número de ocupação máxima de 25 alunos.

No momento de execução do projeto, devido a limitações do orçamento, foi tomada a decisão de instalar apenas o sistema de aquecimento. O facto de não existir um

sistema de arrefecimento, nem soluções que evitem ganhos solares excessivos, traduz-se nas elevadas temperaturas sentidas nas referidas salas.

O sistema de Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) é constituído pelas seguintes instalações: ventilação mecânica, com insuflação de ar novo tratado (cinco unidades de ar novo); extração de ar em cada espaço; aquecimento central por radiadores e aquecimento de águas sanitárias (AQS) para a cozinha, instalações sanitárias e balneários. Deste modo, foi necessário efetuar o estudo de vários tipos de soluções (ativas e passivas) para evitar o sobreaquecimento do edifício escolar.

3.2 Estratégias estudadas

Depois da análise da possível origem das elevadas temperaturas, em algumas salas do edifício escolar, verificou-se que a pala, existente na cobertura, não é suficiente para obter o sombreamento desejado no rés-do-chão. Este aspeto pode ser a origem dos elevados ganhos solares existentes no rés-do-chão.

Perante este problema, é necessário a aplicação de soluções que conduzam à melhoria das condições de conforto e do comportamento térmico. Tendo em conta que o edifício já se encontra construído, serão analisadas possíveis estratégias para implementar no edifício. Estas estratégias dividem-se em passivas e ativas. De acordo com Bradshaw (2006), as soluções passivas passam pela utilização e controlo dos fluxos naturais de energia que envolvem o edifício (radiação solar e vento), permitindo a existência de uma forma natural de iluminação, aquecimento, arrefecimento e ventilação. Por sua vez, as soluções ativas baseiam-se na utilização de equipamentos que promovem o conforto desejado. Normalmente, os sistemas passivos são particularmente bem-sucedidos em climas moderados e que não possuem invernos frios prolongados (Pohl, 2011).

Na Tabela 3.3, são apresentadas algumas das soluções passivas e ativas existentes.

Tabela 3.3. – Soluções ativas e passivas. Adaptado de: Bradshaw, 2006).

Soluções Passivas	Soluções Ativas
Orientação e implantação do edifício	Coletores solares térmicos
Ventilação natural	Equipamentos elétricos e eletrodomésticos eficientes
Envolvente opaca (fachadas, coberturas, pavimentos, cores dos edifícios)	Microgeração (energia solar fotovoltaica, energia eólica e energia da biomassa)
Vãos envidraçados	
Sombreamento	

De acordo com a descrição efetuada das soluções ativas e passivas, é possível escolher, à partida, quais as que são possíveis de implementar no edifício. Numa fase posterior do trabalho, são selecionadas as soluções que se consideram mais adequadas. Deste modo, dentro das soluções passivas existentes, aquelas que se podem considerar inicialmente são: a implementação de um sombreamento total, na fachada SO, com grelhas fixas (verticais ou horizontais); implementação de uma pala horizontal entre os dois pisos; recurso a ventilação natural e a aplicação de uma película refletante nos vidros. Visto que o grande inconveniente do edifício são as temperaturas elevadas, a solução ativa mais adequada para implementar no edifício, passa pela introdução de *chillers*, para arrefecer o ar a ser insuflado no edifício.

4 METODOLOGIA ADOTADA

Este capítulo está dividido em três partes distintas. Na primeira parte é feita uma descrição do funcionamento do programa de simulação, o *DesignBuilder*, descrevendo alguns critérios que são necessários definir, de modo a garantir um correto funcionamento do programa. Numa segunda parte do capítulo, será analisado o modelo de simulação base, descrevendo-se os principais parâmetros que foram definidos no programa. Finalmente, são descritos os cenários adotados e de que modo foram implementados no *software*.

4.1 Programa de simulação dinâmica

De acordo com Gonçalves (2007), os *softwares* de simulação dinâmica são usados desde a década de 1970 e são um método cada vez mais utilizado, uma vez que se trata de uma ferramenta de verificação que permite a simulação de situações reais, e obter os respectivos resultados com grande aproximação. Na sua essência, os programas de simulação determinam parâmetros como as cargas térmicas, fazendo uso de equações de transferência de calor e de massa, associadas a um conjunto de algoritmos e dados base, que permitem obter resultados, mediante a introdução de características físicas do edifício em estudo.

Recorrendo aos programas de simulação dinâmica, o projetista pode decidir quais os materiais a utilizar, a orientação do edifício, o tipo de envolvente, entre outros, de forma a minimizar a potência e consumo previsíveis da instalação e de todo o edifício. A definição de geometrias complexas e respectivos sombreamentos, e a implementação de sistemas menos comuns, são as grandes limitações destes programas. No entanto, as atualizações deste tipo de *software* fazem com que se assista a um maior detalhe nas definições e formulação dos dados para a simulação (Gonçalves, 2007).

De uma vasta gama de programas de simulação existentes, recorreu-se ao *DesignBuilder* (DB) em conjunto com o *EnergyPlus* (E+). O primeiro efetua a modelação geométrica e construtiva do edifício e o E+ permite efetuar uma parametrização do modelo, ou seja, é neste programa que são caracterizadas as condições interiores, e

condições exteriores, os sistemas de climatização e ventilação, os perfis de ocupação e iluminação, entre outros fatores. Recorre-se ao DB para a visualização/parametrização dos dados de entrada do E+, visto que este programa não é de fácil interação com o utilizador. Assim, é possível a criação e parametrização de um modelo 3D, contudo, existem algumas limitações do ponto de vista da definição do sistema AVAC.

Para a execução do modelo em 3D é possível importar para o DB as plantas (em Autocad) do edifício em estudo, permitindo aproximar ao máximo da realidade o edifício simulado. A introdução dos dados no programa é uma tarefa simples e intuitiva, uma vez que possui uma biblioteca pré-definida, que permite escolher todos os dados necessários para uma boa caracterização do edifício em estudo. Os dados climáticos, as temperaturas de projeto, os tipos de materiais da envolvente, a atividade no edifício, a densidade de ocupação, a definição dos horários de utilização, entre outros parâmetros, são facilmente definidos.

Para se efetuarem as simulações é necessário, por vezes, proceder a algumas simplificações e alterações na geometria do edifício. Estas modificações permitem de uma forma viável, reduzir o tempo de simulação e obter resultados coerentes. O manual do DB (2009) refere que: “nos modelos de simulação mais complexos o tempo de simulação é influenciado pelo número de zonas, envidraçados, envidraçados por zonas, o número de blocos bem como outros fatores ligados a estes modelos complexos”.

4.2 Modelo Base

Para a realização deste estudo, foi necessário recorrer ao projeto AVAC do edifício, que permitiu retirar alguns dados necessários para colocar no programa de simulação. Para o estudo e análise das estratégias adotadas, foi construído de raiz um modelo base do edifício escolar no programa de simulação. Este modelo de simulação base serve de referência para a análise de resultados e é nele que serão introduzidas as soluções que serão descritas posteriormente.

Antes de iniciar a construção do edifício no programa de simulação, foi definido o ficheiro climático deste, ou seja, foi fixado o local em que se encontra o edifício escolar. Na base de dados do programa foi selecionado o ficheiro climático do Porto, que

corresponde à zona climática I2-V1. Visto que não existe um ficheiro climático da localidade de Vilela, optou-se pelo ficheiro climático do Porto, uma vez que é o que mais se aproxima desta localidade. Para além disto, foi também definida a orientação do edifício como se encontra na realidade. Conforme referido no capítulo 3, a fachada principal do edifício encontra-se orientada a SO.

A construção do modelo base iniciou-se pela importação das plantas do AutoCad para o DB, definindo-se o piso do rés-do-chão com um pé direito de 3,45m. O segundo piso, embora com uma geometria mais complicada de executar no programa, foi definido o mais próximo possível da geometria real do edifício. Na Figura 4.1 podem observar-se as semelhanças entre a geometria real e a obtida pelo programa de simulação.

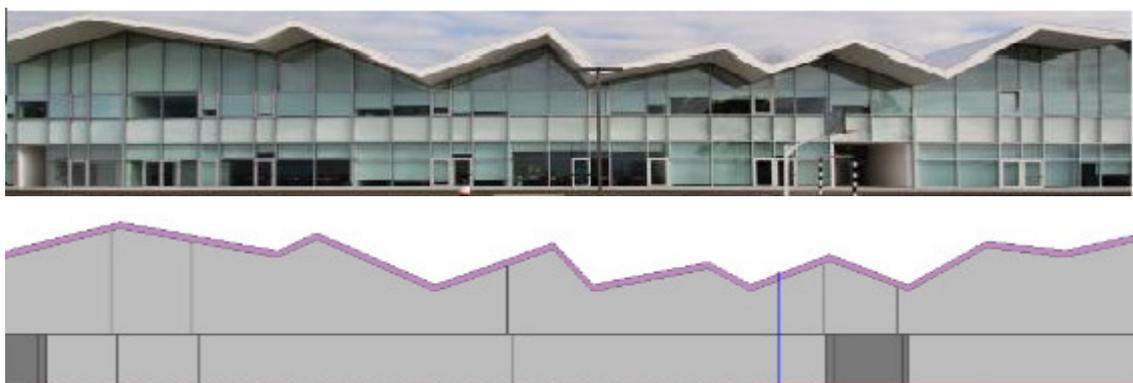


Figura 4.1. – Vista da fachada principal do edifício e a correspondente do modelo criado no DB.

