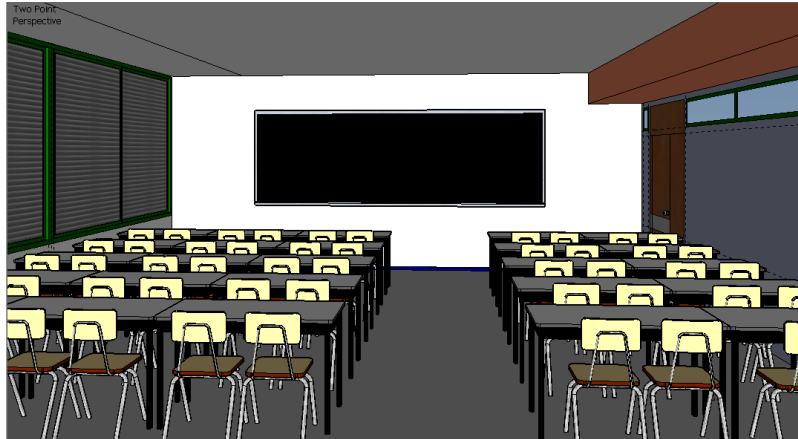




TÉCNICO
LISBOA



Gestão Colaborativa da Iluminação e Climatização

Inês Pestana Casquilho Félix Oom

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientador: Carlos Augusto Santos Silva

Júri

Presidente: Edgar Caetano Fernandes

Orientador: Carlos Augusto Santos Silva

Vogais: Maria da Glória de Almeida Gomes

Junho 2017

ABSTRACT

In recent years, there has been a substantial increase of the world energy consumption and one of the major contributors to this problematic is the building sector. In pursuance of reducing its contribution, efforts have been made in order to create automatic control programs capable of using electrical systems more efficiently especially in the field of building automation. These programs are expected to help reduce the electric consumption by HVAC systems without compromising people's needs under a specific environment.

The goal of this dissertation is to develop a numerical model capable of simulating the evolution of indoor temperature and illuminance and to study the occupant's comfort using scenarios of manual and automatic control. The study main focus is the automation of processes of natural ventilation and the evaluation of its benefits on the general comfort of people inside a room. In addition, it was also investigated the effect on indoor illumination and temperature, on the working plane, through the use of different control measures of shading devices.

It was concluded that the developed control algorithm is more efficient regarding energy usage, under simulated conditions, when compared to manual control scenarios, in spaces shared by several people. The presence of several people gives less control opportunities to each occupant to change the room's environment according to their own needs, which leads to adaption problems.

Moreover, it has been demonstrated that non-exhaustive manual control strategies can improve room conditions and, in the short-term, it might be a viable alternative to automatic control systems.

Keywords Domotics, Energy Management, Thermal Comfort, Ventilation, Building Climatization, Behavior model

RESUMO

Nos últimos anos, tem-se assistido a um aumento substancial do consumo energético mundial e o setor dos edifícios é um dos setores que mais negativamente contribui para esta situação. Na tentativa de reverter esta situação, tem-se procurado desenvolver programas de controlo automático capazes de usarem os sistemas elétricos de forma mais eficiente, em especial na área da domótica. Desta forma, espera-se atingir o mínimo consumo elétrico possível por parte dos sistemas de AVAC que respeite as necessidades térmicas no meio em questão.

O objetivo desta dissertação consistiu em desenvolver um modelo numérico capaz de simular a evolução das condições ambientais no interior duma sala, como a temperatura e a iluminância, e em analisar, com recurso a esta ferramenta, o conforto sentido pelos ocupantes segundo dois cenários de controlo manual e um algoritmo de controlo automático.

Esta dissertação teve como foco principal o estudo da automatização de processos de ventilação natural e a avaliação dos seus benefícios sobre o conforto geral. Adicionalmente, também foi estudado o efeito de diferentes estratégias de controlo de dispositivos de sombreamento sobre a temperatura interior e a iluminação no plano de trabalho.

Concluiu-se que a aplicação do algoritmo de controlo desenvolvido é energeticamente mais eficiente, sob as condições simuladas, quando comparado à situação de controlo manual num espaço partilhado por diversas pessoas, onde existe baixa oportunidade de controlo por parte de cada indivíduo e, conseqüentemente, menor adaptação e conforto térmico. Adicionalmente, foi comprovado que estratégias não exaustivas de controlo manual permitem, por si só, a melhoria das condições na sala e podem constituir uma alternativa ao controlo automático a curto prazo.

Palavras-chave Domótica, Gestão de Energia, Conforto Térmico, Ventilação, Climatização de Edifícios, Modelo de Comportamentos

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Carlos Silva, pela sua amabilidade e disponibilidade. Deixou-me à vontade para lhe pedir auxílio por todos os meios de contacto possíveis, não olhando a horários. A sua compreensão foi determinante nas fases mais complicadas de execução deste trabalho. Foi esta boa relação de trabalho que tornou tudo mais fácil.

Agradeço ao Eng. ^o Henrique Pombeiro por toda a ajuda prestada. A sua preocupação com o meu sucesso manteve-se até ao dia da entrega e dou graças por isso.

Agradeço aos meus colegas e amigos Rafael Prior e Bruno Oliveira por todo o apoio técnico de programação.

Agradeço a todos os meus amigos e familiares pelo apoio incondicional e inspiração que me deram para lutar pelos meus interesses e cumprir cada objetivo na minha vida.

Obrigado a todos

ÍNDICE

ABSTRACT	I
RESUMO	III
AGRADECIMENTOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 CONTRIBUTOS.....	4
1.4 ESTRUTURA	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 MODELOS DE CONTROLO INTELIGENTE EM EDIFÍCIOS (DOMÓTICA).....	5
2.2 SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES INTERIORES	6
2.2.1 <i>Iluminação</i>	7
2.3 COMPORTAMENTOS DOS UTILIZADORES FACE AOS SISTEMAS ELÉTRICOS E SEUS CONSUMOS	13
2.3.1 <i>Controlos disponíveis e perfis de utilização</i>	14
2.3.2 <i>Comportamentos que reduzem o consumo energético</i>	17
2.4 CONFORTO TÉRMICO.....	19
2.4.1 <i>Norma ASHRAE 55</i>	23
2.4.2 <i>Condições não uniformes</i>	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 MODELO DE ILUMINAÇÃO	25
3.2 MODELO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA.....	30
3.2.1 <i>Trocas de calor por condução</i>	30
3.2.2 <i>Trocas de calor por radiação</i>	30
3.2.3 <i>Trocas de calor por ventilação</i>	33
3.2.4 <i>Ganhos internos</i>	36
3.2.5 <i>Balanço Térmico</i>	36
3.3 MODELO DE CONFORTO	38
3.4 ALGORITMOS DE GESTÃO.....	38
3.4.1 <i>Com intervenção dos utilizadores</i>	38
3.4.2 <i>Automáticos</i>	39

4	CASO DE ESTUDO	45
4.1	LOCALIZAÇÃO.....	45
4.2	AUDITORIA ENERGÉTICA	45
4.3	CARATERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE	47
4.3.1	<i>Paredes</i>	48
4.3.2	<i>Janela</i>	48
5	RESULTADOS.....	49
5.1	COMPARAÇÃO DOS MODELOS SIMPLIFICADO E ENERGYPLUS	49
5.2	VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS REAIS.....	52
5.3	CONTROLO MANUAL.....	53
5.4	CONTROLO AUTOMÁTICO	55
5.4.1	<i>Controlo combinado do sistema de sombreamento e da ventilação</i>	57
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	61
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXOS.....	67
	ANEXO A. ÂNGULOS SOLARES.....	67
	ANEXO B. FATORES DE FORMA.....	69
	ANEXO C. ENERGYPLUS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo final por tipo de fonte em Portugal.....	1
Figura 2. Consumo médio diário de energia elétrica em cada pavilhão do IST	2
Figura 3. Representação esquemática do trabalho desenvolvido	3
Figura 4. Espectro Eletromagnético com destaque à luz visível	8
Figura 5. Distribuição da componente natural da iluminância em salas com janelas.....	11
Figura 6. Curva de intensidade luminosa no plano transversal e longitudinal.....	12
Figura 7. Proporção de janelas abertas em escritórios em função da temperatura exterior	16
Figura 8. Nível de isolamento em função da temperatura operativa interior média	17
Figura 9. Zonas de Conforto da norma ASHRAE	21
Figura 10. Escala de sensação térmica ASHRAE	22
Figura 11. Percentagem de insatisfação em função das assimetrias térmicas	24
Figura 12. Fluxograma do modelo de iluminação	26
Figura 13. Localização dos três pontos de interesse no método de Lúmen.....	26
Figura 14. Iluminância natural no plano vertical. Componente direta da radiação solar	27
Figura 15. Iluminância natural no plano vertical em footcandles. Componente difusa da radiação	28
Figura 16. Iluminância natural horizontal em condições de céu limpo.	28
Figura 17. Trocas de calor em recintos.....	32
Figura 18. Metodologias usadas consoante as condições de ventilação	33
Figura 19. Variação do coeficiente de pressão médio sobre a superfície de edifícios baixos	34
Figura 20. Escoamento de ar através das janelas.....	35
Figura 21. Fluxograma do programa que simula a temperatura.....	38
Figura 22. Fluxograma do programa de controlo da iluminação.....	40
Figura 23. Fluxograma do algoritmo de climatização	42
Figura 24. Modelo da sala V1.10 desenhado em SketchUp.....	45
Figura 25. Desagregação do consumo anual de eletricidade no pavilhão de Civil.	46
Figura 26. Planta da Sala. Disposição das mesas e luminárias. Modelo usado em DIALux	46
Figura 27. Perspetiva do modelo da sala. Paredes não adiabáticas.....	47
Figura 28. Variação dos ângulos de altitude solar (a) e de azimute (b) calculados	50
Figura 29. Resultados do modelo solar para a radiação incidente (a) e a transmitida (b)	50
Figura 30. Resultados do modelo solar para a radiações transmitidas direta (a) e difusa (b)	51
Figura 31. Variação da temperatura interior média da sala com base nos resultados dif. modelos	52
Figura 32. Variação real da temperatura na sala e comparação com os resultados do modelo simplificado	53
Figura 33. Previsão da Variação dos índices PMV para o dia 9 de julho de 2016.....	56
Figura 34. Previsão da Variação dos índices PMV para o dia 15 de janeiro de 2016.....	56
Figura 35. Temperatura interior e controlo implementado no dia 9 de julho de 2016	58
Figura 36. Temperatura interior e controlo implementado no dia 15 de janeiro de 2016	59
Figura 37. Posição Solar.	68

Figura 38. Fatores de forma	69
Figura 39. Modelo da Sala	69
Figura 40. Ficheiros de entrada e de saída do EnergyPlus	71
Figura 41. Excerto de ficheiro idf.....	72
Figura 42. Janela do EP-Launch.....	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Níveis de iluminância recomendados pela norma EN12464-1 para escritórios	9
Tabela 2. Níveis de iluminância recomendados pela norma EN12464 para instituições de ensino	9
Tabela 3. Dicas de eficiência energética na climatização.....	19
Tabela 4. Sensação térmica para estudantes Universitários com atividade sedentária	22
Tabela 5. Constituição das paredes da sala	48
Tabela 6. Resultados de PPD, potência consumida e níveis de iluminância natural para diferentes cenários de controlo de estores	54
Tabela 7. PPD, consumo e iluminação natural para o algoritmo de controlo automático	57

LISTA DE ABREVIATURAS

ASHRAE – *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers* (Associação Americana de Engenheiros de AVAC)

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado

BCVTB – *Building Controls Virtual Test Bed*

EA – Estores Sempre Abertos

EF – Estores Sempre Fechados

EP – *EnergyPlus*

ESNA – *Illuminating Engineering Society of North America* (Sociedade de Engenharia de Iluminação da América do Norte)

GEE – Gases de Efeito de Estufa

IAC – *Inside Shading Attenuation Coefficient* (Coeficiente de sombreamento interno)

IEA – *International Energy Agency* (Agência internacional Europeia)

IES – *Illuminating Engineering Society* (Sociedade de Engenharia de Iluminação)

INPT – Iluminância Natural no Plano de Trabalho

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

PMV – *Predicted Mean Value* (Valor Médio Previsto)

PPD – *Percentage of People Dissatisfied* (Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas)

RSDD – *Room Surface Dirt Depreciation* (Fator de depreciação da sujeidade sobre a superfície da sala)

SHGC – *Solar Heat Gains Coefficient* (Coeficiente de ganhos solares)

UNEP – *United Nations Environment Programme* (Programa Ambiental das Nações Unidas)

WDD – *Window Dirt Depreciation* (Fator de depreciação da sujeidade sobre a janela)

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_s : Azimute solar [°]
 a_{sw} : Azimute entre o sol e a janela [°]
 a_w : Azimute da janela [°]
 A_1 : Área da sup.ext [m²];
 A_{ab} : Área da abertura [m²];
 A_i : Área da superfície i [m²];
 A_j : Área da superfície j [m²];
 A_{janela} : Área da janela [m²];
 A_W : Área do vidro da janela [m²];
 c_p : Capacidade térmica do meio [J.Kg⁻¹.K⁻¹];
C: Fator de difusão do céu;
 C_D : Coeficiente de descarga;
 C_p : Coeficiente de pressão;
 C_s, C_g : Coeficientes de Utilização (s – direta; g – refletida)
E: Potência emitida pela superfície unitária [W/m²];
 E_d : Radiação incidente difusa [W/m²];
 E_D : Radiação incidente direta [W/m²];
 E_{DN} : Radiação que chega a uma sup. unitária perpendicular à radiação em qualquer instante [W/m²]
 E_{gw} : Iluminância na janela por incidência da radiação refletida pela terra [lux];
 E_k : Potência emitida pela superfície unitária k [W/m²];
 E_{kw} : Iluminância difusa no plano vertical [lux]
 E_r : Radiação refletida incidente [W/m²];
 E_{sg} : Iluminância horizontal total na superfície da terra [lux];
 E_{sw} : Iluminância na janela por incidência das radiações direta e difusa [lux]
 E_{uw} : Iluminância vertical proveniente da radiação direta do sol [lux]
 F_{ij} : Fração de radiação que abandona A_j e intercepta A_i
g: Aceleração da gravidade [m/s²];
 $G_{Horizontal}$: Radiação incidente numa superfície Horizontal [W/m²];
 h_s : Ângulo de hora solar [°]
H: Altura do escoamento não desviado [m];
H: Altura da abertura [m];
 H_{met} : Altura a que é medida U_{met} [m];
 H_{NPL} : Altura do nível de pressão neutra [m];
 k_m : Fator de perda de perda de luz
 K_s, K_g : Coeficientes de Utilização (s – direta; g – refletida)
L: Latitude [°]
m: Massa interior ao vc [Kg];

$n_{\text{ocupantes}}$: N° de ocupantes;
 $n_{\text{luminárias}}$: N° de luminárias ligadas;
 $p_{\text{dissipada}}$: Potência dissipada pelas lâmpadas em cada luminária [W]
 \dot{q}_{cond} : Potência calorífica por condução [W];
 $\dot{q}_{\text{rad,emitida}}$: Potência emitida que incide na janela [W];
 $\dot{q}_{\text{s,ocupante}}$: Calor sensível libertado por cada ocupante [W]
 $\dot{q}_{\text{solar,janela}}$: Ganho energético devido à exposição solar da janela [W];
 Q : Caudal Volúmico [m^3/s];
 R : Distância entre os centros das superfícies
 s : Fator de abrigo;
 $\text{SHGC}(\theta)$: Coeficiente de ganho solar para a componente direta da radiação;
 $(\text{SHGC})_D$: Coeficiente de ganho solar para a componente difusa da radiação;
 T : Temperatura da superfície emissora [K];
 T_i : Temperatura da superfície i [$^{\circ}\text{C}$];
 T_i : Temperatura interior [$^{\circ}\text{C}$];
 T_o : Temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$];
 U_i : Coeficiente global de transferência de calor da superfície i [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$];
 U_H : Velocidade média do vento a uma altura H do chão sem obstáculos [m^2/s];
 U_{met} : Velocidade do vento medida na estação meteorológica [m^2/s];
 Y : Razão entre a radiação incidente difusa numa superfície vertical e a radiação incidente difusa horizontal;
 α : Altitude solar [$^{\circ}$]
 α_H : Expoente característico do terreno onde está inserido edifício;
 α_{met} : Expoente característico do terreno onde está inserida a estação meteorológica;
 β : Ângulo de altitude solar [$^{\circ}$]
 δ_H : Espessura da camada limite [m];
 δ_{met} : Espessura da camada limite no ponto de medição [m];
 δ_S : Declinação Solar [$^{\circ}$]
 Δp : Diferença de pressão entre o exterior e o interior [Pa]
 ΔT : Diferença de temperaturas [K]
 ΔT : Diferença de temperatura entre o exterior e o interior [K]
 ε : Emissividade da superfície;
 ε_1 : Emissividade da sup.1;
 θ : Ângulo entre a direção da radiação e a perpendicular da superfície [$^{\circ}$];
 θ_i : Ângulo entre a normal da superfície i e a reta que passa entre ambos os centros das superfícies [$^{\circ}$]
 θ_j : Ângulo entre a normal da superfície j e a reta que passa entre ambos os centros das superfícies [$^{\circ}$]
 τ : Transmissividade
 ρ : Densidade do ar [kg/m^3];
 ρ_g : Refletividade do chão;

ϕ_{sw} : Fluxo luminoso de origem direta e difusa que atravessa a janela [lm];

ϕ_{gw} : Fluxo luminoso refletido do chão que atravessa a janela [lm];

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Conduzidos por um aumento da população, uma economia em expansão e uma procura por condições que permitam uma melhor qualidade de vida, tem-se assistido nos últimos anos a um aumento substancial do consumo energético mundial e espera-se que esta tendência de crescimento permaneça nas próximas décadas. A Agência Internacional de Energia (IEA) prevê que a procura de eletricidade em 2040 seja 30% maior do que em 2016, num panorama otimista — considerando que os países membros honram os seus compromissos estabelecidos no acordo de Paris [1].

Com o aumento da procura de energia cresce a necessidade de produção. Devido à forte dependência dos combustíveis fósseis para esse efeito, o aumento da emissão de Gases de Efeito de Estufa (GEE) é inevitável, tendo um impacto muito negativo sobre o meio ambiente, segurança alimentar e saúde humana, como se verifica na China [2].

O investimento em energias renováveis e limpas tem sido feito um pouco por todo o mundo nos últimos anos, mas o consumo de energia proveniente de fontes renováveis ainda representa uma pequena parte do consumo total. Através da Figura 1 pode analisar-se especificamente o caso Português. Pode-se constatar que no espaço de uma década, Portugal fez um esforço significativo, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis.

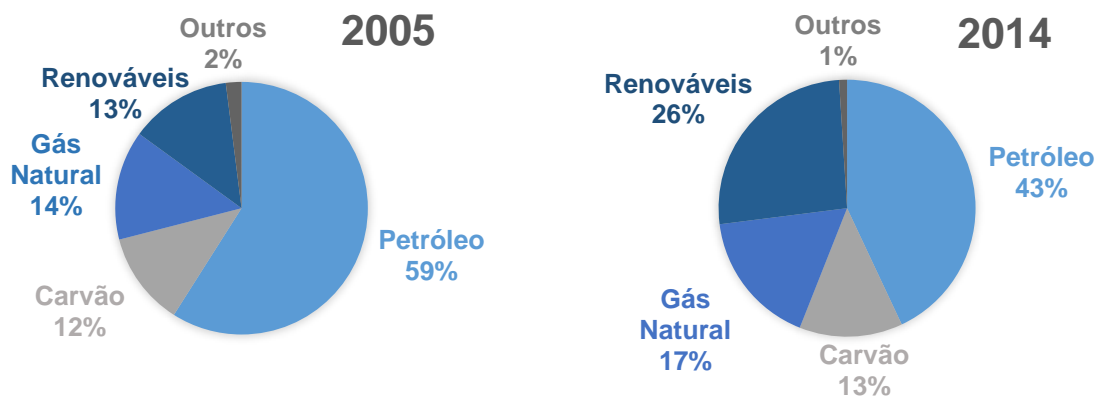


Figura 1. Consumo final por tipo de fonte em Portugal nos anos de 2005 e 2014 [3]

Com o objetivo de reverter o aumento dos GEE na atmosfera e consequentemente o aquecimento global, foram criadas diversas estratégias a nível internacional. Desde a adoção pela União Europeia (UE) do seu primeiro pacote de medidas para o clima e energia em 2008, que muitos progressos foram alcançados. Atualmente, a UE está no bom caminho para o cumprimento dos seus objetivos de redução das emissões de GEE para 2020 e já estabeleceu novas metas para 2030. Nesse ano, será importante alcançar-se: uma quota mínima de 27% para a energia renovável, uma redução

de 40% na emissão de GEE em comparação com os níveis emitidos em 1990 e uma poupança energética de 27% relativamente a um cenário sem novas medidas [4].

Tais medidas procuram reduzir as emissões dos gases poluentes através do aumento da eficiência energética, o que irá desencadear uma redução do consumo, e da crescente utilização de fontes de energia renovável. A discussão destas medidas de eficiência energética tem sido um assunto prioritário na agenda política da União Europeia e em todo o mundo, uma vez que representa uma solução para o triplo desafio atual: a crise económica, a dependência energética e as alterações climáticas.

Segundo a United Nations Environment Programme (UNEP), o setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% do consumo de energia global e tem uma contribuição de 30% na libertação anual de GEE [5]. Este setor é o que oferecesse maior potencial de redução da emissão de GEE com custos reduzidos e é possível diminuir o consumo energético a ele associado em 30% a 80%, usando tecnologias comprovadas e disponíveis comercialmente [5].

No caso especial do Instituto Superior Técnico (IST), uma instituição de ensino universitária em Portugal, o consumo energético anual esteve acima dos 12,5 GWh nos anos de 2011 e 2012. A Figura 2 representa os consumos médios diários de eletricidade em cada edifício desta instituição.

O consumo médio diário do pavilhão de civil foi o mais elevado relativamente aos restantes pavilhões do campus Alameda e ao pavilhão que integra o campus do Taguspark [6]. Segundo [7], medidas de racionalização dos consumos implementadas no pavilhão de civil terão grandes oportunidades de sucesso, uma vez que este apresenta uma construção deficiente e um comportamento energético ineficiente, resultando em consumos desajustados.

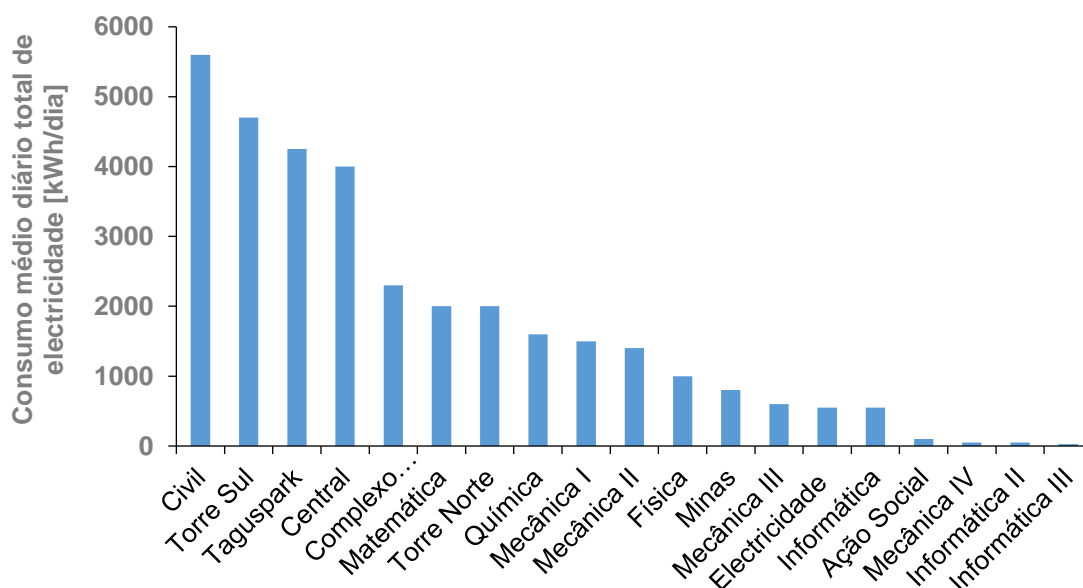


Figura 2. Consumo médio diário de energia elétrica em cada pavilhão do IST no ano de 2012 [6]

1.2 OBJETIVO

Com vista à redução dos consumos elétricos, vários estudos têm sido feitos para otimizar a eficiência energética em edifícios. Tanto a melhoria da eficiência de equipamentos elétricos, como o controlo automatizado dos sistemas podem contribuir para a utilização mais eficiente de energia.