Por uma questão de boa prática no uso de programas de simulação foram realizadas alterações no edifício, principalmente no que diz respeito à organização das zonas. Na Figura 4.2 está representado, em AutoCAD, a planta do rés-do-chão do edifício, e na Figura 4.3 estão representadas as zonas introduzidas no modelo de simulação base. Pretende-se com estas figuras ilustra as simplificações que foram realizadas.

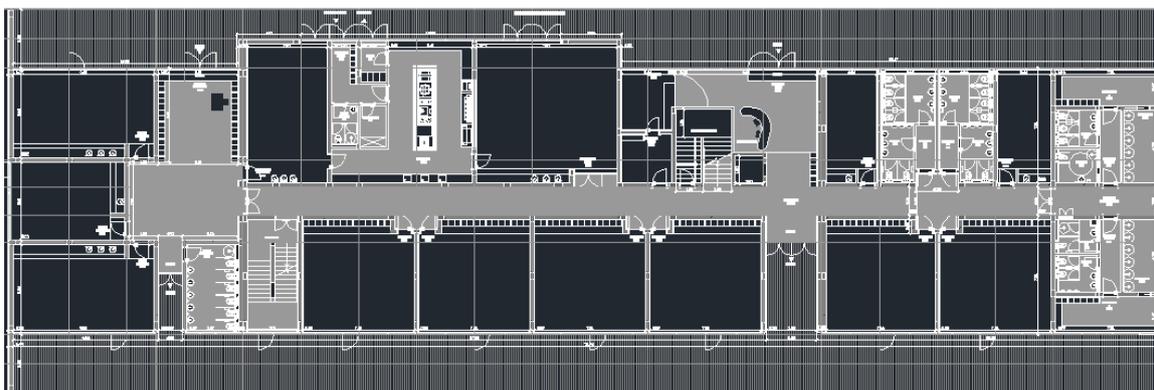


Figura 4.2. – Planta em AutoCAD do rés-do-chão do edifício escolar

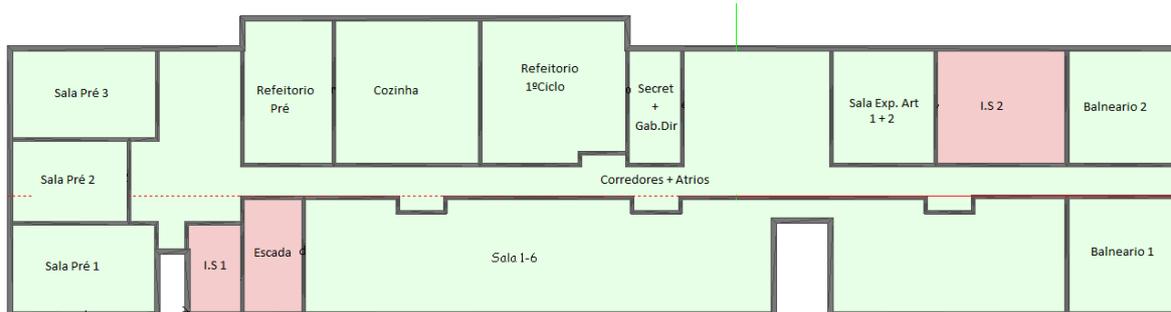


Figura 4.3. – Planta do rés-do-chão inserida no DB com o zoneamento realizado

Este zoneamento engloba dois ou mais espaços adjacentes com a mesma tipologia, a mesma atividade e com características semelhantes. Esta simplificação permite reduzir o tempo de simulação e obter resultados coerentes. O mesmo foi feito para o piso 1, sendo apresentadas no anexo A as respetivas simplificações.

Assim, o modelo de simulação ficou organizado de tal modo que possui um total de 31 zonas. Foi também necessário introduzir nas zonas, a respetiva densidade de ocupação e os caudais mínimo de ar novo, de acordo com o anexo VI do RSECE. A introdução dos dados do caudal é efetuada em L/s e não em m^3/h como está definido no RSECE.

No anexo B encontram-se as zonas que foram definidas no programa, com os parâmetros que as caracterizam, nomeadamente a área útil, o nº de ocupantes e o caudal mínimo de ar novo.

Uma importante característica da fachada deste edifício é a elevada área de envidraçado. Como existem algumas limitações do programa para definir corretamente os vãos envidraçados, utilizaram-se os dados existentes na biblioteca de dados. Estes possuem características muito próximas dos existentes no projeto, conseguindo-se assim obter um valor de transmissão térmica e um fator solar do vidro próximos dos valores reais.

Quanto à caracterização das soluções construtivas como as paredes, o pavimento e a cobertura, recorreu-se novamente à biblioteca de dados do programa, não existindo qualquer tipo de limitação nestes casos. Assim, foi possível obter o coeficiente de transmissão térmica destas soluções, que é determinado pelo programa após a introdução os valores do calor específico, da condutividade térmica e da densidade de cada material que constituem a solução construtiva.

Os perfis que são usados para a ocupação, iluminação e utilização dos equipamentos encontram-se no anexo XV do RSECE. No entanto, estes valores são apenas de referência e, uma vez que o edifício já se encontra em funcionamento, foi possível obter informações mais concretas quanto à sua utilização. Deste modo, os valores de referência foram ligeiramente alterados para uma aproximação mais realista. Para a iluminação, optou-se por considerar um valor de 3 W/m^2 , visto que, devido à elevada área de envidraçado, existe bastante iluminação no interior do edifício. Assim, não se justifica o valor de densidade de iluminação de referência de 8 W/m^2 . Para os valores de utilização dos equipamentos, usou-se o valor de referência, que corresponde a 5 W/m^2 . Quanto à ocupação do edifício, consideraram-se os dados de referência para os edifícios escolares, assumindo que a escola funciona de 2 de Janeiro a 31 de Julho e de 15 de Setembro a 20 de Dezembro. Os perfis de ocupação horária teriam como valores de referência uma ocupação variável das 08h00-20h00. Neste caso, foi decidido reduzir a percentagem de ocupação, na primeira hora do dia (08h00-09h00) e eliminar a ocupação nas salas de aula no período de almoço que corresponde ao intervalo das 13h00 às 14h00, que na realidade é nula. Todos estes perfis encontram-se graficamente representados no anexo C.

Quanto aos sistemas de ventilação mecânico e de aquecimento existentes no edifício, foi necessário definir alguns parâmetros. Para o sistema AVAC, existem perfis de funcionamento de referência. Estes indicam que o sistema de ventilação mecânica terá de estar sempre em funcionamento, quando existe ocupação. No que diz respeito ao aquecimento, foi necessário definir vários parâmetros, entre os quais o COP (*Coefficient Of Performance*) de aquecimento (neste caso de 0,8) e o combustível usado (gás). À semelhança dos perfis de ocupação, é possível definir um perfil de utilização para sistema de aquecimento. Voltando a referir que foi possível ter acesso ao que se verifica na realidade, foi alterado o horário de referência de funcionamento do sistema de aquecimento, através de uma opção existente no programa designada de *compact schedules*. No anexo D está apresentado o código introduzido no programa de simulação para definir os horários de funcionamento do sistema de aquecimento.

4.3 Cenários adotados

Neste capítulo, foram analisadas as estratégias que seriam possíveis de implementar no edifício escolar, estando divididas em ativas e passivas. Considerando os

vários cenários possíveis, optou-se por testar dois tipos de sombreamento. Um primeiro em que se coloca uma pala entre o rés-do-chão e o primeiro piso, e um segundo em que se utilizam grelhas de sombreamento. Relativamente à solução ativa, testou-se a introdução de *chillers* com diferentes potências, tendo por objetivo “temperar” o ar novo insuflado e não efetuar um arrefecimento total.

Assim, serão descritos de seguida quais os cenários adotados, de acordo com a Figura 4.4.

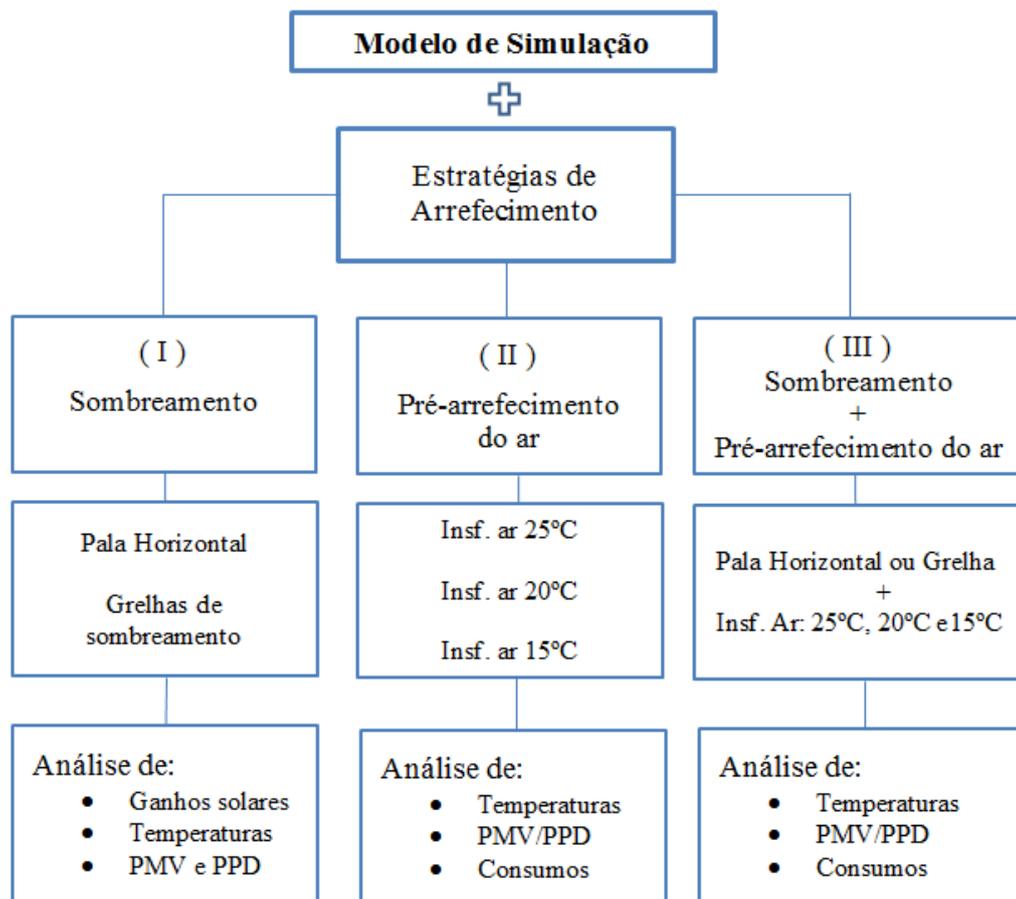


Figura 4.4. – Representação esquema dos cenários adotados.

Como é possível verificar na Figura 4.4, serão analisados três cenários diferentes. A introdução de sombreamento será tratada como o Cenário I, a introdução de *chillers*, para efetuar um pré-arrefecimento do ar, será referida como Cenário II e, finalmente, o cenário III em que corresponde à combinação dos dois cenários anteriores

4.3.1 Cenário I – Introdução de Sombreamento

No Cenário I será testada a colocação de grelhas de sombreamento horizontal e a aplicação de uma pala de sombreamento entre o rés-do-chão e o primeiro piso.

Numa primeira fase, será testada a colocação de uma pala de sombreamento horizontal, que terá uma largura de 3,80 m. Foi considerado este valor visto que a pala existente na cobertura tem o mesmo comprimento. Esta alteração no programa revelou-se uma tarefa simples, uma vez que basta adicionar no modelo base de simulação, a pala horizontal. Numa segunda fase, será testada a adição do sombreamento, utilizando para o efeito, grelhas horizontais. Esta aplicação será feita em toda a fachada principal, orientada a SO. As grelhas de sombreamento são facilmente definidas no programa de simulação, visto que este possui uma grande biblioteca de dados, que permitiu definir grelhas colocadas pelo exterior. Estas são em alumínio, com uma inclinação de 30°, um comprimento de 30cm e um espaçamento entre grelhas de 30cm.

Na Figura 4.5 é apresentado um esquema do que será analisado.

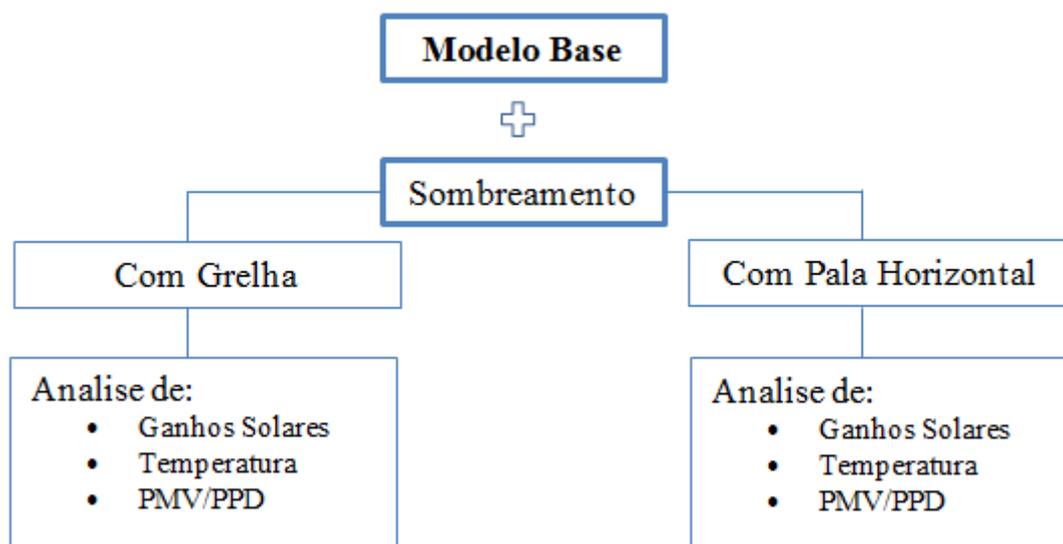


Figura 4.5. – Cenário I (introdução de sombreamento).

4.3.2 Cenário II – Pré-Arrefecimento do Ar

No Cenário II pretende-se simular um pré-arrefecimento do ar, isto é, conseguir baixar a temperatura do ar que é insuflado no interior das salas. No sistema existente no edifício, o ar apenas pode ser aquecido. Nas épocas de maior calor, o ar é insuflado à temperatura exterior, o que leva à existência de elevadas temperaturas no

interior das salas em alguns períodos. Com a simulação deste cenário, não se pretende arrefecer totalmente o ar, mas sim, “temperar” parte do que é insuflado, ou seja, baixar a sua temperatura. Para este efeito, simula-se a introdução de *chillers*, que são dimensionados de modo a arrefecer o ar de 30°C (temperatura exterior máxima de projeto) para 25°C, 20°C e 15°C. São assim impostas no modelo de simulação as temperaturas de insuflação de ar novo de 25°C, 20°C e 15°C.

A introdução do arrefecimento do ar, abrange uma pequena parte do edifício, que corresponde não só às salas de aula do rés-do-chão, mas também às adjacentes do primeiro piso.

É importante referir que o arrefecimento do ar apenas se efetua num determinado período de tempo, isto é, o sistema de arrefecimento só se considera ligado de 15 de maio a 13 de outubro e, neste mesmo período, o sistema de aquecimento é desligado. No entanto, no período de 1 de agosto a 15 de setembro, todos os equipamentos estão desligados, visto que a escola se encontra encerrada.

Na Figura 4.6, apresenta-se a metodologia de estudo elaborada para o cenário II.

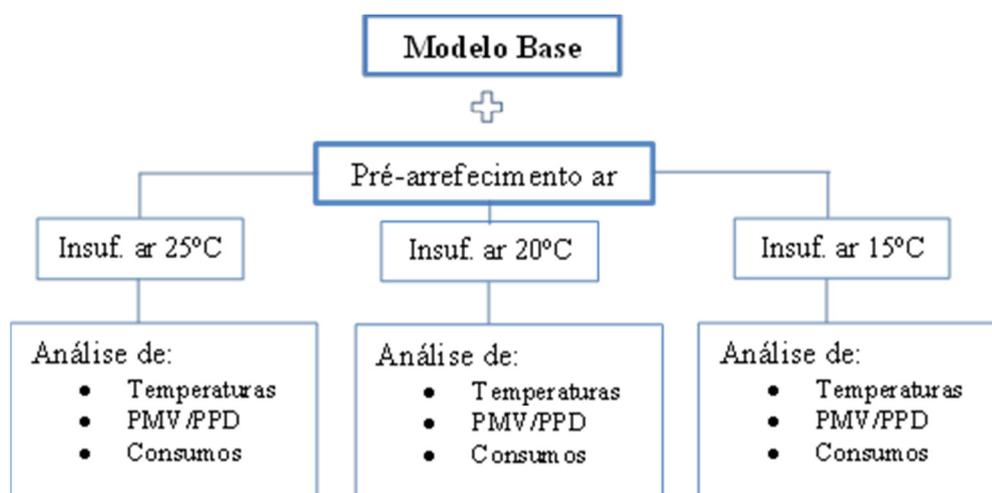


Figura 4.6. – Cenário II (pré-arrefecimento do ar novo).