Em linha com o que tem sido feito nesta área de investigação, este projeto tem como propósito o desenvolvimento de um modelo simplificado — capaz de estimar a luminosidade e a temperatura num espaço interior, naturalmente ventilado, com exposição solar — e de um algoritmo de controlo automatizado, que conciliados permitiram avaliar o efeito do controlo automático sobre o conforto dos ocupantes.

A Figura 3 resume o trabalho desenvolvido com a realização desta dissertação.

O objetivo desta dissertação pôde ser dividido em passos elementares:

1. Desenvolver um modelo simplificado em *Matlab*
2. Criar um modelo similar em *EnergyPlus*
3. Validar o primeiro modelo por comparação com o segundo
4. Desenvolver algoritmos de gestão automática da iluminação e climatização
5. Desenvolver algoritmos de gestão manual que reflitam os comportamentos habituais dos ocupantes
6. Comparação das diferentes estratégias de gestão em termos de consumo energético e conforto dos utilizadores

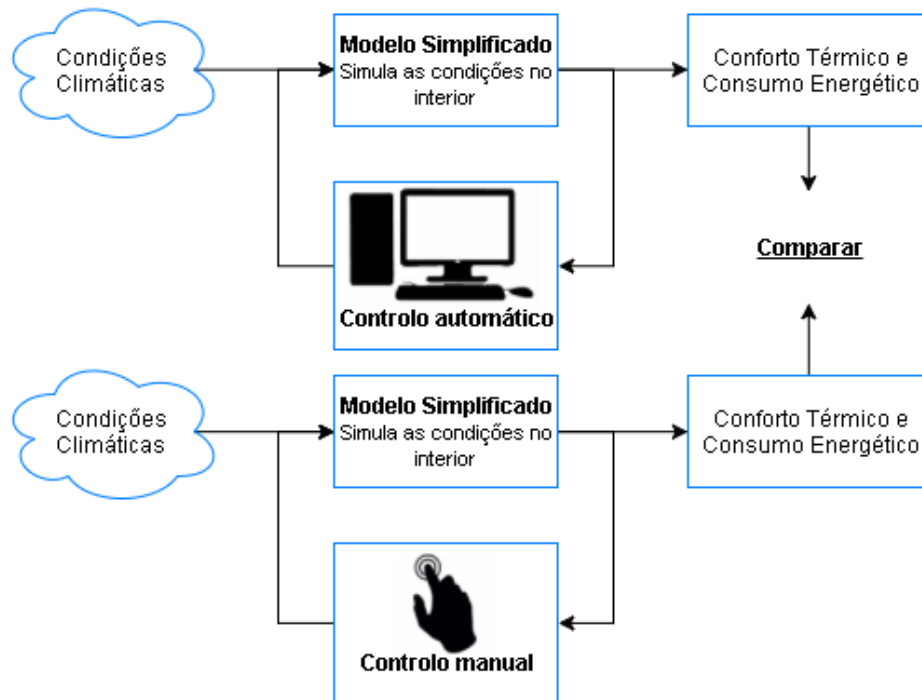


Figura 3. Representação esquemática do trabalho desenvolvido

1.3 CONTRIBUTOS

A seguinte dissertação analisa as vantagens dum controlo automático da ventilação natural. Este modo de transferência de calor é, na maioria das vezes, a única forma de climatização disponível e por não ser induzida permite reduzir os consumos dos sistemas elétricos.

Um dos maiores contributos desta dissertação, a curto prazo, é a criação de um manual para a adoção de comportamentos mais sustentáveis em ambiente de sala de aula.

Futuramente, esta tese sustentará a criação dum sistema automatizado de estores, portas e janelas, através do algoritmo de controlo desenvolvido. Neste momento, permite perspetivar os benefícios que podem ser alcançados com a instalação de um sistema desse tipo.

Outro contributo foi o trabalho desenvolvido na criação dum modelo térmico e de iluminação. Este pode ser utilizado em diversos estudos com cariz universitário sobre o caso específico das salas do pavilhão de civil orientadas a Este.

A revisão bibliográfica, aqui presente, permite sensibilizar o leitor sobre os seus comportamentos no que toca à gestão do ambiente climatizado e apoiará estudos futuros nesta temática.

1.4 ESTRUTURA

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos. O presente capítulo, pretende fazer um enquadramento ao tema e sensibilizar o leitor para a necessidade de adoção de novos comportamentos energéticos e evidenciar as motivações que estão na base da elaboração deste projeto, bem como seus objetivos e contributos.

O segundo capítulo, intitulado de Revisão Bibliográfica, faz uma pequena revisão de conceitos inerentes a esta temática e enquadra o leitor no contexto atual sobre modelos de simulação numéricos e algoritmos de controlo, na área de domótica.

O terceiro capítulo, Metodologia, explica o procedimento utilizado para a resolução dos objetivos propostos. Mais concretamente, aborda aspetos como: os métodos de cálculo usados para conceber os modelos de iluminação, de temperatura e de conforto; e os algoritmos de gestão.

No quarto capítulo, é descrito o caso de estudo sob análise e, no quinto capítulo são apresentados os resultados das simulações para diferentes cenários de utilização.

Por último, no sexto capítulo são tiradas algumas conclusões e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Já foram desenvolvidos e documentados vários trabalhos de investigação na área de gestão de energia em edifícios. Dado o vasto conhecimento que se tem sobre este assunto, é difícil fazer uma revisão bibliográfica sobre todos os aspetos inerentes ao tema desta dissertação. Neste capítulo apresentaram-se alguns dos aspetos, que depois de selecionados de forma criteriosa, se consideraram mais relacionados e com maior contributo para o desenvolvimento deste projeto. O presente capítulo serve assim para elaborar um estado da arte nas áreas de controlo e simulação de edifícios, maioritariamente.

No subcapítulo 2.1 apresentam-se alguns dos modelos de controlo de iluminação e climatização já desenvolvidos.

O subcapítulo 2.2 refere aspetos importantes acerca da simulação da temperatura e iluminação em espaços interiores. Em 2.2.1 expõe-se a situação específica da iluminação. Em 2.2.1.1 esclarece-se alguns conceitos e unidades que caracterizam a iluminação, para que os capítulos subsequentes possam ser percebidos por pessoas de qualquer área disciplinar, podendo ser ignorados por pessoas com esta base de conhecimento. Em 2.2.1.2 e 2.2.1.3 expõem-se os métodos de cálculos da iluminância natural e artificial, respetivamente.

O subcapítulo 2.3 expõe a importância dos comportamentos que têm influência direta ou indireta sobre a variação das condições do ambiente interno e, por consequência, sobre o consumo energético. No mesmo subcapítulo apresentam-se alguns modelos que tentam antecipar esses comportamentos para que em conjunto com o subcapítulo 2.4, onde se referem os principais modelos de conforto térmico existentes, se torne possível a criação dum algoritmo de gestão automatizada e uma análise capaz de avaliar os seus benefícios.

2.1 MODELOS DE CONTROLO INTELIGENTE EM EDIFÍCIOS (DOMÓTICA)

O interesse em reduzir o consumo energético tem-se intensificado nos últimos anos e, impulsionado pelo avanço tecnológico, ao longo deste tempo já foram desenvolvidos vários modelos de controlo automático de vários sistemas elétricos.

Em 2014, Machado [8] desenvolveu uma metodologia capaz de fazer a gestão da procura energética dos sistemas de AVAC do laboratório de energia do campus IST no Taguspark. Este modelo ajustava o consumo de energia ao conforto dos utilizadores, à quantidade de energia produzida por fontes renováveis na proximidade do pavilhão e aos preços da eletricidade para diferentes períodos do dia [8].

Um ano mais tarde, em 2015, Salvador [9] elaborou um modelo mais especializado na determinação da iluminância¹ no plano de trabalho. Segundo [9], são possíveis poupanças energéticas relativas a consumos de iluminação de 53% a 75% com modelos inteligentes de gestão de luminárias, consoante seja menor ou maior a transmissividade das janelas.

¹Quantidade de luz que incide sobre uma superfície

Marchiori et al. [10] desenvolveu um sistema de gestão energética de edifícios com recurso a sensores e atuadores. Os controladores leem e processam os dados fornecidos pelos sensores e de forma autónoma desligam aparelhos quando são desnecessários, com base num algoritmo de decisão que o mesmo autor desenvolveu. Apesar da sua eficiência, este algoritmo apresenta uma grande limitação, uma vez que só se aplica em situações em que a sala se encontre desocupada. Com o protótipo desenvolvido foram possíveis poupanças de 7,1% a 14,6% [10].

Em 2016, Leal [11] analisou diversas estratégias de controlo automático de estores venezianos, tendo também estudado estratégias estáticas. Cada uma destas estratégias foi simulada para diferentes condições, como: orientações da fachada (Sul, Este, Oeste e Norte), posições dos estores em relação à janela (estores interiores e exteriores), períodos do ano (verão e inverno), tipos de estores (venezianos simples e de dupla orientação) e condições climáticas (quatro países europeus) [11].

Embora já existam vários modelos de controlo de iluminação elétrica e de gestão de estores, Eric et al. [12] considera necessário um esforço para que estes modelos não operem de forma independente. Segundo [12] é importante o uso de um sistema de controlo integrado — que partilhe informação como o estado do ar condicionado e do nível de ocupação — para maximizar a eficiência energética e o conforto do ocupante. Para fundamentar este estudo e para providenciar comparações quantificáveis entre as estratégias (manuais, independentes e integradas) propostas pelos autores, foi necessário desenvolver uma plataforma de simulação, que utiliza: *Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB)*, *EnergyPlus* e *Matlab*.

Os resultados do estudo [12] foram apresentados para 3 zonas climáticas (Baltimore, Londres, Abu-Dhabi), dois tipos de estores (interiores e exteriores) e diferentes áreas de janela. Na maioria dos casos o controlo integrado é mais eficaz do que as restantes estratégias.

2.2 SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES INTERIORES

Para ser possível otimizar os consumos numa sala, uma das opções é a implementação de controlo preditivo baseado em modelos de simulação numéricos. Para a implementação desta estratégia, é necessário que o algoritmo de controlo seja capaz de antecipar os efeitos das suas opções na evolução das propriedades do meio, como a temperatura dum espaço interior, através de um modelo que preveja a evolução dessas propriedades com algum rigor.

Uma das principais ferramentas de simulação existentes atualmente, é o software *EnergyPlus*². Este é um programa computacional de simulação térmica de edificações de utilização livre. Foi desenvolvido com a intenção de executar cálculos de cargas térmicas, necessários para apoiar na decisão de projeto e escolha de equipamentos eletrónicos, como ares condicionados e fontes de calor, e de realizar análises energéticas que estimassem os consumos e os custos associados. O *EnergyPlus* foi criado

² O ANEXO C apresenta algumas noções básicas sobre este programa.

pelo Departamento de Energia dos EUA e é desenvolvido num trabalho conjunto entre vários laboratórios americanos, instituições académicas e empresas privadas [13].

A eficácia das estratégias de controlo depende principalmente de quão bem o modelo de simulação foi desenvolvido e calibrado. Por isso, é crucial ter modelos precisos para ajustar os controladores e simular seu desempenho [14].

Apesar do rigor existente em certos modelos, ainda se procura desenvolver modelos simplificados adaptados a cada caso quando se pretende implementar algoritmos simples de controlo em pequenos controladores sem capacidade de processamento. Modelos simplificados de estimação de temperatura e iluminação foram desenvolvidos por [8] e [9], respetivamente.

2.2.1 ILUMINAÇÃO

A iluminação é um fator importante no nosso conforto e produtividade e tem um papel importante no consumo de energia.

Os sistemas de iluminação são responsáveis por cerca de 30% do consumo energético total dum edifício de serviços [14]. O aumento da eficiência destes sistemas é determinante para a redução do consumo energético.

2.2.1.1 LUZ. CONCEITOS E UNIDADES

Segundo Maxwell, a luz é energia sobre a forma de radiação e propaga-se através de ondas eletromagnéticas. Esta é emitida por um corpo em todas as direções [15].

Existem ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda³ muito distintos, mas a luz visível representa uma pequena parte do espectro eletromagnético. A Figura 4 representa a radiação da luz visível com comprimentos de onda compreendidos no intervalo de 380 a 740 nm⁴. Este intervalo combina toda a radiação do espectro eletromagnético que consegue ser captada pelo olho humano [15].

A luz branca emitida pelo sol ou por uma lâmpada incandescente é uma mistura de todos os comprimentos de onda no intervalo do espectro referente à luz visível [15].

O **fluxo luminoso** quantifica a energia luminosa emitida por unidade de tempo, por uma fonte de luz. A unidade de medida do fluxo luminoso é o lúmen (lm)⁵ [16].

³ Comprimento de onda é a distância entre dois picos (ou cristas) da onda consecutivos.

⁴ 1 nm = 10⁻⁹ m

⁵ A unidade no sistema internacional é Watts (W).

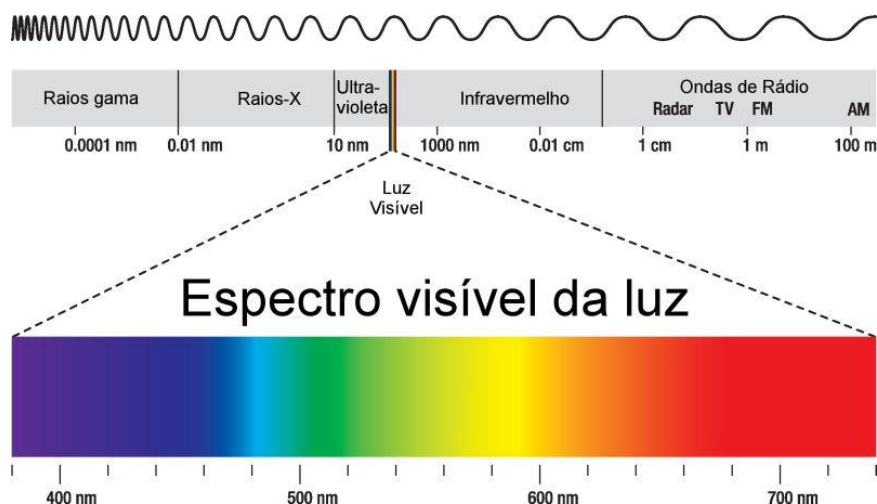


Figura 4. Espectro Eletromagnético com destaque à luz visível (retirada de www.infoescola.com)

A **intensidade luminosa**, I , é uma grandeza vectorial e quantifica a energia luminosa emitida por uma fonte luminosa numa direção específica, por unidade de **ângulo sólido**⁶, Ω . A unidade de medida da intensidade luminosa é a candela (cd)⁷ [15].

A **iluminância** é a quantidade luz ou fluxo luminoso que incide sobre uma unidade de área de superfície. A unidade da iluminância é lm/m^2 (lúmens por unidade de área) ou lux. Num dia típico de verão, com céu limpo, a iluminância atinge valores de 100 000 lux ao meio dia solar. Em dias muito nublados, o valor da iluminância reduz-se para 5 000 lux. E em noites de lua cheia, com céu limpo, os valores da iluminância são da ordem dos 0,25 lux [15].

Os níveis recomendados de iluminância no plano de trabalho, consoante o tipo de tarefa a ser operacionalizada são definidos pela norma europeia EN 12464-1 [17], que indica os valores padrão para ambientes de trabalho interiores. Na Tabela 1 e na Tabela 2, são indicados alguns destes valores para actividades a serem desempenhadas em escritórios e em instituições de ensino, respetivamente.

Em projetos de controlo de iluminação, estes valores devem ser assegurados para não comprometer as necessidades visuais.

Estas recomendações dizem respeito aos níveis que devem existir no plano de trabalho. Os planos de trabalho podem depender da actividade e em ambientes escolares ou escritórios o plano de maior interesse é ao nível das secretárias, o qual se admite ser em geral a 0,75 m do chão.

Através da utilização de um luxímetro é possível a medição da iluminância. No entanto, em alternativa a estes aparelhos podem ser utilizados modelos teóricos que permitem o cálculo destas grandezas.

⁶ Ângulo tridimensional, análogo a um cone para pequenos ângulos. Um ângulo sólido relaciona-se com a área da superfície esférica com o centro no mesmo ponto, da mesma forma que um ângulo num espaço bidimensional se relaciona com o arco da circunferência com centro no mesmo ponto. A unidade de medida deste ângulo é o esterradiano(st). Para um esterradiano, a área da superfície esférica envolvida iguala o quadrado do raio da própria esfera. (2π radianos está para 2π como 4π esterradianos estão para 4π).

⁷ cd = lm/sr

Tabela 1. Níveis de iluminância recomendados pela norma EN12464-1 para escritórios [17]

Tarefas	[lux]
Fotocópias	300
Escrita e Leitura	500
Digitação e processamento de dados num PC	500
Desenho Técnico	750
Espaços	[lux]
Estações de trabalho em CAD	500
Conferências e mesas de Reuniões	500
Secretárias da recepção	300
Arquivos	200

Tabela 2. Níveis de iluminância recomendados pela norma EN12464 para instituições de ensino [17]

Espaços	[lux]
Salas de aula	300
Salas para aulas noturnas e alunos séniores	500
Anfiteatros	500
Quadros de parede negro e verde e quadro branco	500
Salas de Artes em escolas de arte	750
Laboratórios	500
Salas de Desenho Técnico	750
Salas de Música	300
Sala de Computadores	300
Corredores	100
Escadas	150
Salas de convívio	200
Sala de Professores	300
Bibliotecas: estantes	200
Bibliotecas: áreas de leitura	500
Refeitórios	200
Cozinhas	500

2.2.1.2 LUZ NATURAL

Durante os últimos séculos, tem-se procurado criar uma alternativa à luz natural (primeiro com candeeiros a óleo e mais tarde com candeeiros elétricos). Porém, com o avanço tecnológico, a dependência da sociedade sobre estas alternativas tecnológicas, que quebraram uma limitação horária

imposta pela natureza, tem crescido bastante. Por isso, hoje em dia, passou a ser importante a gestão do uso destes sistemas de iluminação artificial para colmatar o uso acentuado e despreocupado dos mesmos. Não só por uma questão económica e de poupança de energia, mas também porque a iluminação com proveniência solar responde de forma mais adequada às necessidades do olho humano do que as fontes artificiais criadas. A luz natural permite: melhores condições de conforto visual na realização de tarefas — quando comparada com a luz artificial para os mesmos níveis de iluminância — e uma restituição real das cores dos objetos [18].

Segundo Goswami et al. [18], a radiação solar consegue disponibilizar 110 lm/W de fluxo luminoso, enquanto as lâmpadas fluorescentes disponibilizam um fluxo luminoso de 75 lm/W de potência elétrica consumida e as lâmpadas incandescentes apenas 20 lm/W. A luz natural gera apenas 1/2 a 1/5 da energia calorífica que a mesma quantidade de luz artificial. Por essa razão, um maior aproveitamento da energia solar permitirá uma redução significativa da carga de arrefecimento necessária nos meses quentes.

Vários investigadores têm tentado desenvolver modelos capazes de calcular a iluminação natural em ambientes internos. Os métodos existentes podem ser divididos em métodos simplificados, métodos de simulação numérica e, finalmente, métodos experimentais [19].

Os métodos simplificados são de grande interesse, uma vez que são fáceis de usar e não requerem muitos dados. Contudo, embora sejam muito utilizados, apresentam elevadas limitações por serem aplicáveis a condições muito restritas. Destes métodos fazem parte: o método de Lúmen e o método “*split flux system*” [9]. O primeiro modelo pode ser aplicado sobre diversas condições atmosféricas, ao contrário do segundo que só pode ser usado em céus encobertos.

O método de Lúmen é capaz de prever a iluminância no interior duma sala em boa aproximação. No entanto, a precisão dos resultados depende do conhecimento dos valores reais de iluminância vertical no exterior — uma informação que em geral não está disponível. Outra desvantagem deste modelo reside no fato de não ter em conta os efeitos da obstrução exterior — árvores, prédios e estores. Além disto, este modelo assume várias hipóteses simplificativas em termos de geometria⁸ e de dimensões do espaço interior que limitam a sua aplicabilidade [20]. Apesar disso, o método de Lúmen é largamente utilizado e é recomendado pela sociedade de engenharia da iluminação da América do Norte [20].

Conhecer a distribuição da iluminância natural num determinado espaço é essencial para interpretar os resultados dos modelos de cálculo disponíveis, que apresentam os resultados em pontos discretos. As distribuições mais comuns são apresentadas na Figura 5.

⁸ Assume-se que a janela se estende dum lado ao outro da sala. Na direção vertical, é considerado que a janela se posiciona a 0.9m do chão e se estende até ao teto.

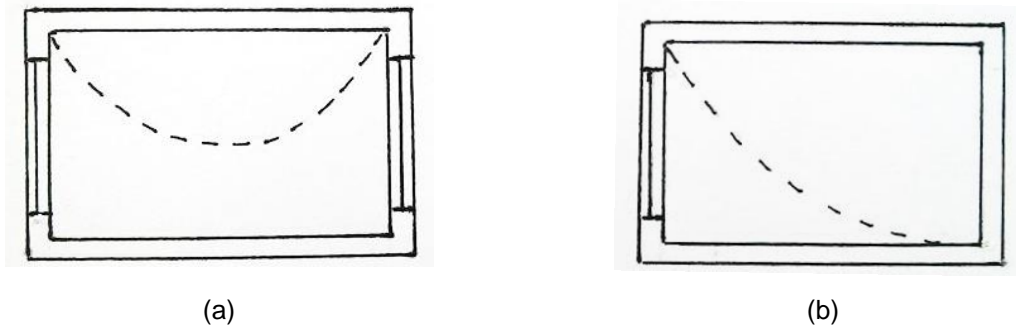


Figura 5. Distribuição da componente natural da iluminância (linha a tracejado) em salas com janelas dispostas lateralmente. No caso (a) em ambos os lados e no caso (b) apenas dum lado [18].

2.2.1.3 LUZ ARTIFICIAL

Com a consciencialização da população sobre a importância da redução dos consumos energéticos, tem surgido uma preocupação cada vez maior de minimizar o uso dos sistemas de iluminação ao mínimo necessário. Em consequência disso, a importância da simulação luminotécnica tem crescido significativamente.

Um projeto luminotécnico tem como principal objetivo identificar a melhor estratégia para alcançar um sistema de iluminação mais eficiente. As metodologias de cálculo mais utilizadas em projeto deste tipo são: o **método de Lúmen**, o **método das cavidades** e o **método ponto a ponto**. Os métodos não são todos os iguais e os resultados não são, na maior parte das vezes, comparáveis. O método das cavidades permite calcular a iluminância média num compartimento, enquanto, o método ponto a ponto, por outro lado, permite calcular a iluminância num ponto do espaço específico, por influência de uma ou várias luminárias [9].

É possível a utilização do método ponto a ponto se forem conhecidas: a intensidade luminosa da luminária, a posição do ponto relativamente à luminária e a orientação da superfície onde este se encontra. A intensidade luminosa pode ser consultada através de diagramas luminotécnicos — como o representado na Figura 6 — que representam a distribuição espacial da intensidade luminosa, apresentada em coordenadas polares, de uma lâmpada refletora ou de uma luminária.

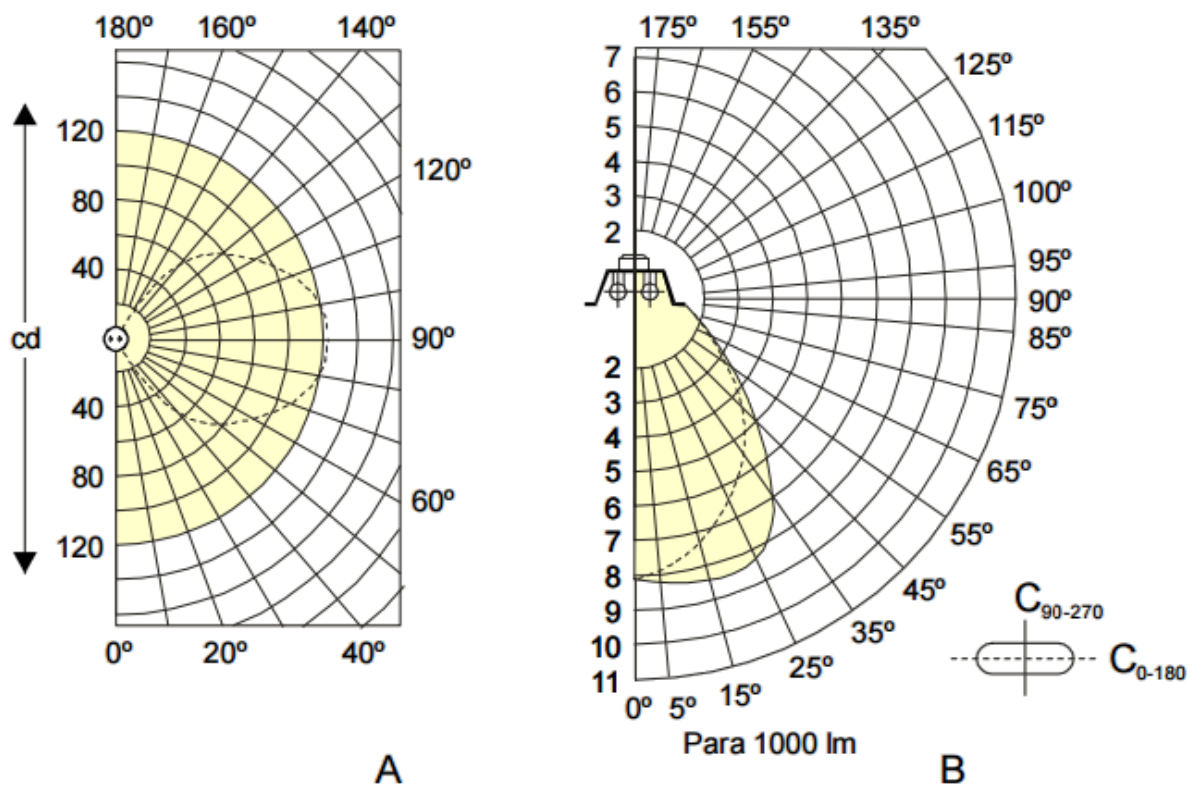


Figura 6. Curva de intensidade luminosa (cd) no plano transversal e longitudinal para uma lâmpada fluorescente isolada (A) e associada a um refletor (B). (retirada do manual luminotécnico OSRAM)

Alternativamente, podem ser utilizados softwares comerciais capazes de quantificar a iluminação de forma similar. Entre os mais usados a nível mundial constam o DIALux e o RELUX. Estas ferramentas permitem fazer simulações luminotécnicas com elevado grau de exatidão. Contudo, isto não seria possível se os dados fotométricos, característicos de cada luminária, não fossem disponibilizados pelos próprios fornecedores dentro de certas normas.

Com o aparecimento destes softwares de cálculo de iluminação, surgiu a necessidade de criação de normas para os ficheiros fotométricos disponibilizados pelas diferentes marcas, para que desta forma pudesse existir compatibilidade entres estes dados e os softwares existentes.

O primeiro modelo de padronização dos dados fotométricos de fontes de luz artificial — conhecido pela denominação IES — surgiu em 1986 e foi definido pela Sociedade Norte Americana de Engenharia da Iluminação (ESNA). Esse modelo representou um avanço significativo no sentido da portabilidade de arquivos entre fabricantes e softwares. Antes disso, na generalidade dos casos, só era possível fazer os cálculos luminotécnicos de forma manual. Poucos eram os fabricantes com softwares próprios [21].

Recentemente, foi criado uma norma europeia EN 13032-1 pelo Comité de Normalização Europeu (CEN), porém o padrão mais difundido pela europa ainda é o EULUMDAT, criado em 1990 por Axel Stockmar, analista da LCI Light Consult Inc. [21].

2.3 COMPORTAMENTOS DOS UTILIZADORES FACE AOS SISTEMAS ELÉTRICOS E SEUS CONSUMOS

Novas estratégias de gestão de energia em edifícios devem ser adaptadas aos comportamentos dos utilizadores do espaço, mais concretamente, ações e decisões tomadas pelos ocupantes que têm impacto sobre o consumo energético do edifício. Isto inclui ações realizadas pelo utilizador sobre sistemas como portas, janelas e candeeiros, mas também ações sobre ele próprio, como a mudança de roupa, localização ou horário. Consecutivamente, a otimização energética dum edifício combinada com a melhoria do conforto neste espaço torna-se num problema de extrema complexidade que requer apoio computacional, conhecimento das condições reais e das relações causa-efeito dos comportamentos dos utilizadores sobre os sistemas elétricos.

Embora a compreensão destes comportamentos seja muito complexa, já é possível modelá-los através de diversos fatores, quer individuais quer contextuais [8].

Pela sua natureza, estes comportamentos são predominantemente estudados pelas áreas da psicologia e da sociologia, mas devido ao seu interesse para as áreas de engenharia e economia, também são amplamente estudados por estas disciplinas.

As descobertas de maior importância feitas no domínio da psicologia sobre estes comportamentos foram publicadas por Steg e Vlek [22]. Para estes investigadores, os hábitos e os fatores contextuais e motivacionais têm a maior importância sobre o comportamento ambiental [23].

O comportamento humano é em grande medida fruto dos hábitos e guiado por processos cognitivos automáticos, em vez de resultado de processos inteiramente racionais [23]. Nos modelos económicos, ignora-se esta condição e assume-se que os indivíduos apenas reagem de forma racional [22].

Segundo [23], os hábitos são processos automáticos que tendem a ser repetidos quando os seus efeitos são manifestamente satisfatórios. Porém, muitas vezes envolvem leituras erradas das condições e atenções acrescidas sobre os fatores que motivam esse comportamento [23].

A mudança de certos comportamentos pode representar poupanças tão grandes ou superiores às poupanças que podemos alcançar através do aumento da eficiência dos sistemas. Porém, como são difíceis de contabilizar, são normalmente desprezadas. A complexidade deste fator, que tem um papel determinante na promoção da eficiência energética, criou um desafio de investigação que deve ser ultrapassado de forma a que comportamentos mais sustentáveis possam ser valorizados e integrados no contexto das novas medidas de gestão energética.

Atualmente, existem diversos modelos comportamentais construídos com o interesse de prever as reações dos indivíduos consoante as condições ambientais. Estes modelos permitem não só fazer a gestão energética da forma mais inteligente, sem pôr em causa o conforto dos ocupantes, como permitem conhecer um padrão de comportamentos que podem estar a desencadear um gasto desnecessário de energia.

Os modelos existentes foram desenvolvidos com base em três abordagens diferentes [22]:

- **Qualitativa**, fruto das ciências sociais que tentam interpretar comportamentos (*“Energy Behaviour Frameworks”*)
- **Quantitativa**, com influências da engenharia e da economia. Quantifica o consumo energético. (*“Energy Models”*)
- **Qualitativa e quantitativa** (*“Energy Behaviour Modelling”*)

Os **modelos quantitativos** são usados para apoiar nas decisões de controlo automatizado, uma vez permitem simular o uso dos sistemas e quantificar o consumo energético de um edifício. Estes modelos são divididos em modelos **top-down** e **bottom-up**. Uma abordagem **top-down** determina a tendência de consumo a longo prazo, com base no histórico de consumo, para análises macroeconómicas. Estes modelos permitem estimar o consumo de todo o setor, mas não distinguem consumos individuais. Os modelos **bottom-up** funcionam de forma inversa. Através de métodos extrapolativos, tiram conclusões à cerca do consumo de um sistema com base em consumos individuais duma amostra edifícios e no seu peso representativo [22].

Os modelos estatísticos e de engenharia incluem-se nesta classificação de bottom-up. Estes modelos permitem o cálculo do consumo de energia final para finalidades específicas [22].

A engenharia tem desenvolvido vários modelos micro-escala nos últimos anos. Uns procuram analisar a influência do comportamento humano sobre o desempenho energético do edifício e outros procuram traçar um perfil de uso energético dos utilizadores. A maioria destes modelos pré-assume os comportamentos propriamente ditos com base em análises estatísticas já desenvolvidas, embora alguns validem os resultados dessas estatísticas comparando com o caso real a que se aplicam [22].

2.3.1 CONTROLOS DISPONÍVEIS E PERFIS DE UTILIZAÇÃO

Normalmente, em edifícios naturalmente ventilados, os ocupantes têm controlo sobre as portas, janelas, estores e cortinas, ventiladores, aquecimento central, aquecimentos elétricos ou a gás e bombas de calor [24].

Os perfis de utilização variam muito de utilizador para utilizador, mas é possível encontrar padrões de utilização duma população consoante o seu contexto social ou consoante outros aspetos que lhes sejam comuns (como cultura ou clima). Embora estes padrões possam ser pouco coerentes com os comportamentos dum único utilizador, a coerência entre estes padrões e os comportamentos num espaço partilhado deverá ser cada vez maior quanto maior a população de ocupantes.

Atualmente, já existem bases de dados a partir das quais pode ser estimado o uso dos elementos acima referidos. As principais são resultado de estudos de campo realizadas em cinco países europeus, entre os quais está Portugal [25].

Neste capítulo, irão ser abordados alguns dos estudos feitos até hoje nesta temática, de natureza essencialmente estatística como seria de esperar.

2.3.1.1 ESTORES

A principal função dos estores e cortinas é barrar a entrada da radiação solar direta em edifícios localizados em climas quentes, sendo usados para a redução de encadeamento com origem na radiação solar [24].

Estes elementos, por afetarem a radiação que entra através das janelas, têm uma influência direta sobre a iluminação do espaço. Neste contexto, Reinhart estudou o controlo paralelo dos estores e da iluminação com origem artificial e criou um algoritmo com o intuito de prever o controlo humano dos sistemas de iluminação elétricos e estores, baseando-se num já existente — Light Switch Model, criado por Newsham [26].

Um modelo estatístico para o uso dos estores, construído com base em inquéritos, foi proposto por Nicol em [25]. A equação (2.1) representa a probabilidade de abertura⁹ dos estores (P_{estores}) em função da temperatura exterior (T_{out}).

$$P_{\text{estores}} = \frac{e^{((-0.3 \pm 0.12) + (0.005 \pm 0.008)T_{\text{out}})}}{(1 + e^{((-0.3 \pm 0.12) + (0.005 \pm 0.008)T_{\text{out}})})} \quad (2.1)$$

2.3.1.2 JANELAS

Vários estudos têm sido feitos com o intuito de identificar relações entre as atividades diárias dos ocupantes e o controlo das janelas. A influência das condições exteriores sobre os comportamentos de abertura e fecho das janelas também foi estudada.

Segundo [27], o controlo das janelas está relacionado indiscutivelmente com as atividades que fazem parte da rotina diária do utilizador nesse espaço fechado. Em ambientes residenciais, as atividades de culinária e de limpeza são apontadas como as principais razões para a abertura das janelas em 27% e 40% das vezes, respetivamente. Em espaços sem ar-condicionado, os ocupantes abrem as janelas, principalmente, por dois motivos: para melhorar a qualidade do ar e para obter um arrefecimento provocado pela descida da temperatura e pelo escoamento de ar [27].

Dependendo da temperatura exterior, a frequência de abertura diária das janelas pode variar entre 0,5 e 1,8 vezes/dia e o número de horas em que permanecem abertas pode variar entre 0,4h/dia e 6h/dia (média =1,8h/dia). O fecho das janelas está associado à queda da temperatura no interior depois de a janela ter sido aberta [27].

Jeong et al [27], consideram que a abertura das janelas em dias quentes não é justificada para refrescar um espaço. Por isso, ignoram essa ação por parte dos utilizadores.

⁹ Por os dados disponíveis serem, essencialmente, de natureza binária esta probabilidade nada diz à cerca do modo como estão fechados os estores.

Estudos feitos por Park e Kim [28] indicam que a ventilação natural por abertura de janelas ainda é o método predominantemente usado pelos utilizadores para controlar o ambiente interior.

O uso das janelas varia de pessoa para pessoa e varia conforme a sua proximidade da janela, como comprovado em [24]. Como é de esperar, uma pessoa mais próxima da janela detém um maior controlo sobre ela. Brager et al. [29] mostraram que há uma diferença de 1,5 °C na temperatura neutra¹⁰ para duas pessoas com diferentes oportunidades de controlo da janela. O que confirma as suspeitas de Paciuk [30] relativamente à dependência entre a satisfação e a possibilidade do controlo.

Os argumentos de maior importância para abertura e fecho de janelas parecem ser a temperatura interna, a temperatura externa e a variação da temperatura no ambiente interno decorrente desta ação. No entanto, Jeong [27] definiu a temperatura interna como o fator que maior influência tem sobre a ação de fechar as janelas, com base num estudo que fez. Ele acredita que o ato de fechar a janela é um comportamento que se toma para anular um estímulo de desconforto no ambiente interno [27].

Os resultados dos estudos mais recentemente realizados em vários países europeus foram comparados por Jeong et al. [27] e representados na Figura 7. Nesta figura, o que é analisado é a proporção de janelas abertas em função da temperatura exterior¹¹.

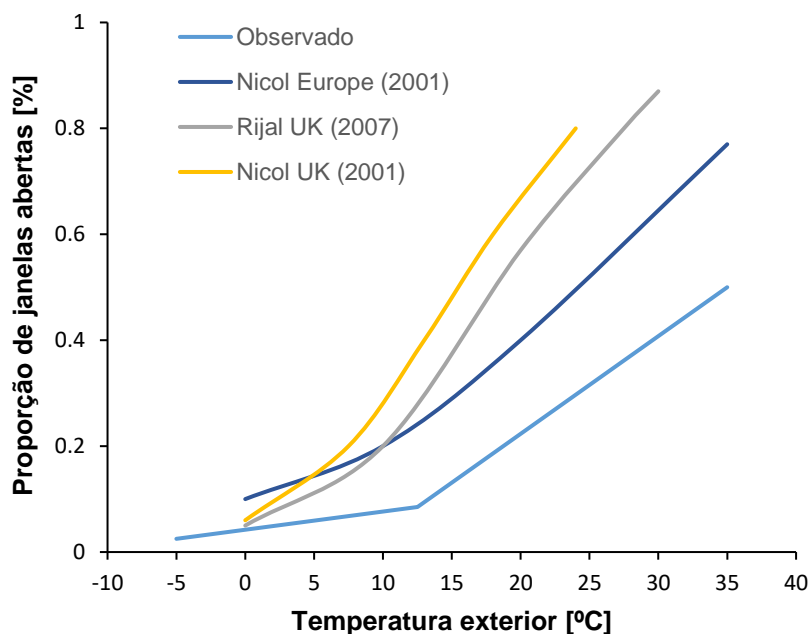


Figura 7. Proporção de janelas abertas em escritórios em função da temperatura exterior [27]

¹⁰ Representa uma temperatura de referência para o conforto térmico. A esta temperatura há um equilíbrio entre o calor perdido pelo corpo e aquele que produz.

¹¹ Foi com base na temperatura exterior que se fez a maior parte dos estudos porque se trata de uma variável de input na maioria dos programas e modelos existentes, e consideramo-la independente. Pelo contrário, a temperatura interior é vista como um resultado da primeira, daí não ser usada como referência.

2.3.1.3 NÍVEIS DE ISOLAMENTO CORPORAL

É possível que cada indivíduo altere a sua sensação térmica sem, no entanto, alterar as condições do ambiente em que está inserido. Isto é possível através de processos adaptativos que serão explicados com maior detalhe no subcapítulo 2.4, onde estão incluídas, por exemplo, as mudanças de vestuário. Um comportamento deste tipo terá efeito apenas sobre o próprio indivíduo e não sobre todas as pessoas que partilham o espaço. Por esta razão, e por ser a forma mais fácil de controlo por parte dos utilizadores dum espaço é, também, a mais largamente utilizada.

Embora a mudança de vestuário provoque uma variação acentuada do isolamento térmico entre diferentes estações do ano, as variações existentes numa mesma estação não são significativas e não têm interesse estatístico [31]. Contudo, tem interesse notar que estas variações, em resultado da adaptação dos ocupantes, são maiores em edifícios naturalmente ventilados do que em edifícios com sistemas AVAC, como representado na Figura 8 [31].

Nos resultados da Figura 8 foi tido em conta o isolamento adicional promovido pelas cadeiras, nas quais estavam sentados os sujeitos no momento do inquérito. A quantificação do isolamento em unidades **clo** foi feita com base na norma ASHRAE 55 [31], que será abordada mais à frente no subcapítulo 2.4.

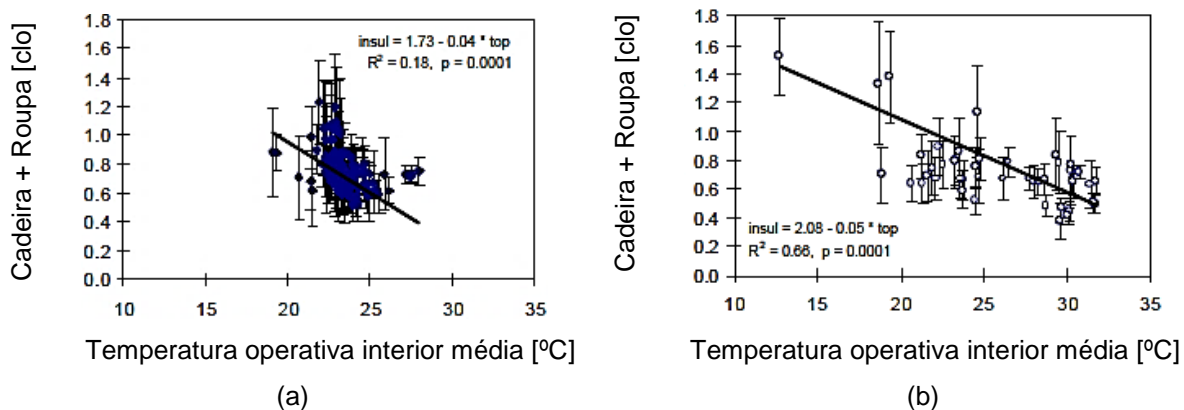


Figura 8. Nível de isolamento em função da temperatura operativa interior média para (a) edifícios com sistemas AVAC e (b) naturalmente ventilados [31]

2.3.2 COMPORTAMENTOS QUE REDUZEM O CONSUMO ENERGÉTICO

A promoção de comportamentos mais sustentáveis é um passo importante na redução do consumo de energia, uma vez que o potencial de poupança energética em resultado da adoção de novos comportamentos pode chegar aos 20% a nível europeu [32].

É possível categorizar de diversas formas os planos existentes que têm como propósito mudar consciências e comportamentos [22]. Uma classificação possível divide estes planos em **estratégias de antecedência e de consequência** [22].

Enquanto as intervenções de antecedência são desenvolvidas para alterar os fatores que precedem os comportamentos, as estratégias de consequência procuram alterar o resultado dos comportamentos.

As intervenções por antecedência incluem [22]:

- compromissos (promessas para mudar comportamentos, normalmente ligados a objetivos quantificáveis);
- estabelecimento de objetivos (metas quantificáveis);
- informações (serve para aumentar a consciencialização nesta temática), através de workshops e de campanhas em massa nos media;
- modelos (que forneçam exemplos de comportamentos recomendáveis).

As intervenções por consequência podem incluir [22]:

- *feedback* (fornecendo informação sobre os consumos energéticos);
- recompensas (principalmente monetárias).

Estas últimas estratégias assumem que os comportamentos mais eficientes energeticamente tornam-se mais atrativos quando consequências positivas lhes estão associadas.

Na Tabela 3 indicamos algumas medidas tidas como de maior interesse para a redução dos consumos com a climatização, presentes em [33]

Tabela 3. Dicas de eficiência energética na climatização.

	Inverno	Verão	Primavera
Janela		Permitir a ventilação natural durante a noite, através da abertura de janelas em pontos opostos da casa	Abrir a janela em vez de ligar o ar-condicionado sempre que for possível
Porta	Fechar sempre as portas quando ligar a climatização	Permitir a ventilação natural durante a noite, abrindo as portas.	
Estores/Cortinas	Abrir os estores e as cortinas para maximizar a entrada de radiação solar durante o dia. Fechar as cortinas e as persianas durante a noite.	Fechar os estores de forma a impedir a entrada de radiação direta durante o dia	
Ar-condicionado	Desligar a climatização em zonas da casa que estejam desocupadas. Abrir a janela em vez de ligar o ar-condicionado sempre que for possível. Fechar sempre as portas quando ligar a climatização		

2.4 CONFORTO TÉRMICO

A satisfação com meio ambiente num espaço de trabalho é importante porque influencia positivamente a produtividade e saúde dos seus ocupantes [34].

A atividade metabólica de cada ser vivo resulta na produção de calor que faz aumentar a temperatura interna se não for dissipado. Quando o corpo está em equilíbrio com a envolvente, perdendo tanto calor quanto o que produz, é sentida uma sensação térmica neutra [34].

Segundo a norma ASHRAE 55 [35], o conforto térmico pode ser definido como “uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Com base nesta definição, a noção de conforto pode ser entendida como um processo cognitivo com influências físicas, fisiológicas, psíquicas e outras [35].

Os principais fatores que influenciam as trocas de calor entre o corpo e a envolvente, e, conseqüentemente, o conforto térmico, são: a temperatura, a humidade relativa do meio, a velocidade do ar e os parâmetros individuais como o metabolismo e o isolamento providenciado por certo tipo de

vestuário. Embora estes fatores representem as maiores influências, existem outras e vários estudos têm sido feitos para estudar a sua importância, sendo a adaptação um desses fatores [35].

O fator adaptação tem uma influência que nem sempre é contabilizada, mas deve ser reconhecida. As pessoas têm a capacidade de se adaptar a certas condições, e mudanças bruscas podem causar sensações de desconforto, mesmo para condições que sejam confortáveis em circunstâncias estacionárias [35]. Além do vestuário, outras formas de adaptação associadas à postura corporal e à redução da atividade, igualmente difíceis de quantificar, podem resultar em maiores tolerâncias. Pessoas habituadas a trabalhar e viver em ambientes quentes conseguem suportar melhor e manter uma maior performance de trabalho sob temperaturas elevadas do que pessoas que vivam em climas frios [36].

Surpreendentemente, embora as condições climáticas, as condições de vida e as culturas difiram muito em todo o mundo, a temperatura que as pessoas escolhem como confortável quando usam o mesmo tipo de vestuário, sob o mesmo nível de atividade e condições de humidade e deslocamento de ar, é em geral muito similar [37]. Esta conclusão, tirada com base num estudo estatístico que integra uma extensa investigação que procura desenvolver um modelo de satisfação térmica, veio mostrar a universalidade dos modelos até agora desenvolvidos. Estes modelos permitem tirar o melhor partido da climatização na criação de ambientes em equilíbrio entre as diferentes preferências de cada ocupante dum espaço.

Existem duas abordagens diferentes para quantificar o conforto térmico dos ocupantes. Uma primeira abordagem considera que a resposta das pessoas em relação ao ambiente tem por base a física e o equilíbrio das transferências de calor entre o meio e a pessoa. Os índices de conforto térmico obtidos com estes modelos são baseados em respostas dadas por uma amostra duma população específica inquirida quando exposta a ambientes em diversas condições invariáveis [38] e por essa razão denominam-se **modelos estacionários**. Estes modelos assumem que estes índices expressam a resposta das pessoas em condições variáveis do dia-a-dia [38], ignorando o fator adaptação.

A segunda abordagem consiste na aplicação do princípio adaptativo: “se uma alteração ocorre de tal forma que provoque desconforto, as pessoas reagem de formas que tendem a restabelecer o seu conforto” [38]. Os modelos assim elaborados denominam-se **adaptativos**. Ao contrário dos estacionários, estes modelos atribuem um papel ativo aos ocupantes dum espaço [8].

É impossível especificar um ambiente térmico capaz de satisfazer toda uma população devido a diferenças individuais. Irá existir sempre uma percentagem de ocupantes insatisfeitos. Porém, é possível especificar ambientes com uma previsão de aceitação por uma certa percentagem de ocupantes [36] e existem normas, como a ASHRAE 55 e a ISO 7730¹², que definem os intervalos das condições térmicas com maior aceitação. É esperado que o respeito destas normas permita que a maioria dos ocupantes se encontre confortável termicamente.

¹² Esta norma encontra-se em acordo com a norma ASHRAE 55.