4.3.3 Cenário III – Sombreamento e pré-arrefecimento do ar

No cenário III, efetua-se a combinação do sombreamento e pré-arrefecimento do ar novo simultaneamente. Ambas as soluções foram já descritas anteriormente e na Figura 4.7 está representada a metodologia de estudo elaborada para o cenário III.

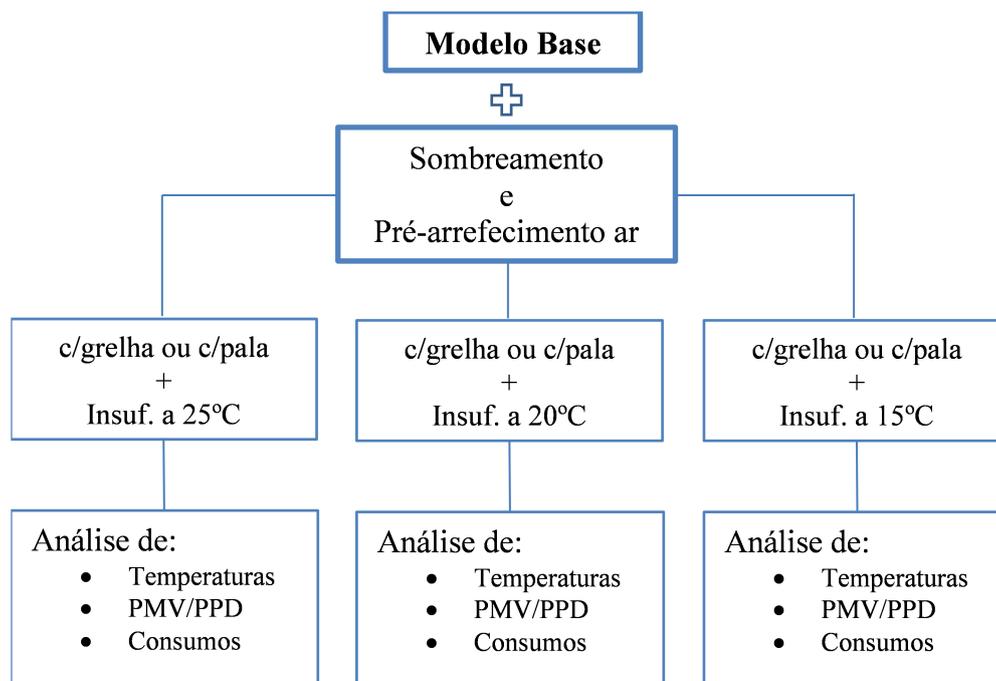


Figura 4.7. – Cenário III (sombreamento e pré-arrefecimento do ar).

De referir que inicialmente se consideraram ambas as soluções adotadas para o sombreamento (grelhas e pala), visto que, à partida, não se sabe qual a que melhores resultados apresenta. Posteriormente, será analisada a solução que melhores resultados obtenha no cenário I.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos nos diversos cenários, através dos parâmetros: ganhos solares, temperaturas interiores, índices de conforto (PMV e PPD) e consumos energéticos, quando aplicáveis.

Os resultados analisados neste capítulo são referentes à zona das seis salas de aula do rés-do-chão, no período compreendido entre Abril e Outubro, perfazendo um total de 1331 horas.

5.1 Ganhos Solares

Neste subcapítulo são apresentados os ganhos solares obtidos para os modelos onde se preconiza a introdução de soluções de sombreamento.

No cenário II, não existe diferença entre os ganhos solares do modelo base e o modelo onde se simula a introdução do sistema de pré-arrefecimento do ar novo. No cenário III, os ganhos solares são iguais ao cenário I.

Na Figura 5.1 apresentam-se os ganhos solares por unidade de área de pavimento, relativos ao dia em que o seu valor é máximo. No edifício base esse dia corresponde a 8 de Outubro, enquanto que, no caso dos sombreamentos corresponde ao dia 31 de Outubro.

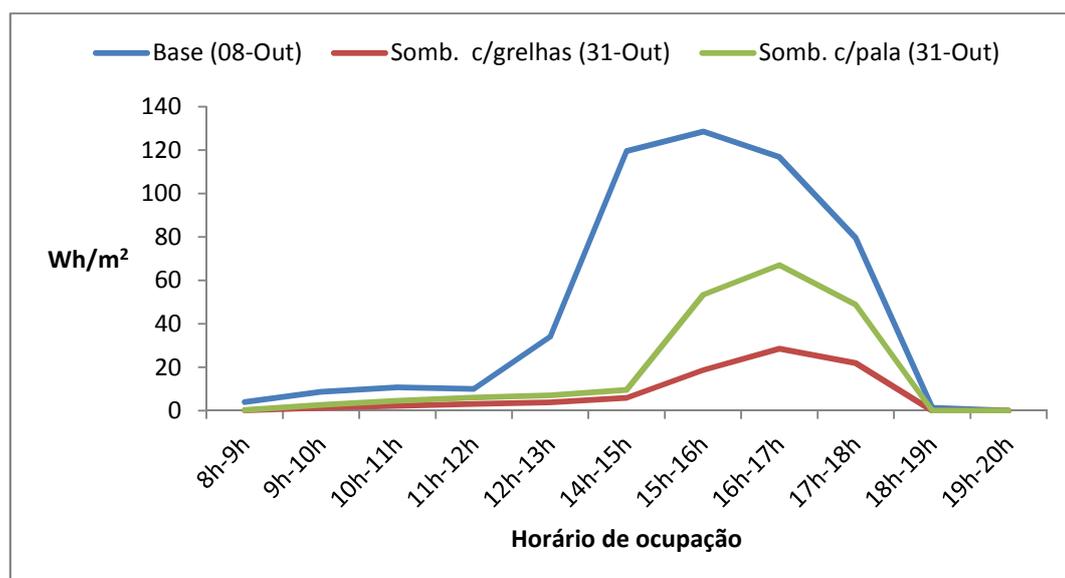


Figura 5.1. – Ganhos solares máximos no interior das salas.

Através da análise da Figura 5.1, verifica-se que a introdução de soluções de sombreamento reduz significativamente os ganhos solares registados, quando comparado com o cenário base. A introdução de uma solução de sombreamento de grelhas é mais eficaz do que a introdução de uma pala horizontal.

Com o conjunto de figuras apresentados em seguida, pretende-se demonstrar a diferença na incidência solar no interior e exterior das salas de aulas.

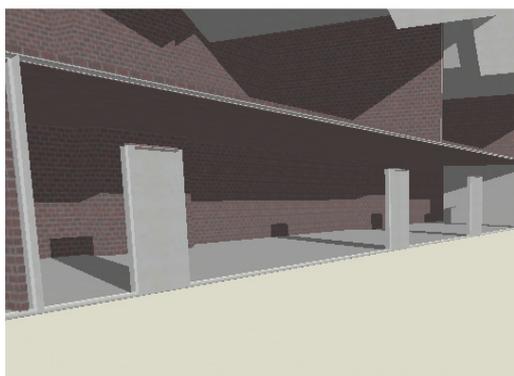


Figura 5.2. – Vista pelo exterior (modelo base).

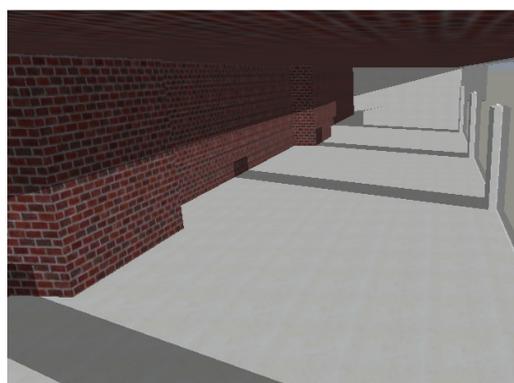


Figura 5.3. – Vista do interior das salas de aula (modelo base).

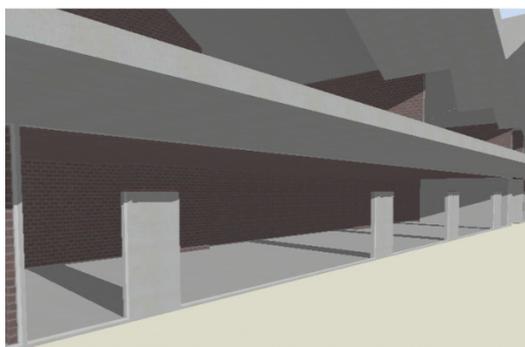


Figura 5.4. – Vista pelo exterior (sombreamento com pala horizontal).

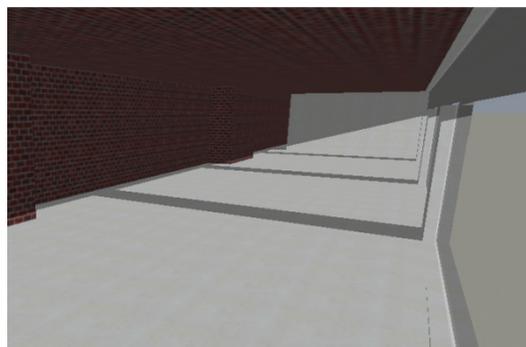


Figura 5.5. – Vista interior das salas (sombreamento com pala horizontal).

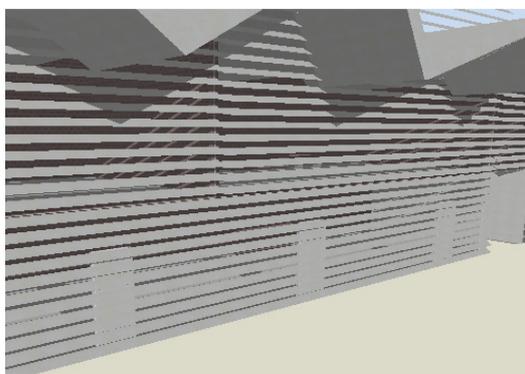


Figura 5.6. – Vista pelo exterior (sombreamento com grelhas).

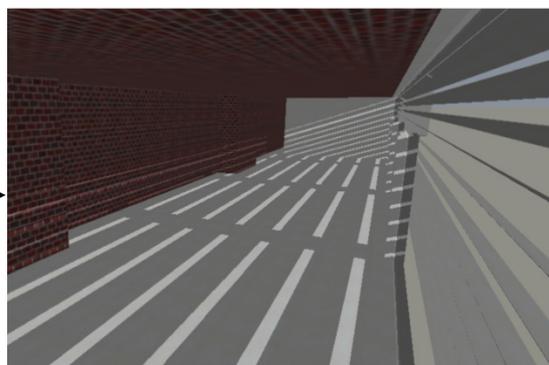


Figura 5.7. – Vista do interior das salas (sombreamento com grelhas).

Na Figura 5.2 e Figura 5.3 estão representadas as vistas do exterior e interior do edifício para o modelo base, no dia 08 de Outubro às 15h30. As restantes figuras correspondem ao dia 31 de Outubro às 16h30.

Na Tabela 5.1 estão representados os valores referentes aos ganhos solares anuais e máximo diário.

Tabela 5.1. – Ganhos solares anuais e máximo diário

	Ganhos Solares			
	Total anual [kWh/ano]		Máximo diário [Wh/m²]	
Base	42535		128	
Somb. c/Pala	14641	-66 %	67	-48%
Somb c/ Grelhas	6755	-84%	29	-78%

Da análise dos resultados da Tabela 5.1, verifica-se uma diferença significativa entre os resultados obtidos para o cenário base e as soluções apresentadas, quer em relação aos ganhos solares anuais, quer em relação ao período onde se registam os valores mais elevados.

A introdução de sombreamento com grelhas reduz os ganhos solares anuais em 84% e o valor máximo em 78%, sendo esta a solução mais eficaz. Não obstante, a redução registada nos ganhos solares, esta solução também permite uma melhoria significativa das condições de conforto visual nas salas de aula, tendo em conta que se verificava excesso de luminosidade devido á elevada exposição solar e área de envidraçados.

5.2 Temperatura do ar nas salas

A aplicação de soluções de sombreamento influencia as temperaturas registadas nas salas de aulas, diminuindo os ganhos internos com conseqüente diminuição das temperaturas registadas.

Na Tabela 5.2 são apresentadas as temperaturas máximas registadas em cada um dos cenários e o número de horas em que se registam temperaturas inferiores a 25°C, o número de horas em que as temperaturas registadas permanecem entre 25°C e 28°C e por fim o número de horas registadas com temperaturas superiores a 28°C.

Tabela 5.2. – Número de horas em função dos intervalos de temperaturas e temperaturas máximas registada (cenário I, II e III).

	Número de horas com temperaturas [h]:			Percentagem de horas com temperaturas [%]:			Temperatura máxima [°C]
	≤ 25 [°C]]25 - 28[[°C]	> 28 [°C]	<25 [°C]]25 - 28[[°C]	> 28 [°C]	
Base	682	412	237	51,24	30,95	17,81	35,45
Somb. c/Pala	994	260	77	74,68	19,53	5,79	32,34
Somb.c/ Grelha	1068	206	57	80,24	15,48	4,28	31,78
Insuf. ar 20°C	747	444	140	56,12	33,36	10,52	32,99
Insuf. ar 15°C	914	332	85	68,67	24,94	6,39	31,87
Somb e Insuf. ar 20°C	1249	77	5	93,84	5,79	0,38	28,78
Somb e Insuf. ar 15°C	1260	71	0	94,67	5,33	0	27,85

Da análise da Tabela 5.2 verifica-se que, em qualquer um dos cenários, existe uma redução da temperatura máxima nas salas de aula. O sombreamento por grelhas e pré-arrefecimento a 15°C é o mais favorável em termos de redução de temperatura. O número de horas em que as temperaturas permanecem acima de 25°C diminui de 649 horas para 71 horas, o que corresponde a uma diminuição de 43,4% em relação ao modelo base. Não se registam temperaturas superiores a 28°C neste cenário, uma vez que a temperatura máxima, reduz de 35,5°C para 27,8°C quando comparado como cenário base.

A introdução de sombreamento por grelhas sem arrefecimento, também se pode considerar como uma boa alternativa, uma vez que permite uma redução considerável na temperatura máxima, ou seja, uma redução de 35,5°C para 31,8°C e uma redução de 386h nas temperaturas superiores a 25°C.

No cenário II, com pré arrefecimento a 15°C a redução de temperaturas e de número de horas com temperaturas superiores a 25°C não é tão relevante como no caso do cenário I (sombreamento com grelha) e III(pré-arrefecimento a 15°C e sombreamento com grelhas).

Deste modo, em relação a redução de temperatura no interior da sala, o cenário III, é o mais vantajoso. No entanto, é necessário perceber pelos índices de conforto de que forma estas temperaturas se traduzem na melhoria das condições do ambiente interior nas salas de aula.

5.3 Índices de Conforto

De modo a caracterizar a influência dos diferentes cenários no conforto térmico, recorreu-se ao cálculo dos índices PMV e PPD.

Para a apresentação dos resultados optou-se pela metodologia proposta na norma ISO 7730 e efetuou-se o tratamento estatístico dos resultados do PMV e PPD para os diferentes cenários.

O cálculo do PMV e PPD foi efetuado recorrendo a uma folha de cálculo elaborada em MS Excel, onde foram introduzidos os valores provenientes da simulação dinâmica (temperatura do ar, temperatura radiante, humidade relativa) e fixaram-se os valores para a atividade metabólica ($M = 1,2$ met), velocidade do ar ($v = 0,1$ m/s) e trabalho mecânico ($W = 0$). Quanto ao valor da resistência térmica do vestuário, foi necessário adaptá-lo segundo o período do ano. Este valor vai variar ao longo do período em análise (Abril – $I_{cl} = 0,8$ clo; Maio e Outubro – $I_{cl} = 0,75$ clo; Junho e Setembro – $I_{cl} = 0,7$ clo; Julho – $I_{cl} = 0,6$ clo).

Na Figura 5.8 encontra-se a distribuição percentual de horas por categoria de conforto dos diversos cenários analisados.