A Figura 9 ilustra as zonas de conforto térmico definidas pela norma ASHRAE 55. A zona de conforto no verão, adaptada para um nível de isolamento da roupa de 0.5 clo, é distinta da zona de conforto no inverno, adaptada para um nível de isolamento da roupa de 0.9 clo [35]. Esta distinção foi fundamental para ter em conta a alteração do tipo de vestuário nestas estações do ano.

A norma ASHRAE 55 utiliza uma abordagem estacionária e, por essa razão, é possível que as pessoas ao entrarem num espaço que respeite esta norma não sintam conforto de imediato se estiverem estado noutros níveis de atividade ou expostos a ambientes com diferentes condições [39].

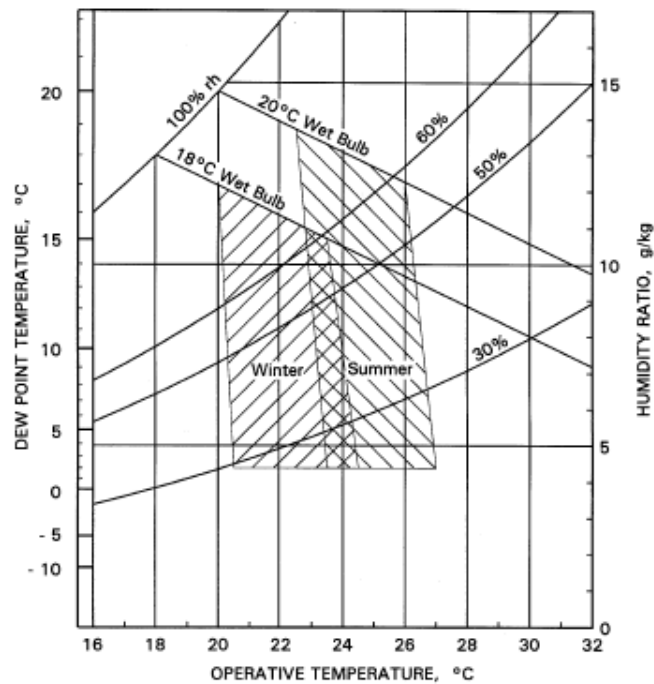


Figura 9. Zonas de Conforto da norma ASHRAE [35]

Estudos feitos por Rohles e Nevins na década de 70 revelaram correlações entre o conforto térmico e parâmetros como a temperatura, a humidade, o sexo e o tempo de exposição em estudantes universitários [35]. A Tabela 4 apresenta algumas destas correlações que determinam a sensação térmica sentida na escala de ASHRAE, representada na Figura 10.

Embora as correlações da Tabela 4 representem uma opção viável, existem soluções numéricas mais rigorosas capazes de prever o conforto e a sensação térmica, como o modelo PMV-PPD e o modelo de dois nós [35].

Tabela 4. Sensação térmica para estudantes Universitários com atividade sedentária [35]

Intervalo de exposição [h]	Gênero	Sensação Térmica ¹³
1	Homem	$Y = 0.220 T + 0.223 p_v - 5.673$
	Mulher	$Y = 0.272 T + 0.248 p_v - 7.245$
	Ambos	$Y = 0.245 T + 0.248 p_v - 6.475$
2	Homem	$Y = 0.221 T + 0.270 p_v - 6.024$
	Mulher	$Y = 0.283 T + 0.210 p_v - 7.694$
	Ambos	$Y = 0.252 T + 0.240 p_v - 6.859$

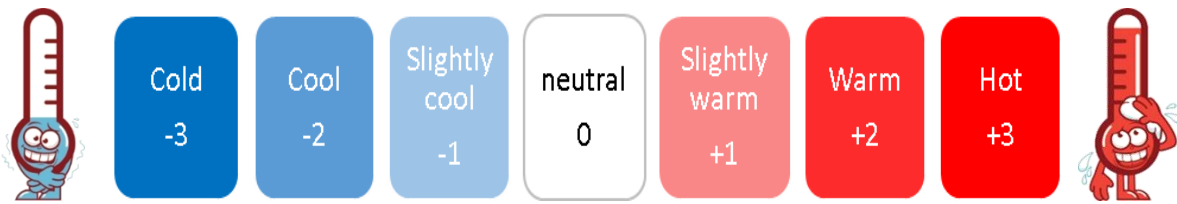


Figura 10. Escala de sensação térmica ASHRAE

O **modelo PMV-PPD** utiliza os índices PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percent Dissatisfied*) para quantificar a sensação térmica média sentida por um grupo de pessoas e a percentagem de insatisfeitos, respetivamente. O índice PMV, denominado média prevista dos votos, foi desenvolvido por Fanger (1970) e determina a média das sensações térmicas (na escala ASHRAE) que se prevê que sejam sentidas por cada uma das pessoas num grupo. Mais tarde, Fanger (1982) relacionou este índice com a percentagem prevista de insatisfeitos (PPD) — percentagem de toda e qualquer pessoa que não vota -1, +1 ou 0 (escala ASHRAE) [35]. A equação (2.2) dita esta relação.

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \quad (2.2)$$

Segundo [26], o modelo PMV representa uma ferramenta adequada para determinar normas de conforto em edifícios com sistemas AVAC. Porém, a referência [31] recomenda o uso de modelos adaptativos em edifícios naturalmente ventilados por considerar que o desprezo dos comportamentos de adaptação dos ocupantes nestes espaços incorre num erro maior do que num edifício com equipamentos AVAC, onde existem menores oportunidades de controlo.

A temperatura preferencial não tem necessariamente de coincidir com a sensação térmica neutra. Em edifícios equipados com sistemas AVAC, as pessoas preferem temperaturas mais baixas que as neutras em climas quentes e superiores às neutras em climas frios [31].

Em espaços naturalmente ventilados e onde o poder de controlo esteja a cargo dos ocupantes, os intervalos de conforto podem ser estendidos em períodos de verão, uma vez que as condições são reguladas pelos ocupantes do espaço através da abertura e fecho de janelas. Estudos de campo

¹³Y refere-se à escala ASHRAE de sensações térmicas; Roupa com uma resistência térmica de aproximadamente 0.5 clo; $T = T_a$ (Temperatura de bolbo seco) $\cong T_r$ (Temperatura Radiativa) [°C], p_v (pressão parcial do vapor de água) [Pa] e velocidade do ar < 0.2 m/s

permitiram mostrar que os ocupantes são capazes de tolerar temperaturas superiores àquelas previstas pelo modelo PMV em edifícios deste tipo [36]. Resultados como este sugerem que os processos de adaptação fisiológicos (acomodação) e psicológicos (expectativa) têm uma imposição muito forte sobre as práticas comportamentais dos utilizadores, nas quais se incluem os ajustamentos de roupa e velocidade do ar (em espaços naturalmente ventilados) [31].

2.4.1 NORMA ASHRAE 55

A norma ASHRAE 55 especifica as condições necessárias para que 80% duma população sedentária ou levemente ativa se encontre confortável termicamente [35].

Uma pessoa que se encontre vestida com um conjunto de peças de roupa que promovam um nível de isolamento igual ao assumido sentirá nas condições perto das fronteiras quente e fria, uma sensação térmica de +0,5 quente e -0,5 na escala de ASHRAE, respetivamente [35].

Embora só tenham sido definidas duas zonas de conforto, outras zonas mais apropriadas para outras indumentárias possíveis são alcançáveis. Estas podem ser aproximadas diminuindo as temperaturas limite em cerca de 0,6 K por cada aumento de 0,1 clo e vice-versa. Da mesma maneira, devemos alterar os limites de temperatura se considerarmos atividades com taxas metabólicas superiores a 1,2 met, diminuindo 1,4 K por cada aumento de 1 met [35].

Esta norma recomenda que a temperatura de orvalho seja mantida sempre acima dos 2°C. Isto limita as humidades muito reduzidas que provocam desconforto pela secura da pele e das mucosas [35].

Concentrações elevadas de vapor de água no ar também não são recomendadas porque humidades elevadas na superfície da pele tendem a provocar desconforto. Em condições de humidade elevada a temperatura não é suficiente para determinar o conforto térmico. Nestas condições, as primeiras sensações de desconforto surgem por motivos de humidade excessiva na pele, que tem como consequência o aumento da fricção entre esta e a roupa [35].

2.4.2 CONDIÇÕES NÃO UNIFORMES

Uma pessoa pode experimentar uma sensação termicamente neutra, mas ainda assim não estar confortável termicamente se partes do seu corpo estiverem expostas a temperaturas extremas ou a grandes amplitudes térmicas. Situações como estas são comuns na proximidade de áreas envidraçadas resfriadas e na presença de correntes de ar [35].

A existência de janelas e de paredes sem exposição solar causa muitas vezes uma assimetria da radiação térmica num espaço. Esta assimetria é definida como a diferença entre a temperatura radiativa do meio em lados opostos da pessoa. Estudos desenvolvidos em ambientes termicamente neutros demonstraram relações entre o conforto e as assimetrias térmicas, como estão representadas na Figura 11.

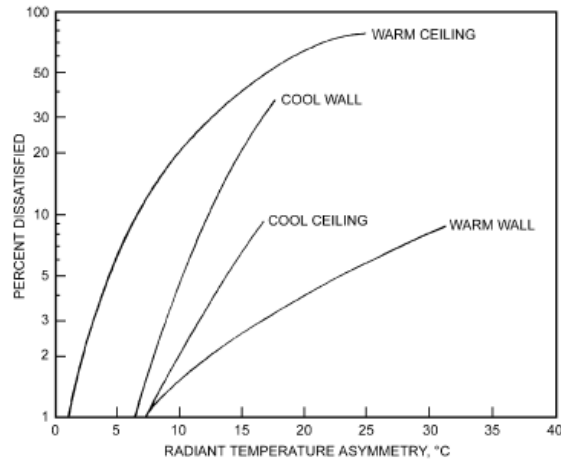


Figura 11. Percentagem de insatisfação em função das assimetrias térmicas

As correntes de ar são responsáveis pelo arrefecimento localizado do corpo. Esta condição provoca um desconforto tanto maior quanto maior a velocidade do ar e menor a temperatura, mas estudos revelaram que a satisfação térmica não é comprometida para velocidades do ar inferiores a 0,25m/s [40].

Além destas condições que podem tornar um local equilibrado termicamente num lugar inóspito existem outras que também afetam o conforto como: a existência de gradientes térmicos verticais no meio e chãos quentes ou frios [35].

3 METODOLOGIA

O trabalho proposto envolve o desenvolvimento de um modelo simplificado — capaz de estimar a temperatura e a iluminância no plano de trabalho dum espaço fechado com exposição solar — e de um algoritmo de controlo automatizado, que conciliados permitam avaliar o efeito do controlo automático sobre o conforto dos ocupantes.

O modelo simplificado deverá simular a evolução das condições interiores sob diversos cenários, em intervalos tão grandes quanto se queira, e permitir um controlo preditivo. Para validar os resultados deste modelo, é desenvolvido um segundo modelo, com as mesmas características, com recurso à ferramenta *EnergyPlus*.

Por fim, são construídos algoritmos para o controlo automático e manual para conjuntamente com o modelo desenvolvido ser possível responder ao problema inicial. O algoritmo de controlo automatizado deve ser capaz de melhorar as condições ambientais numa sala, temperatura e iluminância, e permitir uma redução dos consumos energéticos.

Nos subcapítulos 3.1 e 3.2 irá ser apresentado todo o procedimento e base teórica usados no desenvolvimento do modelo simplificado para estimar a iluminância no plano de trabalho e a temperatura na sala em cada instante, respetivamente.

Nos subcapítulos 3.4.1 e 3.4.2 irão ser apresentadas as medidas de controlo manual — que tentam descrever o perfil normal de utilização — e as estratégias usadas no desenvolvimento do algoritmo de controlo automático, respetivamente.

3.1 MODELO DE ILUMINAÇÃO

O modelo desenvolvido para calcular a iluminância no plano de trabalho tem em conta as componentes natural e artificial. A primeira componente depende da posição do sol e das condições atmosféricas, a segunda depende apenas da posição das luminárias acionadas. Um fluxograma deste modelo é representado na Figura 12.

As duas componentes são independentes uma da outra e, por isso, foi possível utilizar métodos diferentes para as determinar.

Por se tratar de radiação eletromagnética, aplica-se o efeito da sobreposição de ondas em cada ponto para adicionar o efeito de cada componente à iluminância total no plano de trabalho.

Para a componente da luz natural foi usado o **Método de Lúmen**. Escolheu-se este método por ser simples e poder ser usado em qualquer tipo de céu.

O método de Lúmen aplicado a janelas laterais calcula a iluminância horizontal em três pontos interiores contidos, simultaneamente, no plano de trabalho e na linha que divide o comprimento da sala e da

janela em partes iguais, como mostra a Figura 13. Neste modelo está implícito que o plano de trabalho e a janela se encontram a 0,75 m e a 0,90 m acima do chão, respectivamente [18].

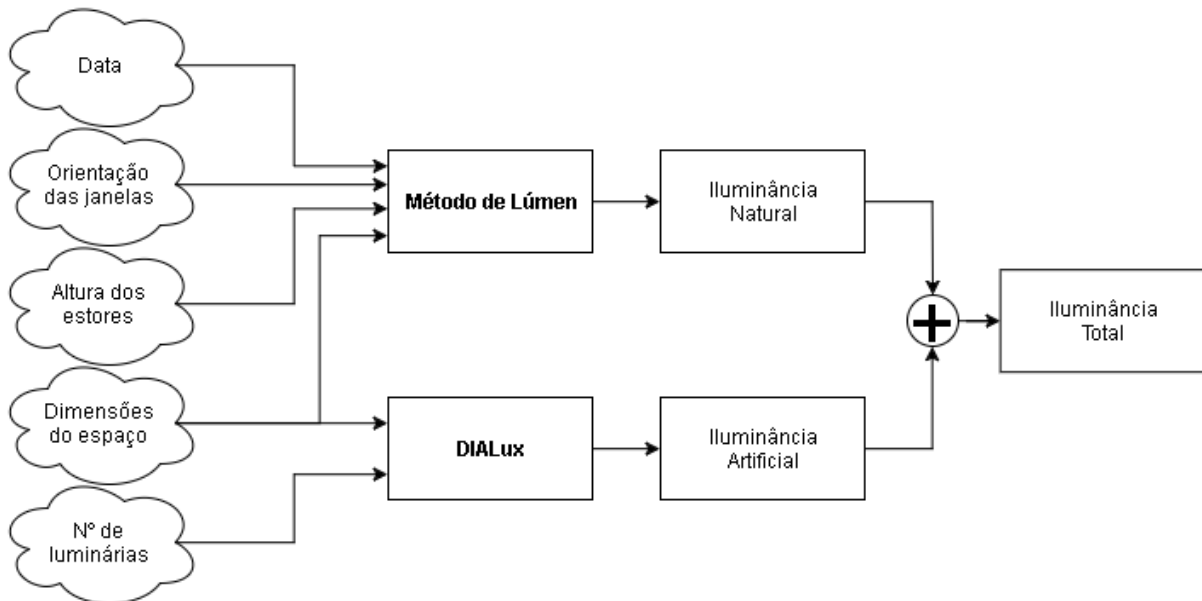


Figura 12. Fluxograma do modelo de iluminação

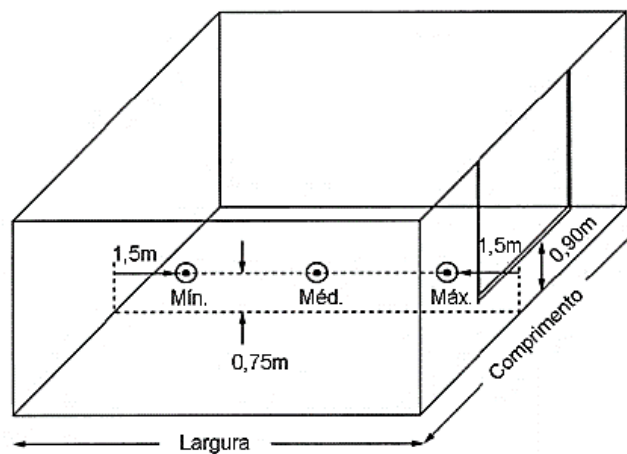


Figura 13. Localização dos três pontos de interesse no método de Lúmen [18]

A aplicação do método pode ser dividida nos passos seguintes:

1º Passo: A **iluminância na janela por incidência das radiações direta e difusa** (E_{SW}) deve ser calculada como a soma de duas parcelas. A primeira parcela representa a iluminância vertical proveniente da radiação direta do sol (E_{UW}) que varia com a altitude solar (α) e a diferença entre os ângulos de azimute do sol e da janela. A Figura 14 mostra a variação da iluminância vertical segundo estas variáveis. As 5 curvas dizem respeito a diferentes ângulos de azimute entre o sol e a janela: 0° , 30° , 45° , 60° , 75° .

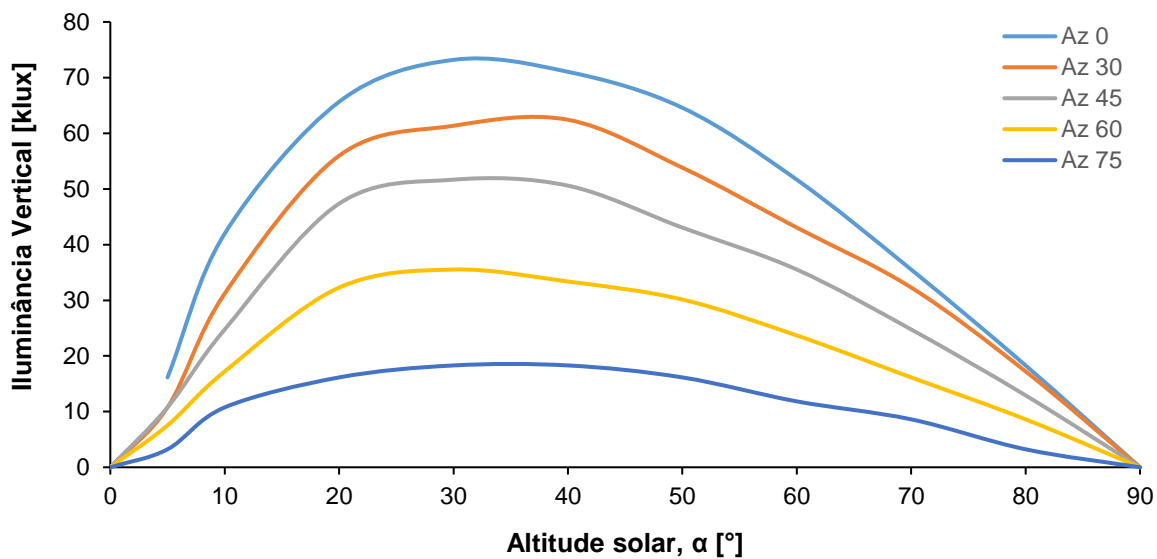


Figura 14. Iluminância natural no plano vertical. Componente direta da radiação solar [18]
(Cada curva diz respeito a um ângulo de azimute diferente)

A segunda parcela representa a iluminância vertical proveniente da radiação difusa (E_{kW}), a qual também varia com a altitude solar (α) e a diferença entre os ângulos de azimute do sol e da janela. A Figura 15 mostra a variação da iluminância vertical segundo estas variáveis.

A diferença entre os ângulos de azimute (a_{sw}) é calculada com base na equação (3.1).

$$a_{sw} = |a_s - a_w| \quad (3.1)$$

a_s : Azimute solar [°]; a_w : Azimute da janela¹⁴ [°];

2º Passo: A **iluminância na janela por incidência da radiação refletida pela terra** (E_{gW}) deve ser calculada com base na equação (3.2).

$$E_{gW} = \rho_g E_{Sg} / 2 \quad (3.2)$$

ρ_g : Refletividade do chão; E_{Sg} : Iluminância horizontal total na superfície da terra [lux];

A iluminância total sobre uma superfície horizontal resulta da adição das componentes direta e difusa sobre condições de céu limpo ou encoberto. A Figura 16 representa a iluminância horizontal que incide no solo (E_{Sg}) em condições de céu limpo.

¹⁴ Este ângulo é determinado pela orientação da janela/parede. Representa o ângulo que a normal à janela faz com o sul geográfico (a este do sul este ângulo é negativo e a oeste é positivo). Deve-se ter cuidado para usar a mesma convenção para o ângulo de azimute.

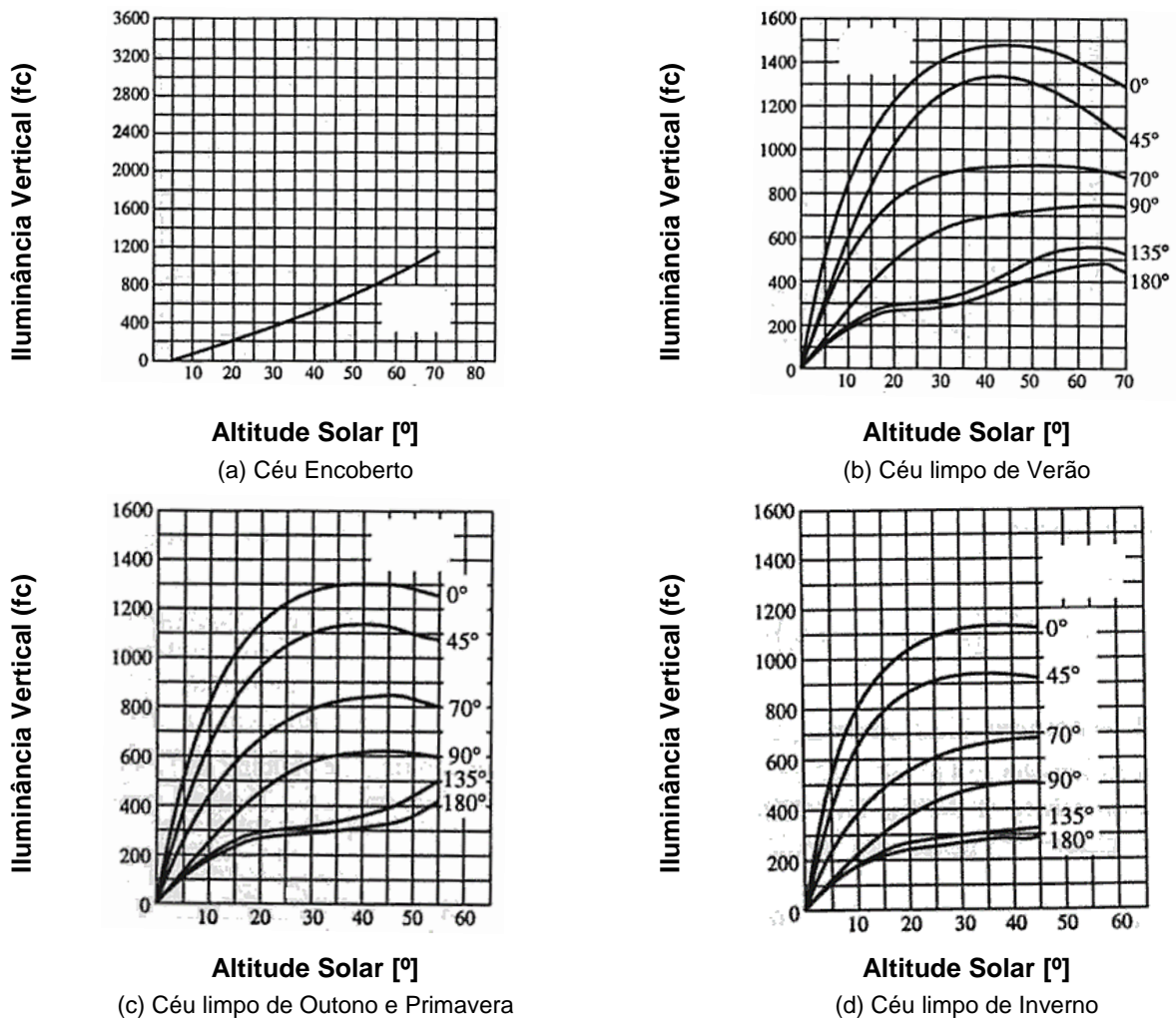


Figura 15. Iluminância natural no plano vertical em footcandles. Componente difusa da radiação solar [18]

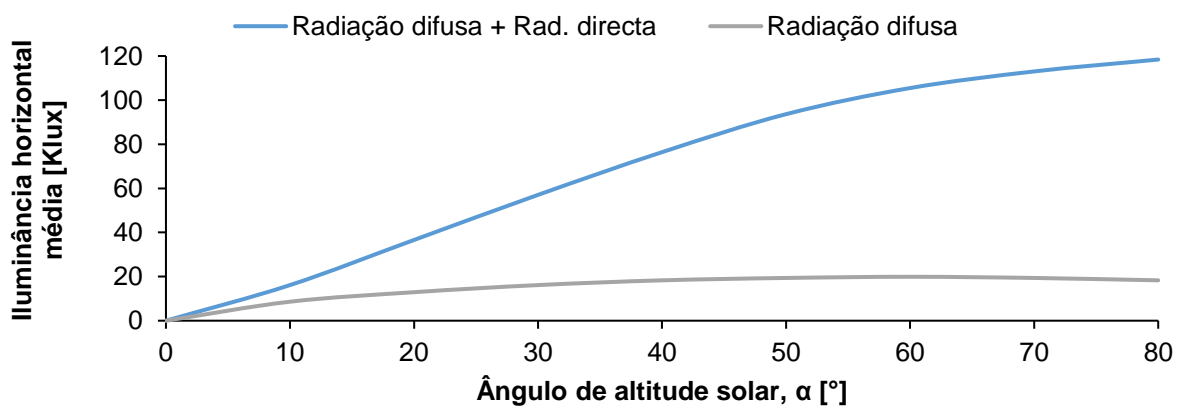


Figura 16. Iluminância natural horizontal em condições de céu limpo [18].