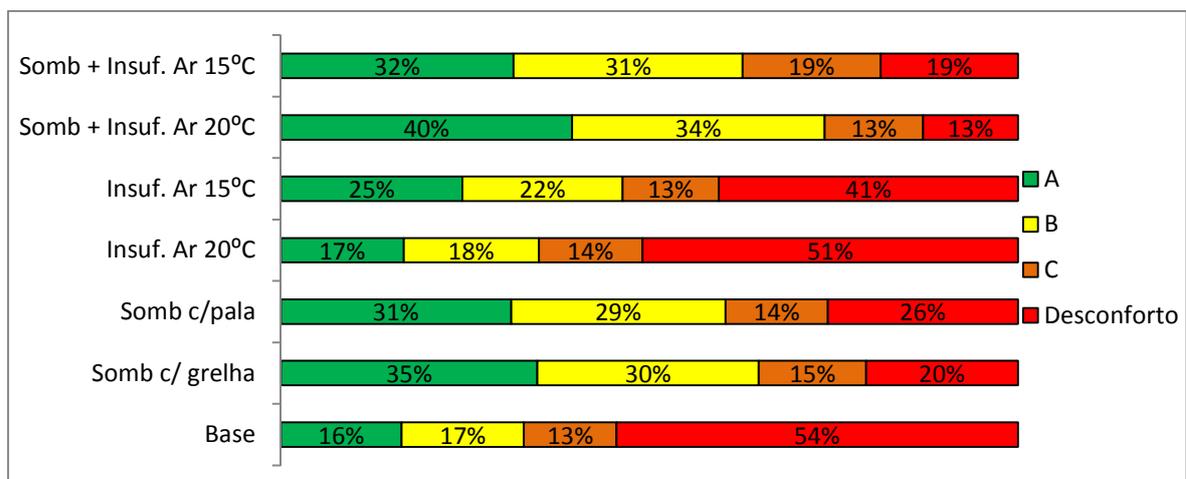


Figura 5.8. – Percentagens de horas por categoria de conforto dos diversos cenários.

Da análise da Figura 5.8, verifica-se que o cenário base apresenta o maior número de horas na categoria de desconforto, cerca de 54% e que em apenas 16% das horas analisadas o conforto térmico se situa na categoria A, indo de encontro à situação relatada pelos ocupantes do edifício.

De um modo geral, em todos os cenários testados verificou-se um aumento do número de horas, nas categorias de maior conforto (A, B e C).

O cenário que apresenta maior percentagem de horas nas categorias A e B é onde se simula a introdução de sombreamento e pré-arrefecimento do ar a 20°C, perfazendo um total de 74%. Este cenário apresenta uma melhoria de 9% em relação ao cenário I (sombreamento com grelhas) e de 11% em relação ao sombreamento por grelhas e pré-arrefecimento a 15°C.

No sombreamento com grelhas existe também uma melhoria considerável de permanência nas categorias de maior conforto (A, B e C), em relação ao modelo base. Essa melhoria traduz-se na redução das horas de desconforto de 54 % (modelo base) para 20%.

No cenário II, a melhoria em relação ao modelo base é pouco significativa. No caso do pré-arrefecimento do ar a 15°C a redução das horas de desconforto é de 13%.

O uso de sombreamento por grelhas e também a sua combinação com arrefecimento do ar insuflado no edifício escolar são os cenários mais favoráveis e proporcionam uma melhoria das condições de conforto nas salas de aula em estudo.

Na Tabela 5.3 apresenta-se o tratamento estatístico efetuado aos resultados obtidos no cálculo dos índices de conforto PMV e PPD.

Tabela 5.3. – Índices de conforto, PMV e PPD de todos os cenários.

	PPD				PMV			
	Média	Máx	Min	Desv.P.	Média	Máx	Min	Desv.P.
Base	29,04	100,00	5,00	26,68	0,84	3,00	-1,01	0,80
Somb c/ grelha	11,48	76,70	5,00	10,05	0,03	2,00	-1,54	0,56
Somb c/pala	13,17	86,36	5,00	12,51	0,26	2,24	-1,24	0,57
Insuf ar 20°C	25,47	100,00	5,00	23,32	0,75	3,00	-1,01	0,71
Insuf ar 15°C	21,01	98,02	5,00	20,94	0,56	2,82	-1,04	0,71
Somb + Insuf ar 20°C	9,31	54,90	5,00	6,62	-0,06	1,42	-1,57	0,45
Somb + Insuf ar 15°C	10,65	58,91	5,00	7,29	-0,26	1,20	-1,65	0,45

Pela análise estatística efetuada, podemos verificar que, no cenário base, existem períodos onde a percentagem de pessoas insatisfeitas é de 100%. Este facto, deve-se à elevada sensação de calor, comprovado pelo valor máximo de PMV = 3.

Da análise do tratamento estatístico dos resultados, observa-se que no caso do cenário III, quando se conjuga a aplicação de sombreamento por grelhas com o pré-arrefecimento do ar a 15°C, a percentagem de pessoas insatisfeitas aumenta relativamente ao cenário de sombreamento com arrefecimento a 20°C. Este facto não é devido ao aumento da sensação de calor, mas sim ao aumento da sensação de frio, como se pode verificar pelo aumento do PMV mínimo registado ($PMV = - 1,65$).

De todos os cenários analisados, o mais favorável é quando se utiliza a solução de sombreamento por grelhas conjugada com pré arrefecimento de ar 20°C. Neste cenário regista-se uma diminuição do valor máximo de PMV de 3 para 1,42, reduzindo para menos de metade o valor máximo atingido de sensação de calor, quando comparado com o cenário base. Esta combinação apresenta ainda o valor máximo de PPD mais baixo, em comparação com todos os outros cenários e um valor médio de PMV ($PMV = - 0,06$) muito próximo da sensação térmica considera neutra ($PMV=0$).

Tendo em conta os resultados dos diversos cenários em relação aos índices de conforto, podemos afirmar que o cenário de sombreamento com grelhas pode ser uma alternativa ao cenário onde se combina a utilização de sombreamento com pré-arrefecimento do ar a 20°C. As diferenças nos valores obtidos são pouco significativas (ambos apresentam valores médios de PMV muito próximos de zero) e a instalação de sistemas de arrefecimento implica custos de exploração.

5.4 Consumo energético

Os consumos energéticos foram analisados na forma de energia final e energia primária. Na Tabela 5.4 apresenta-se os consumos de energia final relativos à ventilação, aos sistemas de arrefecimento, aos sistemas de aquecimento, iluminação+equipamentos e aos consumos totais do edifício, em energia primária, para os diversos cenários analisados.

Tabela 5.4. – Consumos anuais de energia final e primária.

	Energia Final [MWh _{EF} /ano]				Energia Primária [MWh _{EP} /ano]	
	Ventilação	Arrefecimento	Aquecimento	Iluminação + Equipamentos	Total do Edifício	
Base	38,49	0,00	147,66	134,78	580,83	
Somb c/grelhas	38,49	0,00	155,61	136,28	592,53	+ 2,02%
Somb c/ pala	38,49	0,00	151,27	134,79	584,45	+ 0,62%
Insuf. ar 20°C	38,49	5,88	147,66	135,58	597,54	+ 2,9%
Insuf ar 15°C	38,49	19,53	147,66	136,76	634,64	+ 9,3%
Somb + Insuf ar 20°C	38,49	5,88	155,62	137,13	609,30	+ 4,9%
Somb + Insuf. ar 15°C	38,49	19,53	155,66	138,29	646,45	+ 11,3%

Os consumos associados à ventilação são iguais em todos os cenários tendo em conta que nenhuma das soluções estudadas influencia este parâmetro.

Os consumos de energia relativos ao pré-arrefecimento do ar nos cenários II e III são iguais (5,88MWh_{EF}/ano para o pré-arrefecimento a 20°C e 19,53MWh_{EF}/ano para o pré-arrefecimento a 15°C).

Considerando apenas o sombreamento, os consumos associados ao aquecimento aumentam, quando comparados com o modelo base. Utilizando o sombreamento, as temperaturas no interior do edifício são mais baixas, devido aos menores ganhos solares e, deste modo, existem maiores necessidades de aquecimento, nos períodos de menor temperatura exterior. No cenário II, os consumos relativos ao aquecimento são iguais aos do modelo base, uma vez que os ganhos solares também são iguais.

No que diz respeito aos consumos de energia final relativos à iluminação+equipamentos nos três cenários, verifica-se que são superiores aos do modelo base, devido ao aumento da necessidade de funcionamento de equipamentos relacionados com o sistema de arrefecimento e/ou aquecimento.

Comparando o consumo total de energia, verifica-se que todas as soluções testadas apresentam um aumento do consumo, em relação ao modelo base.

Fazendo uma análise global de todos os dados recolhidos, verifica-se que o modelo que apresenta as melhores condições de conforto é o da combinação de sombreamento com grelhas e pré-arrefecimento do ar a 20°C. No entanto, em termos de

consumos energéticos, esta combinação apresenta valores superiores aos consumos da solução de sombreamento com grelhas. Assim, esta é uma boa alternativa, visto que para além de não existirem custos energéticos associados ao arrefecimento, apresenta boas condições de conforto. Os custos de exploração dos *chillers* são elevados, quando comparados com as grelhas de sombreamento, que são praticamente inexistentes.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho analisaram-se estratégias de arrefecimento (passivas e/ou ativas), com o objetivo de se obter uma melhoria das condições do ambiente interior no edifício escolar escolhido como caso de estudo. Este tem como característica uma elevada área de envidraçados e a inexistência de sistema de arrefecimento. Para alcançar tal objetivo, foram definidos três cenários: na primeira análise preconizou-se a introdução de sistemas passivos de sombreamento (pala horizontal e grelhas). Seguidamente simulou-se a introdução de sistemas de pré-arrefecimento do ar novo (insuflação do ar a 20°C e 15°C) e por fim, analisou-se a introdução de soluções de sombreamento e pré-arrefecimento simultaneamente. Recorreu-se ao programa de simulação *DesignBuilder* (DB), para criar um modelo de simulação baseado no caso de estudo, utilizando o edifício escolar com as condições de funcionamento atuais.