3º Passo: Os **fluxos luminosos** que incidem sobre a janela são atenuados pela transmissividade da mesma. Os fluxos que na realidade atravessam a janela podem ser estimados, em boa aproximação, com base nas equações (3.3) e (3.4).

$$\Phi_{sw} = E_{sw} \tau A_W \quad (3.3)$$

$$\Phi_{gw} = E_{gw} \tau A_W \quad (3.4)$$

Φ_{sw} : Fluxo luminoso de origem direta e difusa que atravessa a janela [lm]; A_W : Área do vidro da janela [m²];

Φ_{gw} : Fluxo luminoso refletido do chão que atravessa a janela [lm]; τ : Transmissividade;

E_{gw} : Iluminância na janela por incidência da radiação refletida pela terra [lux];

E_{sw} : Iluminância na janela por incidência das radiações direta e difusa [lux];

4^o Passo: O **fator de perda de luz** (k_m) pretende quantificar a atenuação da iluminação em consequência da sujidade existente na janela (WDD) e nas superfícies da sala (RSDD) e pode ser determinado a partir da equação (3.5). Os fatores WDD e RSDD dependem da frequência de limpeza¹⁵.

$$k_m = (WDD)(RSDD) \quad (3.5)$$

WDD: Fator atenuante resultado da sujidade da janela;

RSDD: Fator atenuante resultado da sujidade das superfícies da sala;

5^o e último passo: A **iluminância no plano de trabalho** é calculada para os três pontos ilustrados na Figura 13. As três iluminâncias são determinadas utilizando dois coeficientes de utilização: C e K¹⁶. Estes fatores dependem das dimensões da sala e da refletividade das paredes.

$$E_{sp} = \Phi_{sw} C_s K_s K_m \quad (3.6)$$

$$E_{gp} = \Phi_{gw} C_g K_g K_m \quad (3.7)$$

C_s, C_g, K_s, K_g : Coeficientes de Utilização

O modelo de Lúmen não tem em conta a presença de estores. Para contabilizar o efeito de estores exteriores do tipo venezianos foi considerado que estes elementos refletiriam a radiação direta na sua totalidade se estivessem fechados, permitindo a passagem exclusivamente da componente difusa.

Para calcular a intensidade luminosa proveniente das luminárias presentes na sala usou-se os resultados programa comercial **DIALux**, que utiliza os dados fotométricos. Em alternativa podiam ter-se usado os gráficos fotométricos, normalmente fornecidos pelos fabricantes. Porém, tomou-se esta opção porque não dispúnhamos da informação do fabricante. Note-se, contudo, que as lâmpadas não estão, certamente, nas mesmas condições em que foram testadas em primeiro lugar aquando da realização dos testes para avaliação das características fotométricas, pelo que é expectável que exista algum erro. Para estimar as condições atuais, seria necessário aplicar o procedimento descrito em [9].

¹⁵ WDD (window dirt depreciation) = 0.83 representa uma média em escritórios. Para salas limpas regularmente RSDD (room surface dirt depreciation) anda à volta de 0,94.

¹⁶ C_s e K_s para a componente direta e difusa. C_g e K_g para a componente refletida. Estes valores podem ser consultados em [18]

3.2 MODELO DE SIMULAÇÃO TÉRMICA

As transferências de calor que ocorrem numa sala são diversas e difíceis de quantificar com precisão, mas podemos assumir várias hipóteses que nos permitem calcular a variação das condições térmicas no interior da sala com uma aproximação aceitável. Por essas razões, o procedimento para o cálculo da temperatura, seguido no modelo simplificado, resulta da aplicação de princípios fundamentais da termodinâmica a um problema análogo à situação real, ignorando alguns aspetos considerados como tendo pouca influência sobre o resultado final.

O modelo simplificado consiste, na aplicação de um balanço de energia e massa, em regime estacionário, a um volume de controlo — uma sala. Este sistema realiza trocas de calor com exterior, por meio de fenómenos de ventilação, de infiltração, de condução de calor e de transmissão de radiação.

Os ocupantes e os sistemas de iluminação foram considerados as principais fontes de calor no interior.

3.2.1 TROCAS DE CALOR POR CONDUÇÃO

As trocas energéticas por condução através das paredes e janelas são quantificadas com base na equação (3.8). Esta equação assume regime estacionário e não contabiliza a energia que é absorvida pela parede. A escolha desta equação foi estratégica e permitiu simplificar o problema real. Considerar uma situação em regime transiente requer o conhecimento de um maior número de propriedades e exige maior capacidade de cálculo por parte dos controladores.

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \sum U_i A_i \Delta T \text{ [W]} \quad (3.8)$$

\dot{q}_{cond} : Potência calorífica por condução [W]; A_i : Área da superfície i [m^2]; ΔT : Diferença de temperaturas [K]

U_i : Coeficiente global de transferência de calor da superfície i [$\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$];

3.2.2 TROCAS DE CALOR POR RADIAÇÃO

A energia que chega por radiação proveniente do sol pode ser dividida em três componentes: radiação direta (E_D), radiação difusa (E_d) e radiação refletida do chão (E_r). A radiação direta é toda aquela radiação que não sofreu qualquer tipo de reflexão ou refração e provém diretamente do sol. A radiação difusa resulta do efeito provocado pela atmosfera sobre uma fração da radiação solar, quando esta tenta atravessá-la.

Todas estas componentes podem ser determinadas com relações trigonométricas ou com fatores determinados empiricamente através da radiação normal directa (E_{DN}) — definida como a radiação que chega a uma superfície unitária perpendicular à radiação em qualquer instante. A partir desta variável é então possível calcular a radiação incidente (G) em qualquer superfície, independentemente da sua inclinação e orientação.

Existem modelos capazes de estimar E_{DN} em condições térmicas e coordenadas espaciais específicas. Porém, como os modelos disponíveis para calcular E_{DN} têm pouca aplicabilidade em locais como Lisboa e como medições da radiação incidente numa superfície horizontal $G_{Horizontal}$ são efectuadas por estações meteorológicas, optou-se por calcular E_{DN} a partir de $G_{Horizontal}$, a partir desta relação:

$$G_{Horizontal} = \underbrace{C \times E_{DN}}_{E_{difusa, Horiz}} + \underbrace{E_{DN} \sin \alpha}_{E_{direta, Horiz}} \Leftrightarrow E_{DN} = \frac{G_{Horizontal}}{C + \sin \alpha} \quad [W/m^2] \quad (3.9)$$

$G_{Horizontal}$: Radiação incidente numa superfície Horizontal $[W/m^2]$; C: Fator de difusão do céu¹⁷; α : Altitude solar $[^\circ]$

E_{DN} : Radiação que chega a uma superfície unitária perpendicular à radiação em qualquer instante $[W/m^2]$

Para determinar o ganho energético devido à exposição solar da janela ($\dot{q}_{solar,janela}$) usaram-se as equações (3.10), (3.11) e (3.12).

$$\dot{q}_{solar,janela} = A_{janela} \times IAC \times [E_D(\theta) \times SHGC(\theta) + (E_d + E_r)_{Vertical} \times (SHGC)_D] \quad [W] \quad (3.10)$$

$$(E_d + E_r)_{Vertical} = CYE_{DN} + E_{DN}(C \times \sin \alpha) \times 0.2/2 \quad [W/m^2] \quad (3.11)$$

$$E_D = E_{DN} \cos \theta \quad \text{se} \quad \cos \theta > 0 \quad (E_D = 0 \text{ caso contrário}) \quad (3.12)$$

A_{janela} : Área da janela $[m^2]$; IAC: Coeficiente de atenuação provocada pelos estores internos (=1 na ausência de estores);

θ : Ângulo entre a direção da radiação e a perpendicular da superfície $[^\circ]$; E_D : Radiação incidente direta $[W/m^2]$;

$SHGC(\theta)$: Coeficiente de ganho solar para a componente direta da radiação¹⁸; E_d : Radiação incidente difusa $[W/m^2]$;

$(SHGC)_D$: Coeficiente de ganho solar para a componente difusa da radiação; E_r : Radiação refletida incidente $[W/m^2]$;

Y: Razão entre a radiação incidente difusa numa superfície vertical e a radiação incidente difusa horizontal¹⁹;

A radiação que nos chega não tem apenas origem solar, todos os corpos terrestres emitem radiação e, por essa razão, a sala recebe radiação emitida pelo meio envolvente. Pelo mesmo princípio, a sala também emite radiação para o exterior.

É possível estimar a energia emitida por uma superfície de área unitária pela lei de Stefan-Boltzmann aplicada a uma superfície difusa de emissividade ϵ . A equação (3.13) representa esta lei.

$$E = \epsilon T^4 \times 5.67 \times 10^{-8} \quad [W/m^2] \quad (3.13)$$

E: Potência emitida pela superfície unitária $[W/m^2]$; ϵ : Emissividade da superfície; T: Temperatura da superfície emissora $[K]$;

¹⁷ Existem valores disponíveis do fator de difusão do céu para o 21º dia de cada mês em [45]

¹⁸ *Solar Heat Gains Coefficient* (SHGC). Este coeficiente mede o ganho térmico através da radiação solar. Quanto menor o valor deste fator, maior é a capacidade da janela em reduzir os ganhos de calor com origem solar. Estes valores podem ser consultados em [45].

¹⁹ O procedimento utilizado para determinar Y está demonstrado em [45]

A taxa da radiação emitida — pequenos comprimentos de onda — entre uma superfície (1) exterior dum edifício e a envolvente (2) exterior é igual a

$$\dot{q}_{12} = \sigma(T_1^4 - T_2^4) / \left(\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} \right) \quad (3.14)$$

T_i : Temperatura da superfície i [K]; ε_i : Emissividade da sup. i ; F_{12} : Fator de forma de 1 para 2; A_i : Área da sup. i [m²];

No caso particular duma superfície pequena e uma cavidade grande, a equação (3.14) simplifica-se com base na aproximação $A_1/A_2 \approx 0$ ($F_{12} = 1$), resultando em

$$\dot{q}_{12} = \varepsilon_1 A_1 \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.15)$$

T_i : Temperatura da superfície i [K]; ε_1 : Emissividade da sup.1; A_1 : Área da sup.ext [m²];

A Figura 17 ilustra esta situação. No caso da envolvente exterior ser a atmosfera exterior, T_2 representa a temperatura radiativa do ar que, com base em [41], iguala a temperatura exterior (T_{out}) em dias nebulados ou ($T_{out} - 20$) em dias de céu limpo.

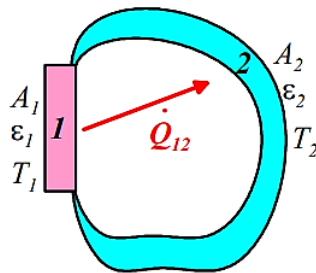


Figura 17. Trocas de calor em recintos
(Fonte: <http://webx.ubi.pt/~jpjo/TransCal8.pdf>)

A radiação emitida pelas superfícies interiores da sala que incide na janela é em parte perdida para o exterior, gerando perdas significativas durante a noite. Contudo, nem toda a radiação que é emitida pelas superfícies opacas incide sobre a janela, parte dela incide sobre outras paredes, podendo ser absorvida ou refletida por estas. Por essa razão, para determinar a energia que incide sobre janela — através da equação (3.16) — é necessário determinar os fatores de forma de todas as superfícies que a envolvem.

$$\dot{q}_{\text{rad, emitida}} = \sum_{i=1}^k A_k E_k F_{k-janela} [W] \quad (3.16)$$

E_k : Potência emitida pela superfície unitária k [W/m²]; $\dot{q}_{\text{rad,emitida}}$: Potência emitida que incide na janela [W];

O fator $F_{k-janela}$ representa a fração da energia radiativa que abandona a superfície k e incide sobre a superfície da janela. O procedimento utilizado para calcular o fator de forma respectivo de cada parede está descrito no ANEXO B.

3.2.3 TROCAS DE CALOR POR VENTILAÇÃO

A ventilação inclui as trocas de ar através de janelas e portas abertas (ventilação natural) e através de sistemas mecânicos de ventilação (ventilação forçada). A ventilação natural é conduzida pelas diferenças de pressão na envolvente da sala, criadas pelo vento e pela existência de variações na densidade do ar, devido a diferenças de temperatura entre o ar interior e exterior.

O ar que entra e o que sai não se encontram nas mesmas condições térmicas e por isso a esta troca estão sempre associadas perdas ou ganhos energéticos. Considerando o ar como um gás ideal, com calor específico constante, é possível determinar a taxa de calor sensível associada a esta troca pela equação seguinte:

$$\dot{q}_{vent} = Q\rho c_p \Delta T \quad [W] \quad (3.17)$$

Q : Caudal Volumico [m^3/s]; c_p : Calor específico do ar (a pressão constante) [$J/(kg.K)$]; ρ : Densidade do ar²⁰ [kg/m^3];
 ΔT : Diferença de temperatura entre o exterior e o interior [K]

O caudal de ar, Q , que entra através de aberturas intencionais, por ação do vento e da temperatura, tem como fórmula geral a seguinte igualdade:

$$Q = C_D A_{ab} \sqrt{2\Delta p / \rho} \quad [m^3/s] \quad (3.18)$$

C_D : Coeficiente de descarga; A_{ab} : Área da abertura [m^2]; Δp : Diferença de pressão entre o exterior e o interior [Pa]

Para determinar o diferencial de pressão, Δp , estabeleceram-se três metodologias diferentes, consoante a combinação de janelas e portas abertas, como mostra a Figura 18.

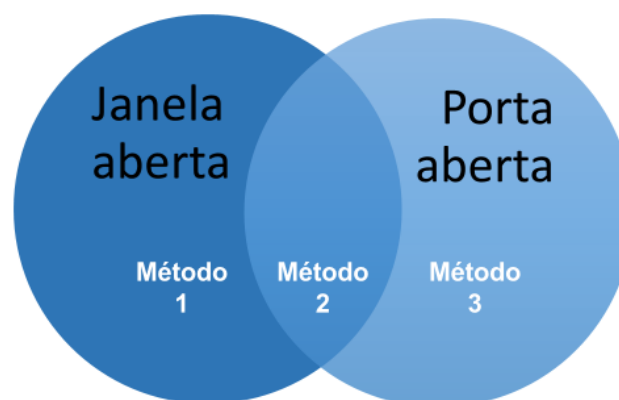


Figura 18. Metodologias usadas consoante as condições de ventilação

²⁰ Considera-se a densidade do ar seco uma vez que a presença de humidade tem pouca influência sobre a densidade

Nos casos de abertura da janela (método 1 e 2) é importante ter-se em conta a diferença de pressão resultante da ação do vento, que pode ser determinada aplicando-se as equações (3.19) e (3.20), como indicado em [42].

$$U_H = U_{met} \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{H}{\delta_H} \right)^{\alpha_H} \quad (3.19)$$

$$\Delta p = s^2 C_p \rho \frac{U_H^2}{2} \quad (3.20)$$

U_H : Velocidade média do vento a uma altura H do chão sem obstáculos [m²/s]; δ_H : espessura da camada limite [m];

U_{met} : Velocidade do vento medida na estação meteorológica [m²/s]; H_{met} : Altura a que é medida U_{met} [m];

δ_{met} : Espessura da camada limite no ponto de medição [m]; H: Altura do escoamento não perturbado [m];

α_{met} : Expoente característico do terreno onde está inserida a estação meteorológica;

α_H : Expoente característico do terreno onde está inserido edifício; C_p : Coeficiente de pressão; Δp : Diferença de pressão entre o exterior e o interior [Pa]; ρ : Densidade do ar²¹ [kg/m³]; s: fator de abrigo;

O C_p varia de ponto para ponto, mas numa forma aproximada e sem prejuízo sobre os resultados o valor usado na equação (3.20) foi o C_p médio sobre a superfície. Para determinar este valor podem ser feitos estudos experimentais com modelos físicos feitos à escala dos corpos ou, neste caso, edifícios que se pretendam estudar. Alternativamente, no caso de edifícios baixos, podem ser usados os valores da Figura 19. Nesta dissertação, considerou-se $C_p = 0.25$ tendo em conta a direção predominante dos ventos em Lisboa e a disposição de árvores na proximidade dos edifícios.

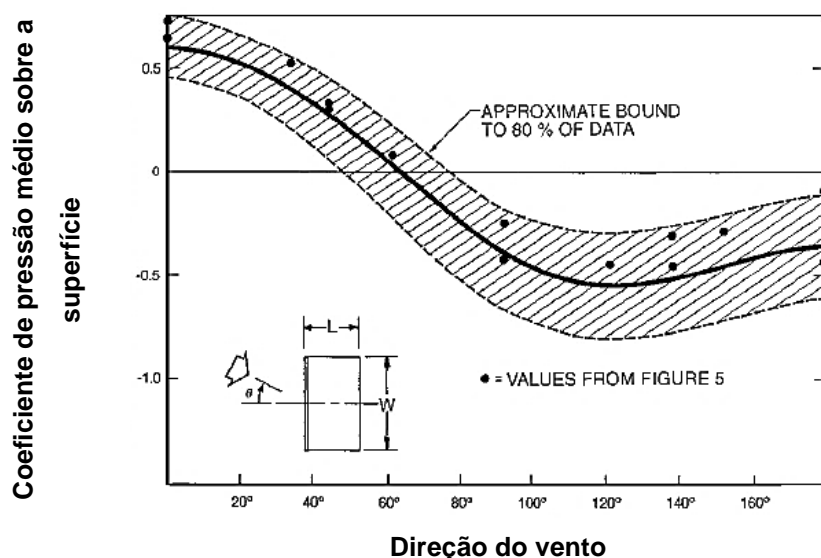


Figura 19. Variação do coeficiente de pressão médio sobre a superfície de edifícios baixos (Fonte: Swami e Chandra 1987)

²¹ Considera-se a densidade do ar seco uma vez que a presença de humidade tem pouca influência sobre a densidade

Para determinar a diferença de pressão que resulta da diferença entre as temperaturas exterior e interior aplica-se a equação (3.21) em todos os métodos.

$$\Delta p = \rho \left(\frac{T_o - T_i}{T_i} \right) g (H_{NPL} - H) \quad (3.21)$$

Δp : Diferença de pressão entre o exterior e o interior [Pa]; ρ : Densidade do ar²² [kg/m³]; g : Aceleração da gravidade [m/s²];

T_o : Temperatura exterior [°C]; T_i : Temperatura interior [°C]; H_{NPL} : altura do nível de pressão neutra [m];

H : altura da abertura [m];

O que vai diferir do método 1 para o método 2 vai ser a abertura ou não da porta que vai influenciar no tipo de escoamento na janela. No primeiro caso, o escoamento através da janela é bidirecional e no segundo caso é assumido que o escoamento é unidirecional ($C_D = 0,65$). Na situação bidirecional — como demonstrado na Figura 20 (a) — o fluxo de ar quente escoo pelo topo da abertura e o fluxo de ar frio escoo pela base da abertura, em direção oposta ao primeiro. Nesse caso específico, o coeficiente de descarga (C_D) é calculado com base na equação que se segue:

$$C_D = 0.4 + 0.0045|T_i - T_o| \quad (3.22)$$

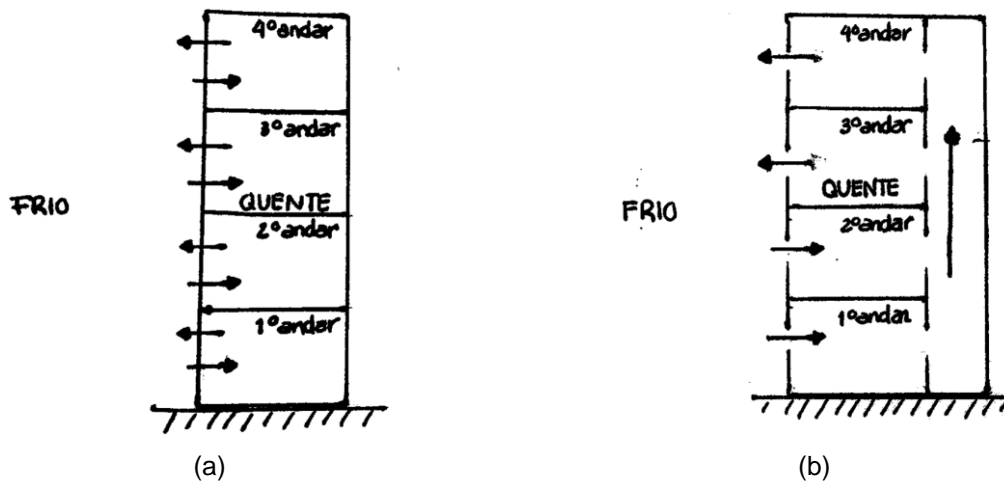


Figura 20. Escoamento de ar através das janelas. Escoamento bidirecional na situação de portas fechadas (a) e escoamento unidirecional na situação de portas e janelas simultaneamente abertas (b)

No 3º método, não existe efeito do vento sobre a ventilação. As diferenças de pressão na superfície de troca entre a sala e o corredor, com a mesma área da porta, são consequência das diferenças de temperatura, exclusivamente.

²² Considera-se a densidade do ar seco uma vez que a presença de humidade tem pouca influência sobre a densidade

3.2.4 GANHOS INTERNOS

À parte da relação do sistema com o exterior e de todas as transferências de calor que daí resultam, a presença de pessoas e o uso de luminárias também resultam em ganhos térmicos notáveis, neste caso de origem interna. O calor libertado por cada ocupante depende do seu nível de actividade e pode variar, aproximadamente, entre 100 a 500 W. O calor libertado pelas luminárias, por outro lado, depende da sua potência dissipativa que pode variar muito de lâmpadas incandescentes para lâmpadas LED. O modelo simplificado contabiliza o calor gerado no interior do sistema, em resultado destes dois fatores, como se descreve na equação (3.23). O calor sensível libertado por cada ocupante ($\dot{q}_{s,ocupante}$) é função do nível de actividade e foi assumido com base em resultados disponíveis em [43]. A potência dissipada por cada luminária, por outro lado, foi assumida como representando 50% da potência consumida, no caso de lâmpadas fluorescentes tubulares.

$$\dot{q}_{g\ int} = n_{ocupantes} \times \dot{q}_{s,ocupante} + n_{luminarias} \times p_{dissipada} \quad (3.23)$$

$n_{ocupantes}$: Nº de ocupantes; $\dot{q}_{s,ocupante}$: Calor sensível libertado por cada ocupante;

$n_{luminarias}$: Nº de luminárias ligadas; $p_{dissipada}$: Potência dissipada pelas lâmpadas em cada luminária

3.2.5 BALANÇO TÉRMICO

Um balanço térmico para uma sala genérica pode ser representado pela equação (3.24). Este balanço tem como base a 1ª Lei da Termodinâmica para um volume de controlo e só tem em conta a variação da energia interna sensível, desprezando outras formas de energia. Neste modelo simplificado, as trocas de ar com o exterior não afetam a massa do sistema — que se mantém constante.