Para quantificar as diversas soluções implementadas no modelo de simulação, analisaram-se os ganhos solares, as temperaturas interiores, os índices de conforto PMV e PPD e os consumos energéticos.

Na simulação do modelo base, verificou-se que as temperaturas máximas registadas no interior das salas se aproximam das temperaturas que foram referidas nas queixas, que originaram o presente estudo.

No primeiro cenário, verificou-se que a aplicação de soluções de sombreamento, proporciona uma redução significativa nos ganhos solares, assim como, uma redução da temperaturas no interior das salas de aula. A utilização de grelhas de sombreamento traduz-se na redução de 84% nos ganhos solares e na diminuição de 3,7°C na temperatura máxima registada nas salas de aula. O número de horas registadas na categoria de desconforto diminui de 54% para 26% em relação ao modelo base, atingindo-se um valor médio de PMV muito próximo da sensação térmica considerada neutra (PMV=0).

No segundo cenário, constata-se que a introdução de um pré-arrefecimento do ar novo permite uma redução das temperaturas, e também do número de horas de desconforto. No pré-arrefecimento do ar novo a 15°C, existe uma redução de 3,6°C do valor de temperatura máxima, sendo esta muito próxima da obtida no primeiro cenário. O mesmo não acontece no número de horas de desconforto, que reduz apenas 13% em

relação ao modelo base. Constata-se que este cenário não se apresenta como uma boa estratégia de arrefecimento.

Quanto ao terceiro cenário, verifica-se a maior redução de horas de desconforto de todos os cenários analisados. Este apresenta um índice médio do PMV próximo da sensação térmica considerada neutra e uma redução de 6,7°C na temperatura máxima atingida nas salas de aula.

Observa-se que a aplicação de sombreamento com grelhas e pré-arrefecimento do ar novo a 20°C é teoricamente a melhor solução de todas. No entanto, o uso de sombreamento com grelhas, apresenta-se na prática como a melhor alternativa. As condições de conforto atingidas não são tão favoráveis como no terceiro cenário, mas apresentam melhorias muito consideráveis em relação ao modelo base. A sua aplicação implica um investimento inicial e custos de exploração reduzidos.

Uma afinação da simulação, através de medições a efetuar no local (edifício escolar), pode no futuro ser uma boa alternativa, ainda que, neste *software* existam algumas limitações ao nível da definição dos sistemas. A migração para outro programa de simulação dinâmica, que permita uma maior aproximação às condições reais, pode também, apresentar-se como uma alternativa a ser estudada. Uma análise das condições do ambiente interior, alargado a mais zonas do edifício escolar e a simulação de outros cenários tais como, o uso de película refletante nos vãos envidraçados, ou a aplicação de uma estratégia de ventilação mecânica noturna, poderão ser aspetos interessantes a explorar numa possível continuação do presente trabalho

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfano, F. R. A. A., Bellia, L., Boerstra, A., van Dijken, F., Ianniello, E., Lopardo, G., Minichiello, F., Romagnoni, P. e da Silva, M. C. G. (2010).** *Ambiente Interior e Eficiência Energética nas Escolas*: Ingwnium Edições. Lda.^a.
- Asadi, E., Costa, J. J. e Gameiro da Silva, M. (2011).** Indoor air quality audit implementation in a hotel building in Portugal. *Building and Environment*, 46(8), 1617-1623.
- ASHSAE 55. (2004).** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- Astolfi, A., Corgnati, S. P. e Lo Verso, V. R. M. (2003).** Environmental comfort in university classrooms – thermal, acoustic, visual. In *Proceedings of 2nd International Conference on Research in Building Physics*. Leuven, Belgium.
- Bradshaw, V. (2006).** Passive Methods. In *The Building Environment: Active and Passive Control Systems* 3^a ed. (cap. 7, pp. 235-236): John Wiley & Sons.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Lee, E. S., Arasteh, D. e Willmert, T. (2004).** *Window System for High-Performance Buildings*. New York: W. W. Norton & Company.
- Cartieaux, E., Rzepka, M.-A. e Cuny, D. (2011).** Qualité de l'air à l'intérieur des écoles. *Archives de Pédiatrie*, 18, 789-796.
- CEN (2005).** Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria EN ISO 7730. Brussels: European Committee for Standardisation.
- Chaves, F. (2009).** Instalações de Climatização e Refrigeração. In *Mestrado em Manutenção Técnica de Edifícios* 1^a ed., vol. 4 (pp. 194-241). Escola Superior de Tecnologia de Abrantes: Instituto Politécnico de Tomar.
- Charles, K. E. (2003).** Fanger's Thermal Comfort and Draught Models. In NRC-CNRC (Ed.), vol. 162. Canada: IRC.
- Clements-Croome, D. J., Awbi, H. B., Bakó-Biró, Z., Kochhar, N. e Williams, M. (2008).** Ventilation rates in schools. *Building and Environment*, 43(3), 362-367.
- Cole, F. W. (1980).** *Radiation Processes and Heat Transfer. Introduction to Meteorology* (3^a ed.): John Wiley and Sons.
- Comissão Europeia (2002).** Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios (2002/91/CE).
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M. e Griffith, B. T. (2005).** Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. In, vol. 1.0 (pp. 56): United States Department of Energy, University of Strathclyde e University of Wisconsin.
- EPA. (2000).** Indoor air quality and student performance. *United States Environmental Protection Agency*, 4002-F-00-09.

- Fanger P. O. (1970).** “Thermal Comfort”. Danish Technical Press.
- Gonçalves, A. (2007).** Utilização de programas informáticos de simulação. In Roriz, L. (Ed.), *Climatização - Conceção, Instalação e Condução de Sistemas* 2ª ed. (cap. 5, pp. 117-132). Lisboa, Portugal: Edições Orion.
- Greenwood, J. S., Soulos, G. P. e Thomas, N. D. (2000).** Under Cover - Guidelines for shade planning and design. In (cap. 2, p. 17). Nova Zelândia: Cancer Society.
- Grupo de Trabalho do Atlas. (1988).** Radiação Solar. Notícia explicativa. In *Atlas do Ambiente*, vol. I (pp. 9-12). Lisboa, Portugal.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W. e Wiese, A. (2007).** Utilisation of Passive Solar Energy. In *Renewable Energy: Technology, Economics and Environment* (cap. 3, pp. 103-115).
- Moret Rodrigues, A., Canha da Piedade, A. e Braga, A. M. (2009).** *Térmica de Edifícios*. Lisboa, Portugal: Edições Orion.
- Orlowski, R., Loe, D., Watson, N., Rowlands, E., Mansfield, K., Venning, B., Seager, A., Minikin, J., Hobday, R. e Palmer, J. Guidelines for Environmental Design in Schools (Revision of Design Note 17). Building Bulletin 87. (1997).
- Orosa, J. A. (2009).** Research on General Thermal Comfort Models. *European Journal of Scientific Research*, 27, 217-227.
- Pohl, J. (2011).** Solar Energy: The Beckoning Opportunity. In *Building Science Concepts and Application* (cap. 5, pp. 69-70): Wiley-Blackwell.
- RCCTE Regulamento das Características de comportamento Térmico dos Edifícios (2006).** Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril.
- Roriz, L. (2007a).** Aspectos gerais associados aos sistemas de AVAC. In Roriz, L. (Ed.), *Climatização. Conceção, Instalação e Condução de Sistemas* 2ª ed. (cap. 2, pp. 63-78). Lisboa, Portugal: Edições Orion.
- Roriz, L. (2007b).** Tipos de sistemas. In Roriz, L. (Ed.), *Climatização. Conceção, Instalação e condução de Sistemas* 2ª ed. (cap. 3, pp. 79-94). Lisboa, Portugal: Edições Orion.
- RSECE Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (2006).** Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril.
- Silva, D. C. da. (2011).** “Análise dos consumos energéticos de um edifício escolar em relação aos parâmetros de ventilação” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- SCE Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do ar Interior nos Edifícios (2006).** Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril.
- Wargocki, P. e Wyon, D. P. (2007).** The effects of moderately raised classroom temperature and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children. *HVAC&R Research*, 13(2), 193-220.
- Zeiler, W. e Boxem, G. (2009).** Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. *Building and Environment*, 44(11), 2308-2317.

8 ANEXO A



Figura 8.1. – Planta do 1º piso inserida no DB com o zoneamento realizado.