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = \dot{q}_{vent} + (\dot{q}_{cond} + \dot{q}_{solar,janela} - \tau \times \dot{q}_{rad, emitida} + A_{janela} \sigma T_2^4)_{janela} + (\dot{q}_{cond} - \dot{q}_{12})_{parede\ ext} + (\dot{q}_{cond})_{parede\ int} + \dot{q}_{g\ int} \quad (3.24)$$

U_{vc} : Energia interna sensível²³ [W]; \dot{q}_{vent} : Ganhos térmicos por ventilação [W]; $\dot{q}_{solar,janela}$: Ganhos solares [W];

$\dot{q}_{rad, emitida}$: Radiação emitida da envolvente interior para a janela [W]; \dot{q}_{cond} : Ganhos térmicos por condução [W];

$\dot{q}_{g\ int}$: Calor gerado [W]; \dot{q}_{12} : Balanço da radiação que é emitida para o exterior [W]; T_2 : Temperatura da envolvente [K];

A variação de energia sensível da sala (dU_{vc}/dt) é igual à energia que entra devido à radiação solar ou à existência de temperaturas superiores na envolvente do sistema, menos a que se perde para o exterior. Nos casos em que haja geração de energia no seu interior, esse termo também deve ser incluído no balanço como um ganho do sistema, neste caso representado por $\dot{q}_{g\ int}$.

A temperatura do meio é diretamente influenciada pela variação de energia do sistema, como mostra a equação seguinte, que despreza as variações de massa no volume de controlo.

²³ vc: volume de controlo

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = mc_p \frac{dT_{in}}{dt} \quad (3.25)$$

m : massa interior ao vc [Kg]; c_p : capacidade térmica do meio [$J.Kg^{-1}.K^{-1}$]; T_{in} : temperatura interior [$^{\circ}C$]

No entanto, esta relação não é linear, uma vez que a variação de temperatura vai depender ainda da capacidade térmica do meio, que varia conforme a humidade absoluta. As capacidades térmicas do vapor de água e do ar seco são diferentes e, por essa razão, a contribuição de cada uma das componentes foi separada na equação (3.26).

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = (m_{H_2O}c_{p,H_2O} + m_{ar\ seco}c_{p,ar\ seco} + m_{parede\ exterior}c_{p,parede\ exterior}) \frac{dT_{in}}{dt} \quad (3.26)$$

m_{H_2O} , $m_{ar\ seco}$ e $m_{parede\ exterior}$: massa de água, ar e parede exterior [kg]; U_{vc} : Energia interna sensível [W];

c_{p,H_2O} , $c_{p,ar\ seco}$ e $c_{p,parede\ exterior}$: calor específico da água, ar e parede exterior

As paredes exteriores foram incluídas no volume de controlo, uma vez que absorvem grande parte da energia que chega do exterior — aumentando a inércia térmica do sistema. Desta forma, é assumido que a temperatura da parede exterior é igual à temperatura no interior da sala.

A equação (3.25) considera a temperatura uniforme em todo o volume de controlo. Por essa razão, este modelo negligencia os gradientes de temperatura existentes num espaço real. Apesar disso, esta hipótese é a abordagem usada em geral em climatização. Conhecer a distribuição da temperatura no volume exige um processo de cálculo complexo, uma vez que se trata dum problema tridimensional num meio gasoso.

O modelo assim desenvolvido executa os cálculos como mostra a Figura 21. É calculada uma nova temperatura para o volume de controlo em cada período de tempo (segundo, minuto, hora). Os dados *input* do modelo estão representados pelos blocos a preto na Figura 21. O programa utiliza dados como: a velocidade do vento, a radiação global horizontal e a temperatura exteriores — disponibilizados pelo site de meteorologia do Instituto Superior Técnico num ficheiro *.dat*.

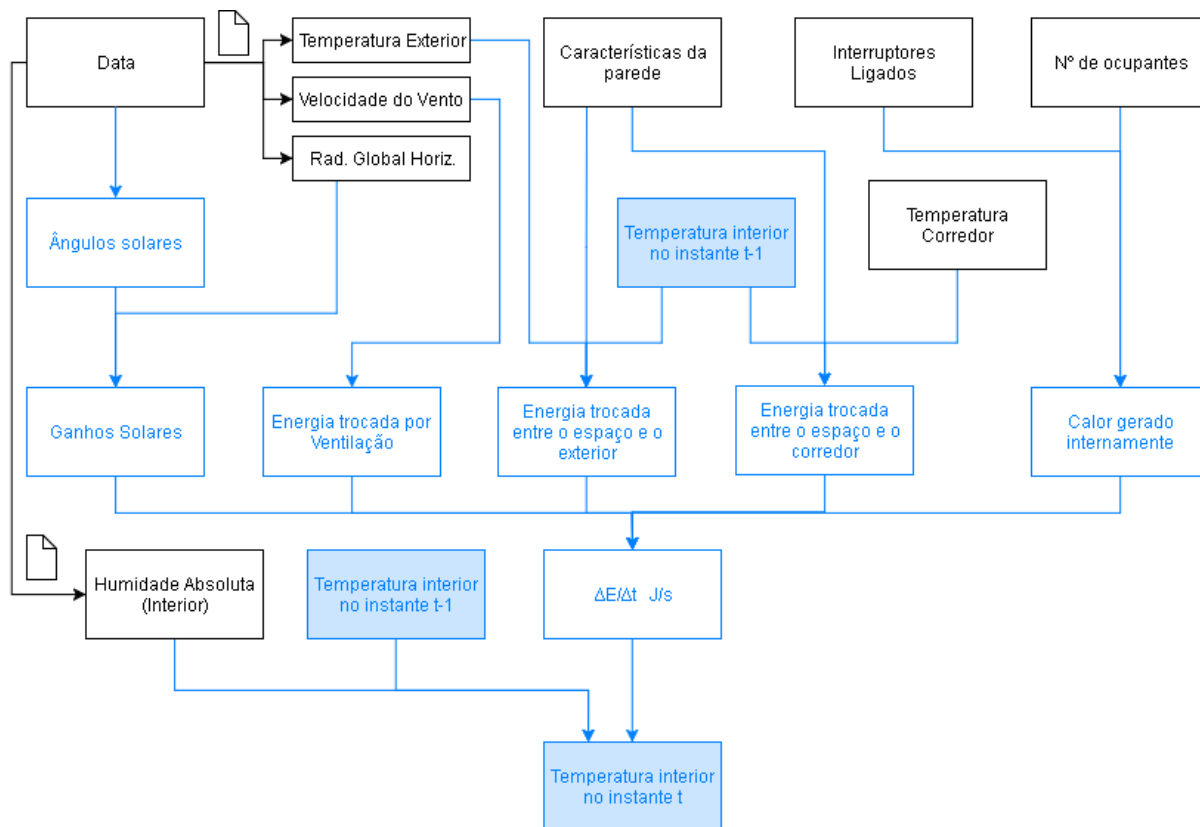


Figura 21. Fluxograma do programa que simula a temperatura

3.3 MODELO DE CONFORTO

O modelo simplificado, utiliza o modelo PMV -PPD para estimar o conforto térmico dos ocupantes. Este foi implementado com base num algoritmo incluído na norma ISO 7730 [36] que é largamente utilizado no projeto de novas edificações [35].

Segundo [37], podemos relacionar PMV com a taxa metabólica e o calor perdido pelo corpo para o ambiente. Quanto maior esta diferença entre estes valores, maior o desconforto, uma vez que o esforço feito pelo organismo para manter em equilíbrio a temperatura corporal é maior [35].

Este modelo despreza a presença de suor na pele e, por essa razão, não deve ser utilizado para taxas metabólicas superiores a 3 met, das quais resultam elevados níveis de suor que afetam de forma significativa as perdas de calor [35].

3.4 ALGORITMOS DE GESTÃO

3.4.1 COM INTERVENÇÃO DOS UTILIZADORES

O controlo manual num espaço partilhado por diversas pessoas, tem demonstrado não ser um método eficaz, na maioria das vezes, uma vez que não oferece as mesmas oportunidades de controlo a todos os indivíduos.

Para desenvolver um algoritmo simples de controlo manual da iluminação e da climatização, baseado na real intervenção dos ocupantes sobre a gestão das condições numa sala naturalmente ventilada, foram observados os comportamentos dos estudantes e professores da instituição de ensino universitário IST.

As pessoas demonstraram ter em geral uma atitude passiva, adaptando o vestuário antes de tomarem atitudes que influenciassem o ambiente térmico e o estado de conforto sentido pelos restantes ocupantes. Por esse motivo, o modelo manual considera que os ocupantes não têm um papel ativo no controlo dos estores, janelas e portas. Este assume que as portas e janelas estão sempre fechadas e a posição dos estores não varia durante o período de ocupação, embora possam alternar entre abertos e fechados.

Este modelo é uma aproximação bastante razoável à realidade, uma vez que:

- o controlo da abertura da porta está a cargo do professor e esta só é aberta quando as temperaturas são muito altas e a sala está cheia.
- o controlo da abertura de janelas está ao alcance de 2 pessoas e em geral não são utilizadas.
- o estado dos estores não é alterado, por ser monitorizado e por o seu controlo não estar ao alcance da maioria dos ocupantes

Com base nas observações, para simular o controlo manual, foram considerados dois cenários — estores sempre abertos e estores sempre fechados — e foi assumido que as luzes eram todas ligadas sempre que alguém sentisse necessidade, não havendo nenhum controlo adicional por parte dos ocupantes.

3.4.2 AUTOMÁTICOS

Para alcançar as condições ótimas de consumo na sala, capazes de manter as propriedades do meio entre os intervalos de conforto, desenvolveram-se dois algoritmos para a gestão da iluminação e da climatização. Uma vez que estes algoritmos se influenciam mutuamente, os seus papéis foram partilhados num modelo de controlo integrado.

3.4.2.1 ILUMINAÇÃO

Para a iluminação numa sala contribuem as componentes de luz natural, proveniente do sol, e de luz artificial, proveniente das luminárias. Durante o dia, a luz natural é muitas vezes suficiente para a maioria das atividades que o homem desempenha, mas para outras é preciso que a componente artificial complemente a luz natural existente, e em escritórios e escolas essa situação é muito comum. No entanto, é preciso igualar o uso às necessidades de forma a poupar o máximo de energia possível sem comprometer o conforto visual.

O algoritmo de controlo automático da iluminação proposto tem como objetivos reduzir o nível de eletricidade consumida e evitar o encadeamento de origem solar. Para alcançar esses objetivos, gere as luzes artificiais com base nos níveis de iluminância natural no plano de trabalho e controla os estores

de forma a evitar o encandeamento e a radiação solar direta sobre as mesas. A Figura 22 esquematiza o algoritmo implementado.

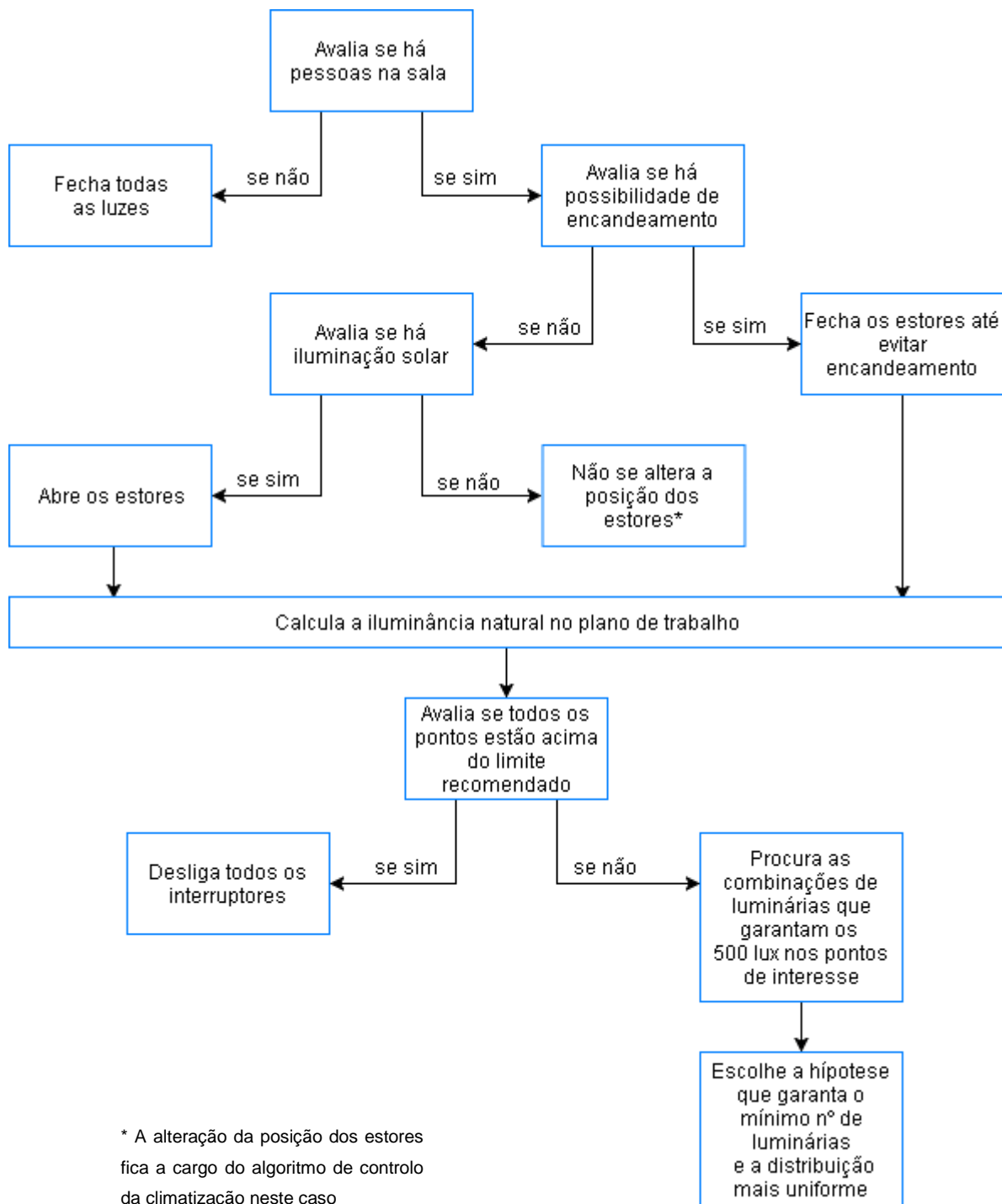


Figura 22. Fluxograma do programa de controlo da iluminação.

Na ausência de pessoas, todas as luzes são desligadas, mas nenhum controlo é feito sobre estores, uma vez que o algoritmo de controlo térmico impera nestas condições.

No caso de existir radiação direta a incidir sobre a janela, os estores são fechados no sentido de proteger os ocupantes de sofrerem encadeamento. Para evitar fechar os estores completamente e perder os benefícios duma fonte natural de iluminação, o modelo estabelece um alcance máximo de 40 cm para a incidência de radiação direta sobre o plano de trabalho. Isto permite a entrada de luz solar e evitar o encadeamento do sol.

A partir do momento em que a iluminância natural desce a valores quase impercetíveis, como acontece quando escurece no fim do dia, o controlo dos estores deixa de ter interesse para a gestão da iluminação e passa a ser assegurado exclusivamente pelo controlo da climatização.

Depois de retificada a posição dos estores, o programa calcula a iluminância natural em cada um dos pontos de interesse e avalia se este valor se encontra abaixo do mínimo recomendado para a atividade que está a ser desempenhada. Neste caso, em que se espera que os utilizadores estejam aptos para ler e escrever sobre a superfície de trabalho, o valor recomendado são 500 lux [17]. Sempre que um dos pontos de interesse não cumpra as recomendações de iluminância o programa procura uma combinação de luminárias — uniforme e económica — que complemente a iluminação natural, satisfazendo as necessidades visuais.

3.4.2.2 CLIMATIZAÇÃO

Se queremos fazer a gestão da climatização dum espaço desprovido de ar condicionado devemos evitar as perdas energéticas no inverno e potenciar as perdas no verão. Muito dificilmente as perdas no verão serão superiores aos ganhos e, por isso, será difícil encontrar um equilíbrio que mantenha as condições na sala.

O fluxograma da Figura 23 resume o procedimento patente no algoritmo proposto para controlo da climatização. Este algoritmo controla a abertura e o fecho de janelas, portas e estores, de forma a diminuir o desconforto na sala.

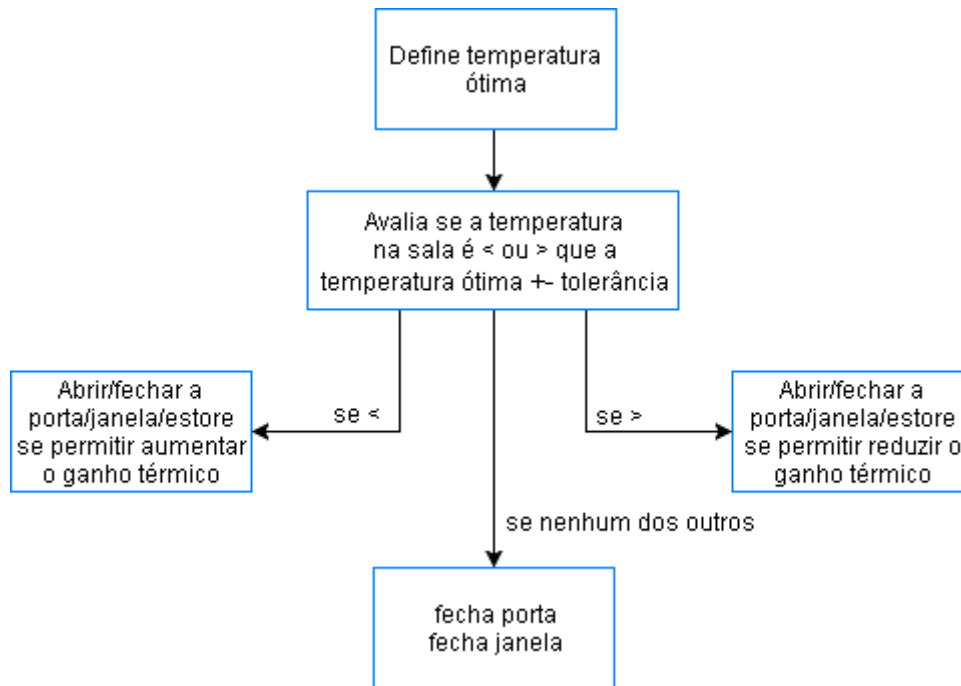


Figura 23. Fluxograma do algoritmo de climatização

Este algoritmo também reduz os consumos enérgicos quando usado em edifícios equipados com sistemas AVAC, uma vez que da mesma forma que permite melhorar as condições térmicas do espaço, permite reduzir a dependência e o uso desses sistemas.

Quando a temperatura se encontra acima/abaixo do valor ideal — temperatura ótima — o programa avalia se alguma das soluções seguintes permite a redução dos ganhos /o aumento das perdas de calor:

- Abertura/fecho da janela
- Abertura/fecho da porta
- Abertura/fecho do estore

Usando estes fatores de decisão:

- a temperatura interior
- a temperatura exterior
- a temperatura no corredor
- a carga térmica total
- a posição solar
- a previsão da carga de arrefecimento por ventilação

O processo de ventilação é complexo de avaliar e, por esse motivo, o algoritmo de controlo estuda as cargas perdidas com base em três cenários: porta e janela aberta, porta fechada com janela aberta ou janela aberta com porta fechada. O programa simula os três casos e escolhe aquele que permitir uma maior carga de arrefecimento. Por norma, quando a temperatura exterior é superior, as janelas

encontram-se fechadas, mas não é regra, uma vez que a corrente de ar pode vir do interior, se a porta estiver aberta e a temperatura no corredor for inferior.

4 CASO DE ESTUDO

O propósito desta tese foi a criação de um sistema que otimizasse o consumo energético das salas do pavilhão de civil, mantendo as condições de conforto térmico. Com isso em vista, foi escolhida como modelo uma sala com envolvente exterior, no sentido de se poder estudar a proximidade duma janela e o efeito dos estores.

Neste capítulo são descritas todas as características físicas do espaço interior sob análise e é feita uma análise à sua situação energética. No primeiro subcapítulo, 4.1, é feito um enquadramento geográfico do edifício. No subcapítulo 4.2, é feita uma contextualização do comportamento energético do edifício e, por fim, no último subcapítulo, 4.3, é feito um levantamento das características da envolvente da sala.

4.1 LOCALIZAÇÃO

O pavilhão de civil é parte integrante do campus Alameda do Instituto Superior Técnico que se localiza em Lisboa. A sala escolhida foi a V1.10, representada na Figura 24, que se localiza no 1º andar do edifício de civil. Esta sala tem paredes adjacentes a 2 salas e a um corredor. A parede que dá para o exterior está orientada a Este e tem uma janela que se estende a toda a largura. O Edifício tem 4 pisos acima do nível do chão (Pisos 0,1,2,3).



Figura 24. Modelo da sala V1.10 desenhado em SketchUp

4.2 AUDITORIA ENERGÉTICA

Para entender melhor o problema real em análise foi essencial documentar a situação energética do edifício.

Segundo uma auditoria realizada em [7], foi possível descrever discriminadamente o consumo no pavilhão de civil no ano de 2012, como se mostra na Figura 25.

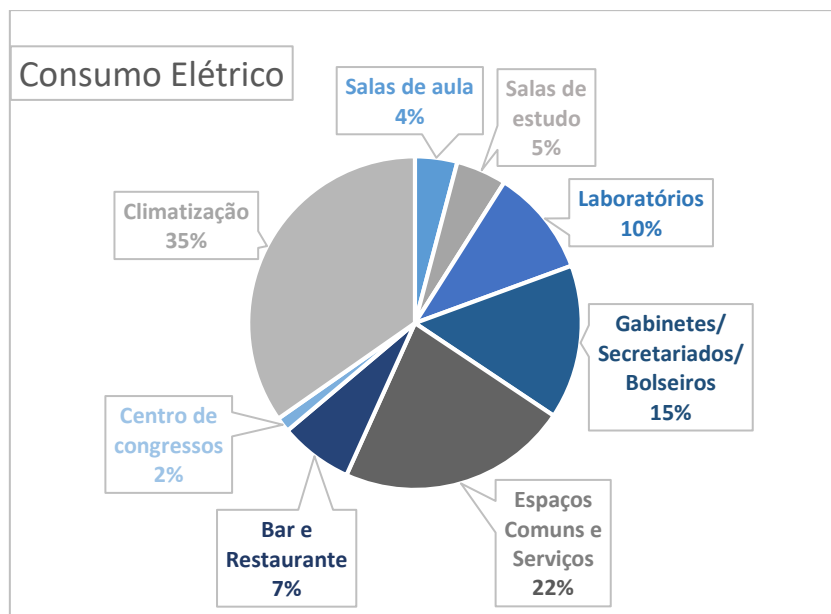


Figura 25. Desagregação do consumo anual de eletricidade por tipo de espaço no pavilhão de Civil.

Por análise do gráfico da Figura 25, saem confirmadas as suspeitas de que a climatização é o fator que mais contribui para os elevados consumos elétricos do edifício.

No consumo elétrico das salas de aula — que representa 4% do total — estão incluídos consumos não controláveis, resultantes do uso de computadores e de projetores, e consumos ajustáveis, resultantes da utilização de luzes. As características das luminárias são, por isso, aspetos importantes a ser tidos em conta num projeto deste tipo. As lâmpadas presentes na sala são do tipo fluorescentes tubulares TL-D T8 de 58 W e com balastro ferromagnético. E as armaduras estão suspensas a uma distância de 0,3m do teto e instaladas em fiada contínua [7], como esquematizado Figura 26.

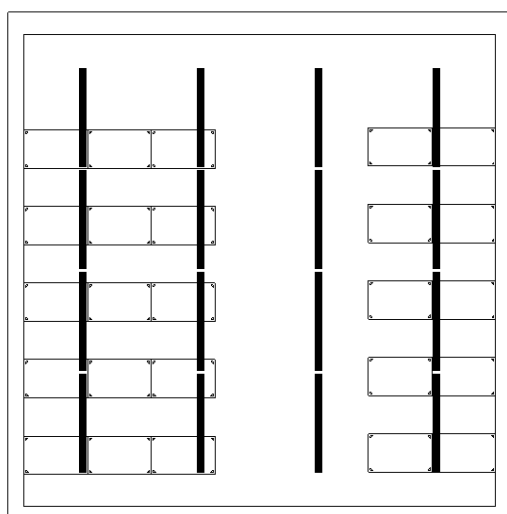


Figura 26. Planta da Sala. Disposição das mesas e luminárias. Modelo usado em DIALux

4.3 CARATERIZAÇÃO DA ENVOLVENTE

Embora as trocas de calor ocorram através de todas as superfícies que envolvem este espaço físico, algumas superfícies podem ser consideradas adiabáticas, devido ao contributo reduzido das suas trocas sobre o balanço global. Trata-se do caso das transferências que existem entre espaços em condições semelhantes, que são pouco significativas, uma vez que o gradiente de temperatura²⁴ é pequeno nessas condições. As paredes que se encontram sobre estas condições são aquelas que dividem salas adjacentes com a mesma geometria e orientação, tratando-se, exclusivamente, de superfícies interiores do edifício.