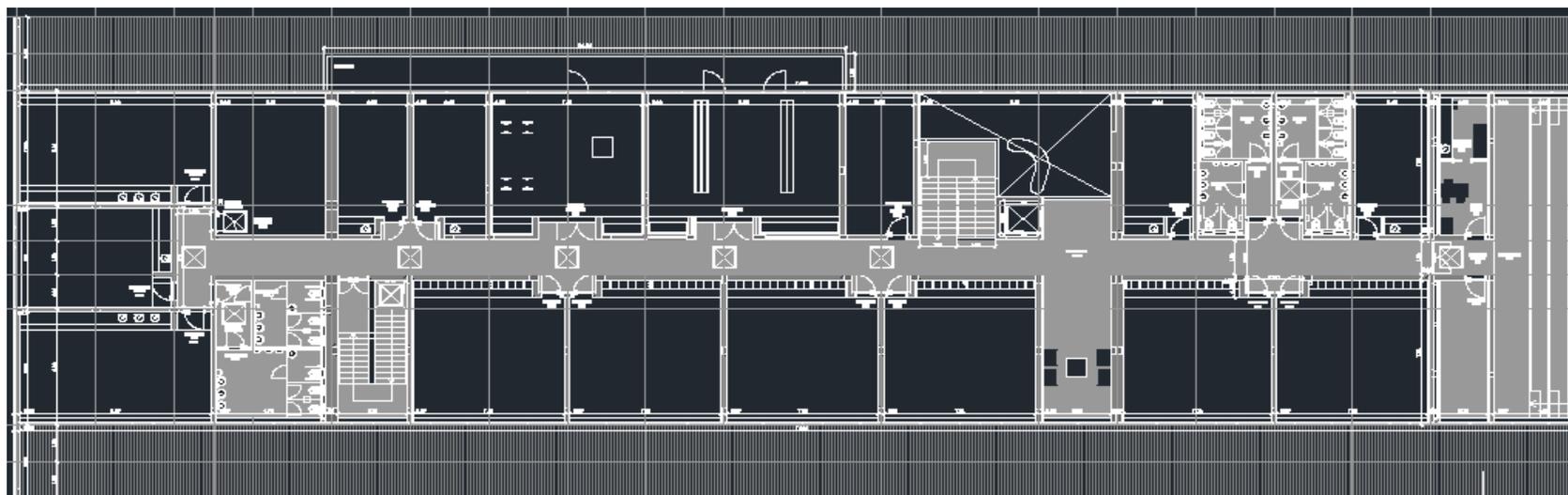


Figura 8.2. – Planta em AutoCAD do 1º piso do edifício escolar.

9 ANEXO B

Tabela 9.1. – Zoneamento do edifício escolar e respetivos parâmetros característicos.

	Área [m ²]	Nº ocupantes por zona	Densidade ocupação [occ/m ²]	Caudal mínimo de ar	
				Por ocup. [m ³ /(h.occ)]	Por Área [m ³ /(h.m ²)]
Rés-do-chão					
Atrios+Corredor	283	-	-	-	5
Secret+Gab.Director	25,7	9	0,35	35	5
Sala 1-6	323,7	150	0,463	30	-
Sala pré-escolar 1	51	36	0,71	30	-
Sala pré-escolar 2	40	24	0,60	30	-
Sala pré-escolar 3	52,5	36	0,71	30	-
Ref. 1ºCiclo	84	96	1,14	35	-
Ref. pré-escolar	55,3	64	1,20	35	-
Piso 1					
Atrios+Corredores	339,4	-	-	-	5
Sala 1+2	111,4	50	0,45	30	-
Sala 3+4	111,6	50	0,45	30	-
Sala 5+6	112,8	50	0,44	30	-
Sala Exp Art 1+2	54,5	24	0,44	30	-
Sala Exp Art 3+4	54,2	24	0,44	30	-
Gab.Médico+ P.Socorro	21,8	6	0,28	30	-
Atelier Artes	55,4	32	0,58	30	-
Atelier Música	39,6	25	0,63	30	-
Atelier Ciência	55	32	0,58	30	-
Sala Informatica	43,3	32	0,74	30	-
Sala Professores	54,6	16	0,29	30	-
Biblioteca	69	48	0,7	30	-

10 ANEXO C

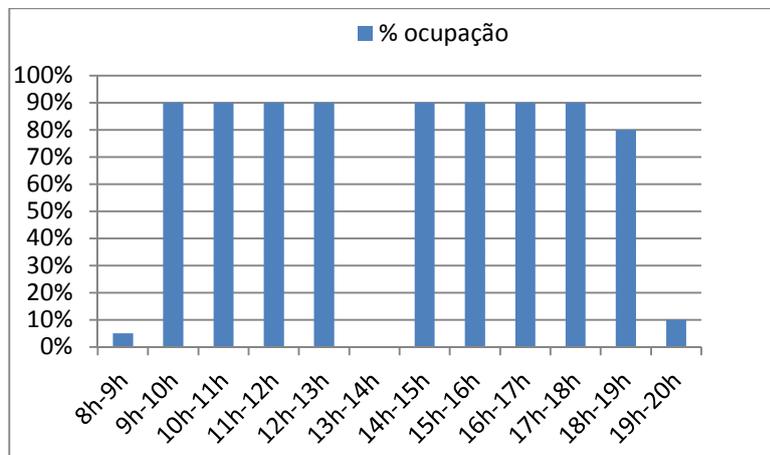


Figura 10.1. – Perfil de ocupação.

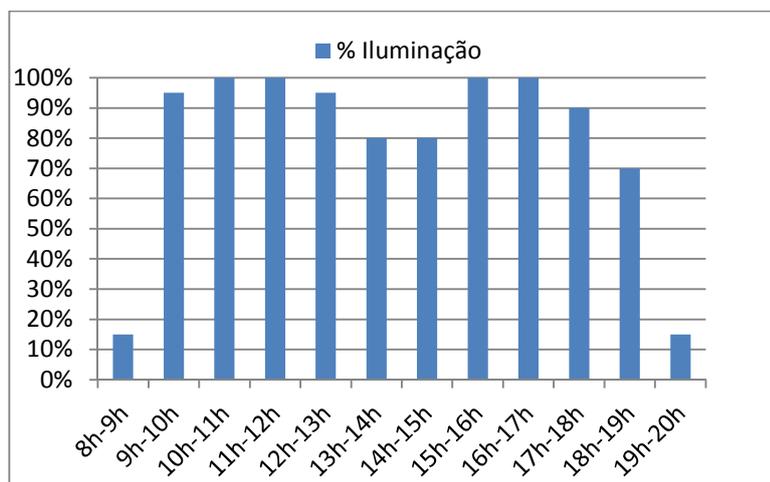


Figura 10.2. – Perfil de Iluminação.

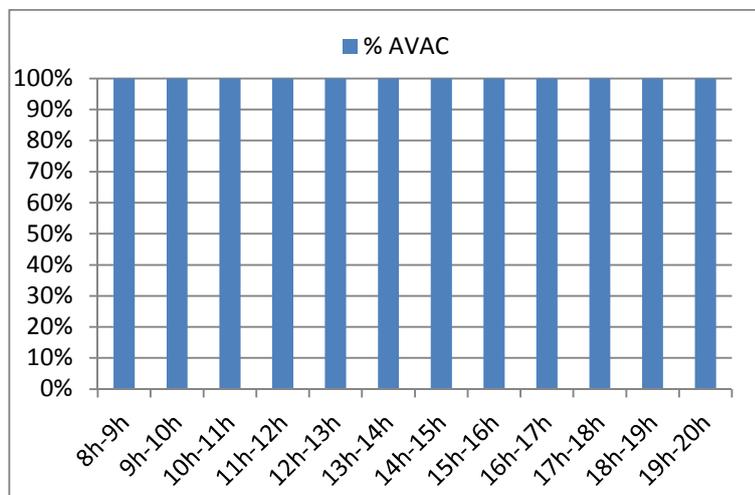


Figura 10.3. – Perfil do sistema de AVAC.

11 ANEXO D

SCHEDULE:COMPACT,
Estabelecimentos de Ensino Horário AVAC,
Fraction,
Through: 01 Jan,
For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay,
Until: 08:00, 0,
Until: 20:00, 0,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 15 May,
For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay,
Until: 08:00, 0,
Until: 20:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 13 Oct,
For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay,
Until: 08:00, 0,
Until: 20:00, 0,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 20 Dec,
For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay,
Until: 08:00, 0,
Until: 20:00, 1,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays AllOtherDays,
Until: 24:00, 0,
Through: 31 Dec,
For: Weekdays SummerDesignDay WinterDesignDay,
Until: 08:00, 0,
Until: 20:00, 0,
Until: 24:00, 0,
For: Weekends,
Until: 24:00, 0,
For: Holidays AllOtherDays,
Until: 24:00, 0;