Os fluxos de calor que atravessam as paredes exterior e do corredor têm uma influência muito superior sobre a variação da temperatura na sala e são os únicos que se espera que influenciem substancialmente, de forma positiva ou negativa, o balanço térmico da sala. Desta forma, é razoável considerar todas as paredes adiabáticas²⁵, menos aquelas que dão para o corredor e exterior, como mostra a Figura 27. Definiu-se como condição fronteira na parede adjacente ao corredor uma temperatura uniforme e constante.

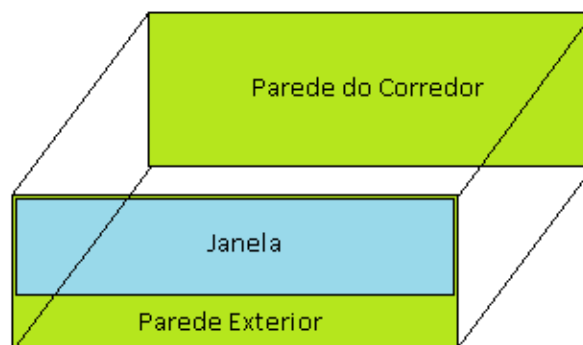


Figura 27. Perspetiva do modelo da sala. Paredes não adiabáticas (a verde) e janela (a azul). As restantes superfícies são consideradas adiabáticas.

²⁴vetor que nos indica a direção de crescimento da temperatura e a sua norma indica-nos a variação da temperatura por unidade de comprimento percorrida nessa direção

²⁵termo técnico que define uma superfície através da qual não ocorrem trocas de calor

4.3.1 PAREDES

O levantamento dos materiais de construção das paredes e o seu poder condutor foi feito em [7] e [11]. Estes dados são resumidos na Tabela 5.

Tabela 5. Constituição das paredes da sala

Elemento construtivo	Descrição dos materiais (Do exterior para o interior da sala)	U [W / (m ² K)]
Paredes interiores (Norte, Sul e Oeste)	Argamassa e reboco tradicional (A+R) Alvenaria de Tijolo furado de 15 cm A+R	1,8
Parede exterior (Este)	Betão armado pré-fabricado c/ 0,08 m Caixa-de-ar 0,09 m Tijolo furado de 11 cm A+R	1,48

4.3.2 JANELA

A janela presente na sala tem um vidro simples, incolor, de 6 mm e uma caixilharia de alumínio termolacada de correr sem corte térmico. O U resultante desta combinação é 5,4 W / (m²K) [7].

Segundo [9] a transmissividade do vidro é de 0.64 para pequenos comprimentos de onda.

Esta janela está equipada com um estore veneziano metálico exterior motorizado, cujas lamelas têm 8 cm de largura e um espaçamento entre si de 7 cm [11].

5 RESULTADOS

No presente capítulo, procede-se à análise dos resultados obtidos em várias simulações. Os dados climáticos usados nas simulações foram os medidos na estação meteorológica do Instituto Superior Técnico, situada no topo da torre sul, com uma altura de 50 m. Este estudo avalia os modelos sob condições nominais e para tal foi necessário verificar se os dados de entrada eram representativos dessas condições.

O primeiro subcapítulo destina-se à comparação dos modelos de simulação implementados: modelo térmico simplificado, elaborado em *Matlab*, e o modelo *EnergyPlus* (EP).

No segundo subcapítulo compara-se a variação das condições na sala com e sem controlo automático.

5.1 COMPARAÇÃO DOS MODELOS SIMPLIFICADO E ENERGYPLUS

Para validar a correta aplicação dos modelos teóricos no modelo simplificado comparam-se os seus resultados com os obtidos nas mesmas condições pelo modelo desenvolvido em *EnergyPlus*. Embora a validade dos resultados do *EnergyPlus* dependa da correta informação fornecida ao programa através do ficheiro *.idf*, partiu-se do princípio que não existia nenhum erro de input sempre que algo corria como expectável.

Para ter a noção dos fatores que mais contribuem para a diferença entre os resultados dos dois modelos separaram-se os modelos por módulos e validou-se cada um individualmente.

Para comparar as simulações dos dois modelos, escolheu-se um dia típico de verão e definiram-se as mesmas condições no interior para o instante inicial, para que ambas as simulações partissem do mesmo ponto.

1. Validação do modelo solar

O modelo solar congrega vários modelos teóricos: o modelo dos ângulos solares, o modelo das radiações solares incidentes e o modelo da transmissividade da envolvente do edifício. De seguida apresentam-se os resultados da aplicação de cada um destes modelos teóricos e comparam-se com os obtidos em *EnergyPlus*.

Existem várias funções que nos permitem relacionar a variável tempo com a posição solar e todas elas dependem de convenções no que respeita a ângulos de hora solar e ângulos de azimute. A convenção norte foi a escolhida para o modelo simplificado por ser a usada pelo *EnergyPlus*. No ANEXO A descreve-se algumas destas variáveis e apresenta-se, com maior detalhe, os modelos teóricos utilizados.

Na Figura 28 estão representados os resultados finais do modelo teórico dos ângulos solares implementado no modelo simplificado e os resultados obtidos pelo *EnergyPlus*.

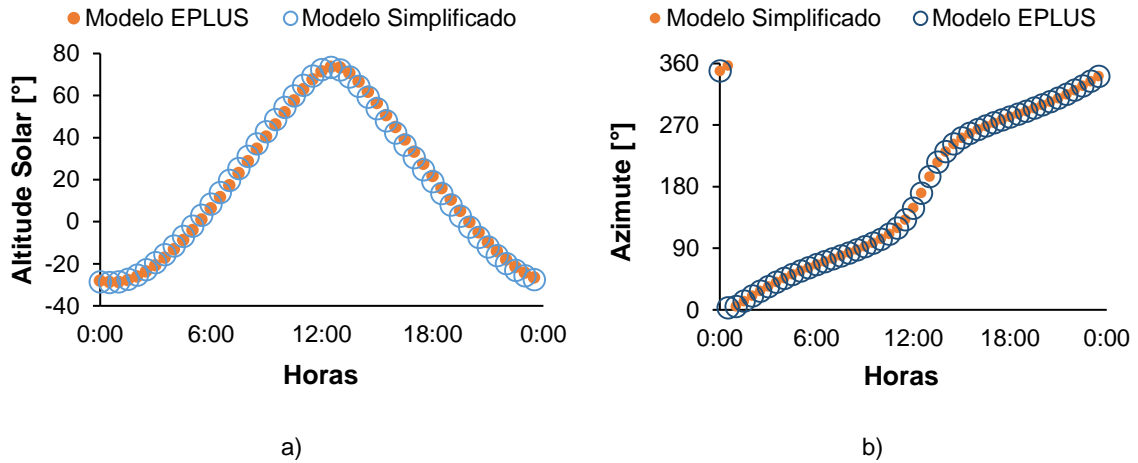


Figura 28. Variação dos ângulos de altitude solar (a) e de azimute (b) calculados através dos dois modelos para o dia 9 de julho.

Para estimar a radiação que chega a uma superfície na terra proveniente do sol, o modelo simplificado usa dados meteorológicos e equações — (3.9) a (3.12) — que permitem relacionar a radiação global horizontal com as radiações direta, difusa e refletida sobre o plano vertical. Na Figura 29 e na Figura 30 estão representados os resultados da aplicação destas relações que determinam a radiação sobre uma superfície vertical.

O modelo *EnergyPlus* calcula o fluxo de energia solar a partir dos dados presentes no ficheiro climático sobre as radiações incidentes na superfície da terra. Esta incoerência nas condições de referência pode justificar as diferenças nos resultados obtidos pelos dois modelos.

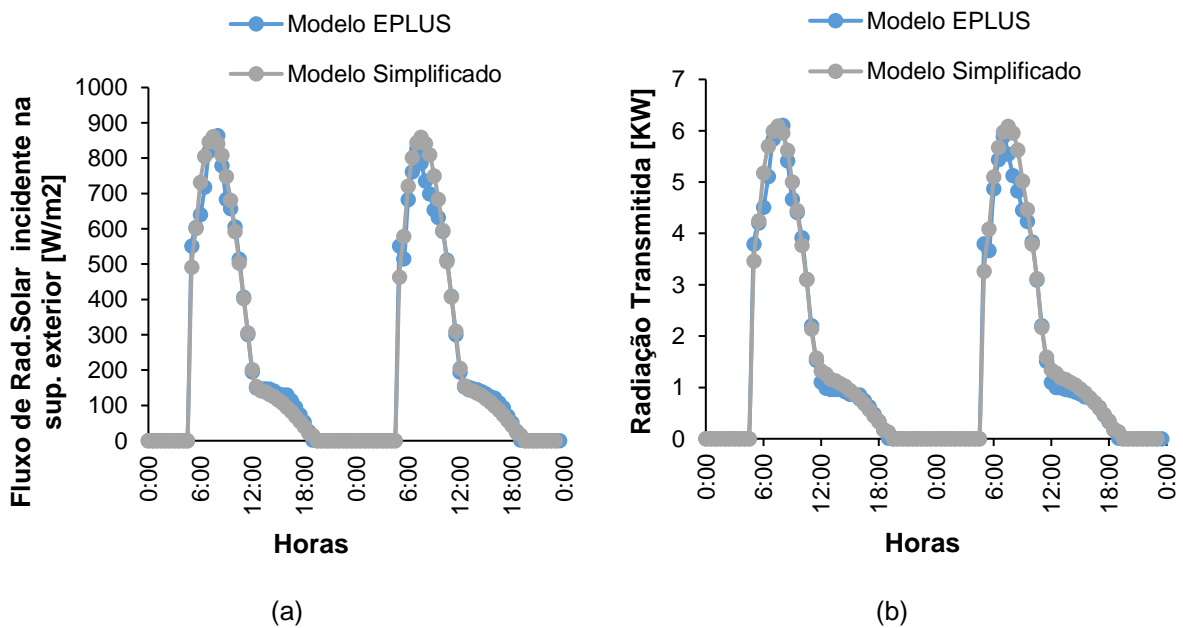


Figura 29. Resultados do modelo solar para a radiação incidente (a) e a transmitida (b)

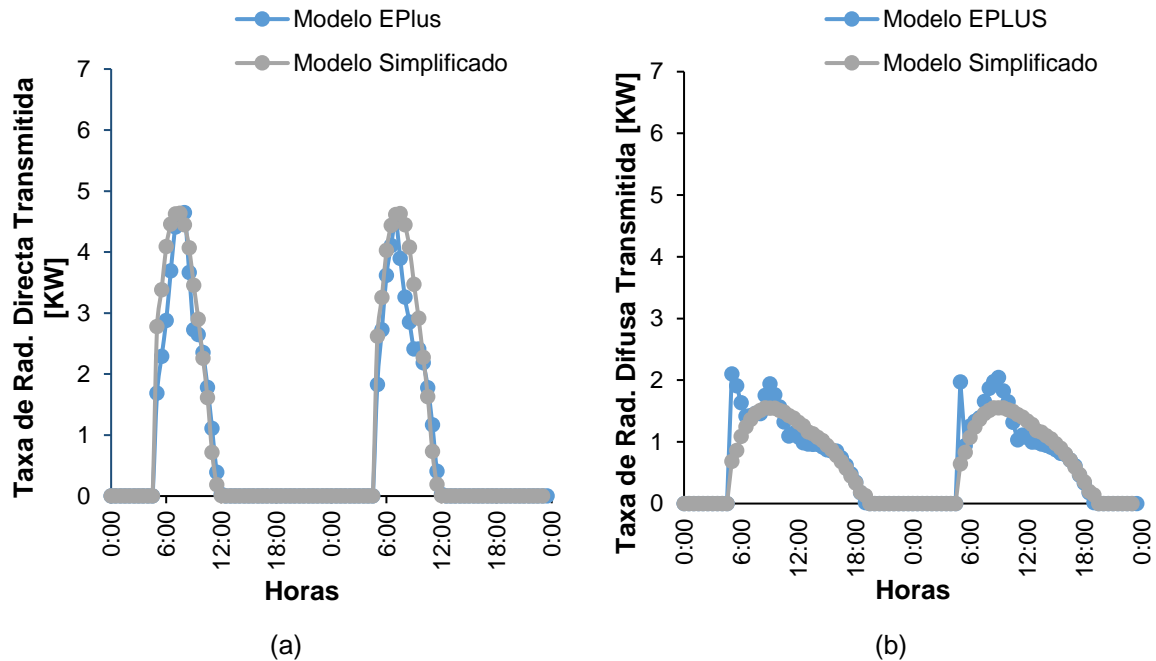


Figura 30. Resultados do modelo solar para a radiações transmitidas direta (a) e difusa (b)

As maiores diferenças observam-se para a taxa de radiação difusa transmitida. O modelo *EnergyPlus* apresenta uns picos que são imperceptíveis no modelo simplificado. Na origem destas diferenças pode estar o fator de ganho solar (SHGC) que é considerado constante no modelo simplificado mas não é claro se varia com os ângulos solares no *Energy Plus*. Contudo, estas diferenças representam uma pequena parte da taxa de radiação total transmitida e no geral os resultados dos dois programas estão muito aproximados.

2. Validação da temperatura média no interior

A temperatura no interior da sala sofre variações muito semelhantes quando calculada, nas mesmas condições, por cada um dos dois modelos, como mostra a Figura 31. Isto denota que a variação das cargas térmicas entre valores positivos e negativos coincidem no tempo. Na situação ilustrada na Figura 31, a sala encontra-se isolada e não é ventilada. Estes fatos podem explicar as elevadas temperaturas, mas é importante notar que a temperatura inicial foi imposta pelo *EnergyPlus*, que estuda as tendências de evolução da sala para determinar esta temperatura. O programa simplificado, por outro lado, depende da situação inicial e, por essa razão, para comparar os resultados impôs-se-lhe a mesma temperatura inicial que no *EnergyPlus*.

O facto de se atingirem temperaturas tão altas também pode estar relacionado com o facto destes dois modelos negligenciarem o sombreamento natural por parte das árvores e dos edifícios.

A amplitude térmica do meio é aproximadamente igual nos dois modelos. Porém, existe um ligeiro desfasamento nos resultados, mais acentuado no período de aquecimento, originando um erro quadrático médio — Root Mean Squared Error (RMSE) — igual a 1,75 °C.

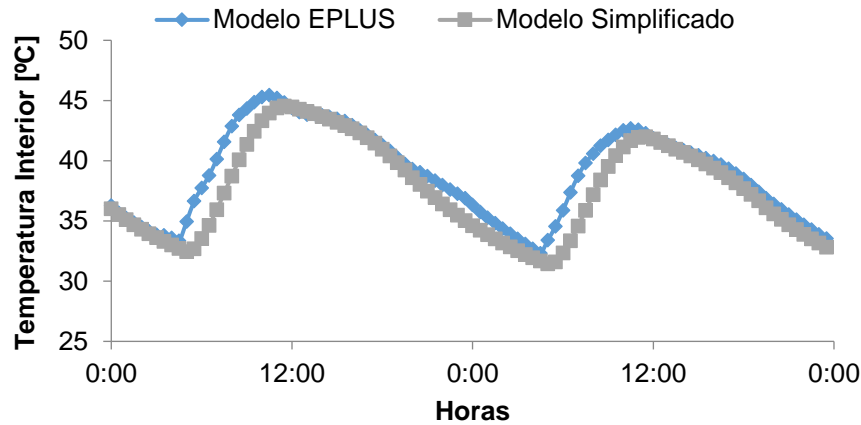


Figura 31. Variação da temperatura interior média da sala com base nos resultados dos diferentes modelos (dias 5 e 6 de julho)

Apesar das diferenças, podemos validar a correta aplicação dos procedimentos teóricos no modelo simplificado, uma vez que a temperatura apresenta aproximadamente a mesma variação para os dois modelos.

Para interpretar os resultados foi importante analisar os dados de entrada em cada um dos programas. O *EnergyPlus* tem como referência um histórico de dados climáticos sob forma de ficheiro *.epw* (*weather file*) e os dados disponíveis para Lisboa, nesse formato, foram recolhidos até ao ano 2005. O programa simplificado, por outro lado, utiliza dados referentes a 2016. Embora o uso de dados históricos seja comum em estudos energéticos, pelo simples motivo de que, em média, se mantém em geral, de ano para ano, é importante usar dados atuais se for necessário conhecer a evolução duma condição de forma mais precisa.

A validação teve por base valores nominais nos meses de janeiro e julho.

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS REAIS

Não foi possível validar o modelo simplificado através dos dados recolhidos pelos sensores de temperatura no interior da sala, uma vez que este modelo assume uma temperatura interna uniforme e as temperaturas medidas pelos sensores — em diferentes posições — diferem consideravelmente entre si em determinadas alturas do dia. Os dois sensores foram dispostos em pontos opostos da sala. O sensor 1 foi colocado perto da janela (Este) e da parede Sul e o sensor 2 junto da parede adjacente ao corredor no lado Norte.

Apesar de existirem gradientes de temperatura significativos no ambiente interior, foi possível constatar que a temperatura simulada pelo programa simplificado tinha a mesma ordem de grandeza que as temperaturas medidas pelos sensores — Figura 32.

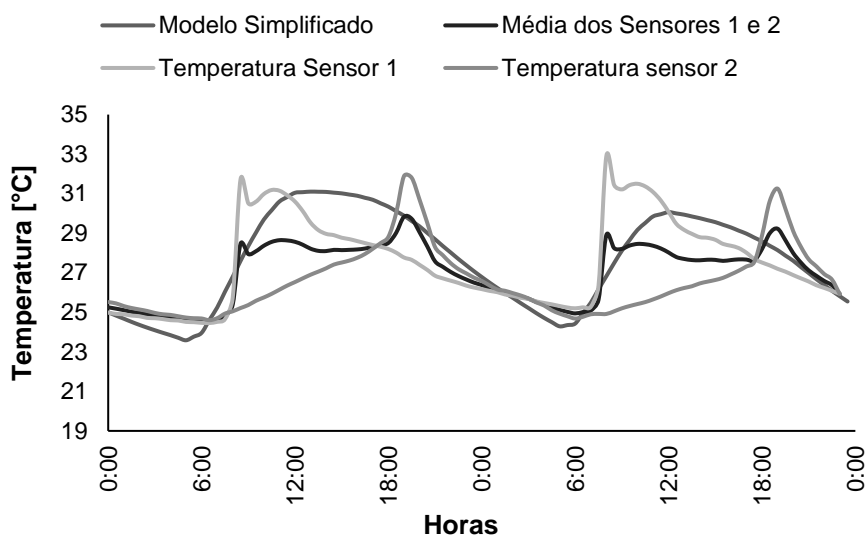


Figura 32. Variação real da temperatura na sala e comparação com os resultados do modelo simplificado nas mesmas condições iniciais (dias 9 e 10 de julho).

A partir da recolha de temperaturas no interior da sala por sensores DHT22²⁶, foi possível avaliar a discrepância de valores entre dois pontos opostos na sala. Entre os valores analisados, a média da diferença entre os dois sensores é aproximadamente de 2 °C e pode atingir 8 °C. Estes resultados demonstram que a hipótese de temperatura média pode levar a conclusões erradas na avaliação do conforto térmico a partir do método PMV-PPD.

A partir da Figura 32 poucas conclusões puderam ser tiradas sobre a validade modelo simplificado a respeito das trocas do sistema com o exterior.

5.3 CONTROLO MANUAL

O controlo manual aqui analisado pretende ser representativo dos comportamentos habituais dos utilizadores do espaço em questão. As simulações feitas, com recurso ao modelo simplificado, estudam dois cenários distintos para duas estações do ano diferentes.

Os estores presentes na sala V1.10 são elétricos e o controlo destes está inacessível à maioria das pessoas durante uma aula, sem descorar o facto que a maioria das pessoas não sabe operá-los. Por essas razões, é muito frequente que os estores permaneçam na mesma posição durante todo o dia, sendo quase um estado permanente.

Neste sentido, com o objetivo de avaliar os benefícios de um controlo automatizado sobre um controlo manual foi necessário avaliar a situação atual através das hipóteses de estores sempre abertos (EA) ou sempre fechados (EF).

²⁶ Estes sensores apresentam uma incerteza de 0,5 °C.

A Tabela 6 resume os resultados das simulações feitas com base no modelo simplificado, segundo uma ocupação de 25 pessoas num horário das 9h às 20h, nos dias 15 de janeiro (Inverno) e 9 de julho (Verão).

Comparando os dois cenários, pode observar-se que na hipótese de os estores já estarem abertos, e assim permanecerem durante todo o dia, a iluminância natural chega a uma área maior do plano de trabalho durante mais tempo. O nível de 500 lux é assim mantido com recurso a meios exclusivamente naturais durante mais tempo (>140 h.m²), tanto no verão como no inverno.

Como a condição EA permite aumentar o alcance da radiação solar dentro da sala e como as luzes artificiais apenas são acesas quando a iluminação natural é insuficiente para garantir o nível de 500 lux em determinados pontos da sala, a potência elétrica consumida apresenta uma poupança de, aproximadamente, 25% comparativamente à situação oposta — estores sempre fechados.

O cenário EF, requer um uso mais prolongado de sistemas de iluminação artificial, uma vez que o alcance da radiação solar é reduzido relativamente à primeira situação. Embora a potência elétrica consumida aumente, este cenário permite reduzir o desconforto térmico — PPD diminui —, uma vez que as cargas térmicas de origem solar são inferiores.

Tabela 6. Resultados de PPD, potência consumida e níveis de iluminância natural para diferentes cenários de controlo de estores

Cenários	Índices	Verão	Inverno
Estores sempre abertos (EA)	PPD > 50% [% horas]	100%	14%
	Consumo luminárias [KWh/dia]	15	16
	INPT* > 500 lux [h.m ²]	147	144
Estores sempre fechados (EF)	PPD > 50% [% horas]	73%	0%
	Consumo luminárias [KWh/dia]	20,4	20,4
	INPT* > 500 lux [h.m ²]	58	15

*A potência é calculada sabendo que cada luminária tem duas lâmpadas tubulares fluorescentes com potências de 58 W cada uma; INPT: Iluminância natural no plano de trabalho

O modelo analisado não tem em conta a variação das condições da sala durante os intervalos das aulas. Como será de esperar que os intervalos das aulas diminuam a carga de aquecimento na sala, a percentagem de pessoas descontentes (PPD) representa o pior cenário no período de Verão.

A abertura de portas para aumentar a ventilação da sala é uma estratégia regularmente utilizada nas alturas mais quentes do ano, no sentido de reduzir as cargas térmicas da sala. Porém, um estudo complementar feito no sentido de ter em conta a abertura de portas quando fica muito calor no interior, não mostrou melhorias significativas a nível de conforto térmico. Neste estudo considerou-se que a abertura da porta era feita quando o PMV correspondesse a um valor igual a 3. Nessas condições a abertura da porta não chegava para reduzir a temperatura naquele intervalo de utilização.

5.4 CONTROLO AUTOMÁTICO

Para avaliar os benefícios de um algoritmo de controlo combinado de iluminação e de climatização utilizou-se o modelo numérico simplificado e não se considerou a existência de comportamentos por parte dos utilizadores que pudessem ter influência sobre a variação da temperatura do meio interno.

O algoritmo de controlo desenvolvido promove os processos de ventilação com o objetivo de aproximar as condições na sala às condições de conforto segundo as normas ISO. A referência que este algoritmo utiliza para melhorar a sensação térmica junto dos ocupantes é a temperatura ótima de conforto nas diferentes épocas do ano — 24,5 °C no verão e 22 °C no inverno.

Os resultados obtidos para os índices PMV, tanto para a situação de controlo automático como para a situação de controlo manual, estão representados nas Figura 33 e Figura 34, para os períodos de verão e inverno, respetivamente. Os resultados representam previsões para dias específicos, escolhidos com base nos dados históricos meteorológicos, de forma a que as condições exteriores se aproximassem o mais possível das condições nominais das épocas respetivas.

Com base nos gráficos da Figura 33 e da Figura 34 é possível verificar a melhoria das sensações térmicas sentidas em geral, com a aplicação do algoritmo de controlo. Os gráficos representam a distribuição no tempo dos votos médios previstos (PMV) segundo a escala de sensações térmicas de ASHRAE.

Como foi constatado atrás na Tabela 6 do subcapítulo 5.3, a maioria dos ocupantes sente desconforto quando não existem períodos de sombreamento durante todo o dia na época de verão. Através da Figura 33 e da Tabela 7 é possível verificar que o algoritmo de controlo permite alterar esse estado de descontentamento unânime (PPD = 100%), sob condições de calor extremo (PMV = +3), para um estado de descontentamento inferior a 50% sob condições bastante mais aceitáveis na escala das sensações durante os meses quentes.

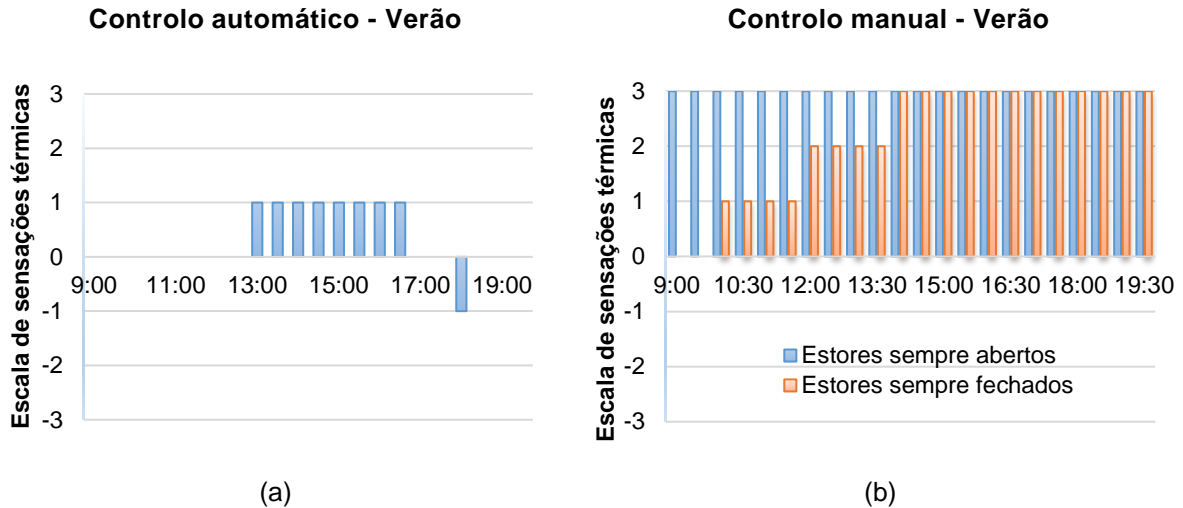


Figura 33. Previsão da Variação dos índices PMV para o dia 9 de julho de 2016 nas situações de controlo automático (a) e controlo manual (b).

Na época de inverno, o algoritmo também traz benefícios, como seria de esperar. Por comparação dos gráficos (a) e (b) da Figura 34 pode observar-se que o controlo automático permite uma maior aproximação a sensações térmicas neutras, durante todo o período de ocupação. As sensações térmicas sentidas variam entre variam entre -1 e 1, que constituem condições bem aceites pela maioria dos ocupantes como se pode concluir através da Tabela 7. Além do mais, como foi visto em 2.4, durante os períodos frios as pessoas dão preferência a ambientes ligeiramente aquecidos e vice-versa.

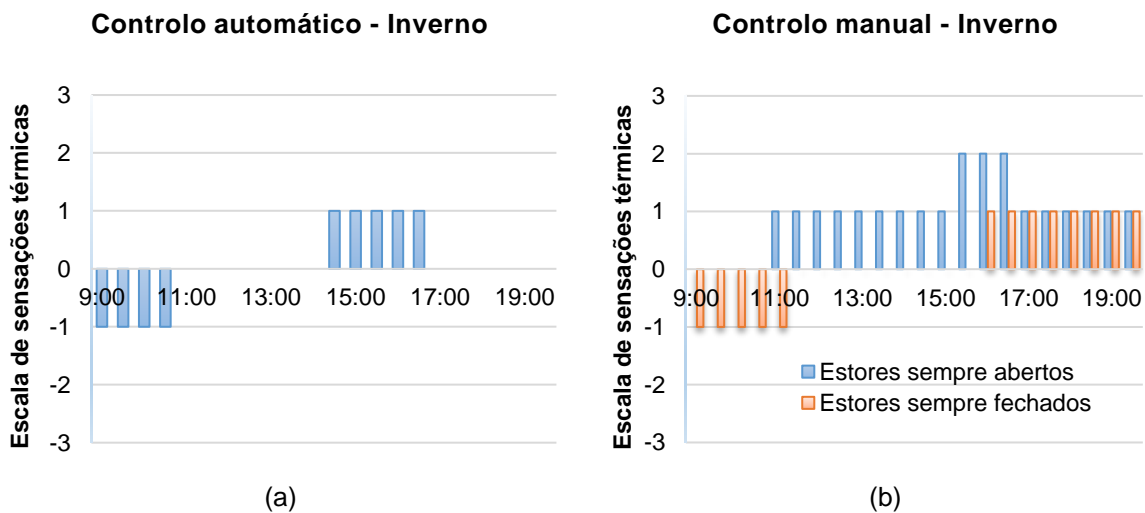


Figura 34. Previsão da Variação dos índices PMV para o dia 15 de janeiro de 2016 nas situações de controlo automático (a) e controlo manual (b).

Tabela 7. PPD, consumo e iluminação natural para o algoritmo de controlo automático

Índices	Verão	Inverno
PPD [%]	< 19%	< 25%
Consumo luminárias [KWh/dia]	15,5	17
INPT > 500 lux [h.m ²]	58	15

*A potência diária consumida é calculada sabendo que cada luminária tem duas lâmpadas tubulares fluorescentes com potências de 58 W cada uma; INPT: Iluminância natural no plano de trabalho

Além do equilíbrio das cargas térmicas e da melhoria das condições de conforto na sala, o algoritmo também demonstrou ser eficiente na gestão da iluminação. Embora os níveis de iluminação natural diminuam relativamente à situação de estores permanentemente abertos, como se pode observar — através da Tabela 6 e da Tabela 7 — por comparação dos valores de iluminância no plano de trabalho segundo a condição de 500 lux em horas por área; os valores da potência elétrica consumida não aumentam relativamente à mesma situação, uma vez que com o controlo automático apenas se ligam as luzes necessárias.

5.4.1 CONTROLO COMBINADO DO SISTEMA DE SOMBREAMENTO E DA VENTILAÇÃO

Os gráficos da Figura 35 representam a simulação da temperatura interior para o dia 9 de julho, quando o algoritmo de controlo automático desenvolvido é implementado.

No intervalo da manhã, os estores e as janelas permanecem fechados para reduzir os ganhos térmicos por radiação solar e aumentar as perdas térmicas por ventilação, respetivamente. A ventilação pela porta permite maiores perdas térmicas, durante este período. Pela equação (3.17) é claro que se a janela abrisse (janelas=1) e a porta fechasse (porta=0), iriam aumentar os ganhos térmicos por ventilação, uma vez que a temperatura do ar exterior é superior à temperatura no interior, a partir das 7:30 da manhã. No entanto, não é tão claro que se ambos os elementos (porta e janela) estivessem abertos, a ventilação fizesse aumentar os ganhos, uma vez que os gradientes de temperatura existentes favorecem a saída do ar da sala — assumindo que existe uma distribuição semelhante de aberturas na metade superior da fachada Este do edifício. Porém, o vento pode inverter esta tendência.

A ventilação não depende apenas da temperatura exterior, como à partida poderíamos pensar, e por isso, o fator de decisão para a abertura da janela não é unicamente a diferença de temperatura entre o exterior e o interior, como se pode constatar através dos gráficos da

Figura 35, no período da 13 h às 15 h — as janelas são abertas apesar da temperatura exterior ser superior à temperatura no interior.

No fim do dia, quando as condições se uniformizam no interior do edifício, devemos potenciar as perdas por ventilação abrindo as janelas.

Por volta da 1h da manhã, a janela fecha e a porta abre, o que vai permitir controlar a queda da temperatura. A temperatura no corredor é assumida como sendo constante e igual a 21 °C.

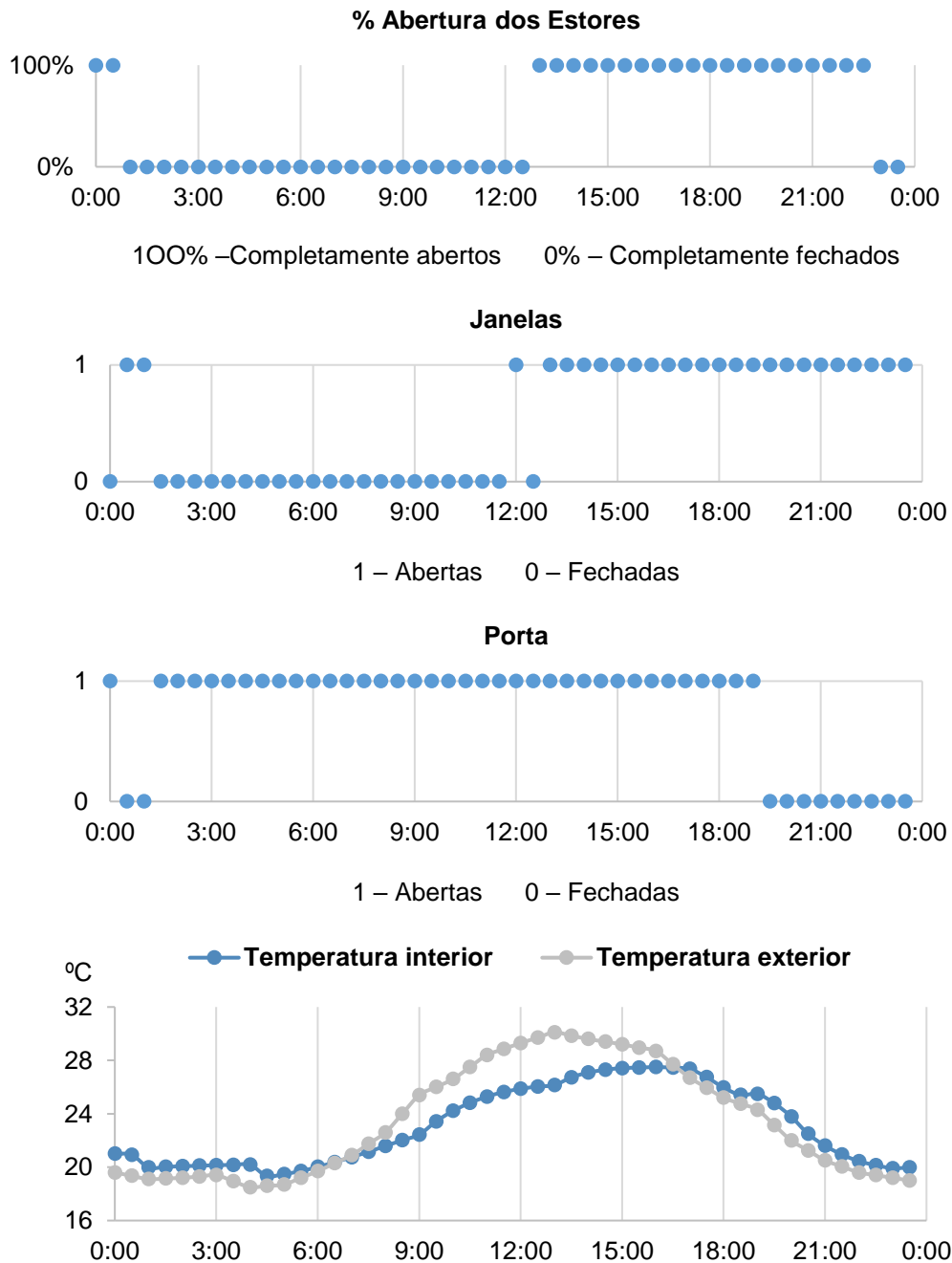


Figura 35. Temperatura interior e controlo implementado no dia 9 de julho de 2016

Similarmente, foi feito um estudo para avaliar a performance do algoritmo em dias frios. Os gráficos da Figura 36 representam a simulação da temperatura interior para o dia 15 de janeiro, quando o algoritmo de controlo automático desenvolvido é implementado.

Os estores estão fechados durante o período da noite para reduzir as perdas para o exterior e permanecem assim durante a manhã para reduzir o encadeamento solar. Repare que a altura solar é inferior no inverno. A ventilação pela janela é evitada para manter o ambiente interno aquecido e dá-se preferência à abertura das portas por permitir manter o ambiente interno dentro de amplitudes térmicas menores.

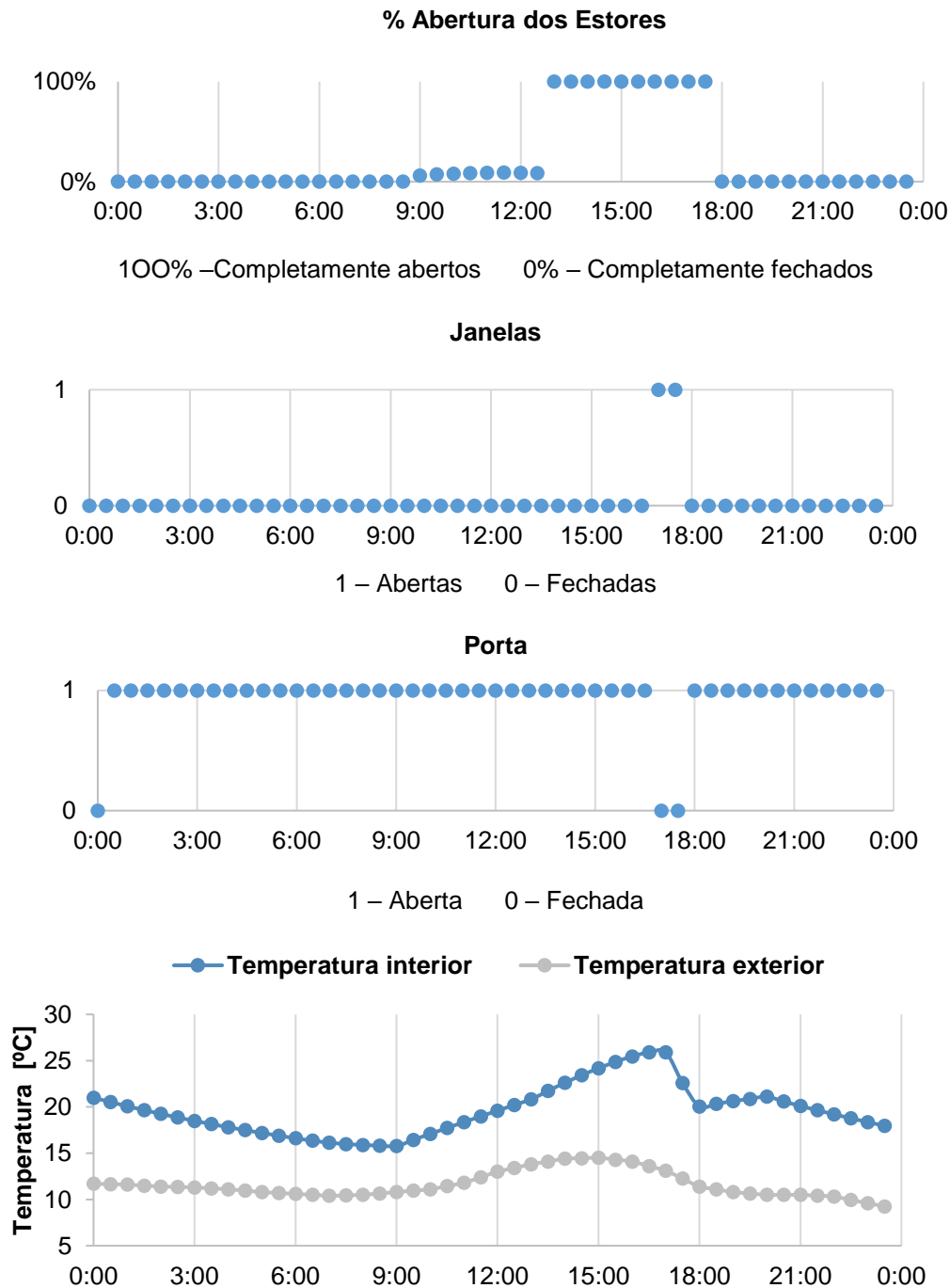


Figura 36. Temperatura interior e controlo implementado no dia 15 de janeiro de 2016

Após se analisar a Figura 35 e a Figura 36, pode observar-se que não são precisas medidas exaustivas para melhorar o conforto e reduzir os consumos elétricos. O algoritmo de gestão automático teve um controlo quase estático — com poucas intervenções ao longo do dia. Dessa maneira, é possível ter um controlo que esteja a cargo dos ocupantes, sem prejuízo sobre o conforto térmico sentido.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados pode-se concluir que as estratégias atuais de controlo manual são muito deficientes do ponto de vista de eficiência energética e de conforto térmico. Nestas condições, a implementação do algoritmo de controlo automático de iluminação e de climatização desenvolvido apresenta grandes hipóteses de sucesso. O algoritmo de controlo é capaz de reduzir em 26% o consumo energético por parte dos sistemas de iluminação, relativamente à situação de estores permanentemente fechados, e manter as sensações térmicas entre valores bem aceites pela maioria dos ocupantes — $PPD < 25\%$.

As poupanças energéticas verificadas não traduzem as poupanças máximas possíveis em cada uma das simulações, uma vez que o modelo simplificado utiliza o sistema luzes existente — com combinações de 4 luzes ligadas em série por cada interruptor — e é prevista uma maior eficiência energética se cada luminária funcionar individualmente. Desta forma, novas simulações devem ser feitas para avaliar a eficiência real deste algoritmo.

A partir da recolha de temperaturas no interior da sala por sensores, foi possível avaliar a discrepância de valores entre dois pontos opostos na sala. Entre os valores analisados, a média da diferença entre os dois sensores é aproximadamente de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pode atingir $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, pelo que se acredita que a hipótese de temperatura uniforme possa mascarar situações mais extremas e devesse ser desenvolvido trabalho complementar para estudar a distribuição de temperaturas na sala.

Outro aspeto importante em processos de ventilação é a variação da humidade absoluta que não foi tida em conta. Seria interessante estudar a variação desta propriedade através das relações existentes para misturas de ar húmido e avaliar a sua aceitação por parte dos ocupantes do espaço.

Com base nos resultados, pode concluir-se que segundo a norma dos comportamentos, nesta sala do pavilhão de Civil, é muito comum atingir condições de desconforto geral o que afeta inevitavelmente a produtividade e a capacidade de concentração dos alunos. Contudo, é precisa uma interpretação crítica sobre os resultados de PPD, uma vez as pessoas em geral toleram piores condições em edifícios naturalmente ventilados do que as previstas pelo modelo PMV-PPD.

O número de ocupantes foi mantido constante, igual a 25 pessoas, em todo o período de ocupação. Como a presença de pessoas tem influência sobre a potência dissipada pelos sistemas de iluminação e influência direta sobre potência calorífica perdida pelo grupo de ocupantes no total, seria interessante realizar simulações com diferentes distribuições de ganhos internos ao longo do tempo, para avaliar as sensações térmicas nessas condições.

O sombreamento das janelas, por parte das árvores e dos prédios, tem uma influência significativa sobre a radiação que chega ao espaço e, por essa razão, as cargas de aquecimento podem ver os seus valores reduzidos durante o período da manhã, afetando o controlo. Outro aspeto que faltou avaliar foi eficiência do controlo na presença de chuva. Nestas condições as janelas não podem ser abertas, o que condiciona, inevitavelmente, a ventilação. Também não foram considerados dias nebulados, uma vez que o modelo simplificado utilizado não foi projetado nesse sentido, embora

alterações sejam possíveis para incluir estes efeitos. Outro aspeto que se considera importante ser tido em consideração é o nível de ruído exterior, que pode condicionar a abertura da janela em dias quentes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEA, «World Energy Outlook 2016», *Renewable Energy*, 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html>. [Acedido: 20-Dez-2016].
- [2] M. Liu, Y. Huang, Z. Ma, Z. Jin, X. Liu, H. Wang, Y. Liu, J. Wang, M. Jantunen, J. Bi, e P. L. Kinney, «Spatial and temporal trends in the mortality burden of air pollution in China: 2004–2012», *Environ. Int.*, vol. 98, pp. 75–81, Jan. 2017.
- [3] Direção-Geral de Energia e Geologia, «Energia em Portugal», pp. 1–106, 2016.
- [4] «European Commission». [Em linha]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>. [Acedido: 06-Mar-2017].
- [5] UNEP, «Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers», *Sustain. Build. Clim. Initiative*, pp. 1–18, 2009.
- [6] «CAMPUS SUSTENTÁVEL». [Em linha]. Disponível em: <http://sustentavel.unidades.tecnico.ulisboa.pt/>. [Acedido: 20-Dez-2016].
- [7] J. Patrício, «Modelação dos Consumos Energéticos no Pavilhão de Civil do IST e Definição de Medidas de Racionalização dos Consumos Energéticos», Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, 2012.
- [8] M. Machado, «Algoritmos de gestão ativa da procura em edifícios», Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, 2014.
- [9] B. N. Salvador, «Metodologia Integrada de Gestão de Iluminação em Edifícios de Serviços Aplicada aos Edifícios do Campus do IST», Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, 2015.
- [10] A. Marchiori e Q. Han, «Distributed Wireless Control for Building Energy Management», Department of Mathematical and Computer Sciences, Colorado School of Mines, 2010.
- [11] R. Leal, «Simulação do desempenho energético e lumínico de estratégias de controlo de estores venezianos», Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2016.
- [12] E. Shen, J. Hu, e M. Patel, «Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies», *Build. Environ.*, vol. 78, pp. 155–170, 2014.
- [13] «EnergyPlus». [Em linha]. Disponível em: <https://energyplus.net/>. [Acedido: 14-Mai-2017].
- [14] V. S. K. V Harish e A. Kumar, «A review on modeling and simulation of building energy systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1272–1292, 2016.
- [15] Philips, «Lighting Theory». [Em linha]. Disponível em:

- <http://www.lighting.philips.com/main/education/lighting-university/lighting-university-browser/video/short-learning-videos.html>. [Acedido: 08-Set-2016].
- [16] Schéreder, «Conceitos básicos de iluminação - HOME». [Em linha]. Disponível em: <http://www.schreder.com/pt-pt/learningcenter/conceitosbasicosdeiluminacao>. [Acedido: 21-Fev-2017].
- [17] European Committee for Standardization, «CSN EN-12464-1; Light and Lighting - Lighting of work places», *CSN EN Stand.*, vol. Part 1: In, 2011.
- [18] D. Y. Goswami, F. Kreith, e J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, 2º Ed. 2000.
- [19] H. Boyer, A. Fakra, P. Lauret, e E. Lafosse, «A New Method to Calculate Indoor Natural Lighting by Improving “ Lumen Models ”», 2009.
- [20] K. A. Aishaibani, «Prediction of interior daylight under clear sky conditions», Thesis, School of Architectural Studies, 1996.
- [21] L. Lancelle, «Dados Fotométricos». [Em linha]. Disponível em: <http://www.aea.com.br/blog/dados-fotometricos/>. [Acedido: 12-Abr-2017].
- [22] M. A. R. Lopes, C. H. Antunes, e N. Martins, «Energy behaviours as promoters of energy efficiency: A 21st century review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n. 6, pp. 4095–4104, 2012.
- [23] L. Steg e C. Vlek, «Encouraging pro-environmental behaviour: An integrative review and research agenda», *J. Environ. Psychol.*, vol. 29, n. 3, pp. 309–317, 2009.
- [24] I. A. Raja, J. F. Nicol, K. J. McCartney, e M. A. Humphreys, «Thermal comfort: Use of controls in naturally ventilated buildings», *Energy Build.*, vol. 33, n. 3, pp. 235–244, 2001.
- [25] J. F. Nicol, «Characterising occupant behavior in buildings: Towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds heaters and fans», *Seventh Int. IBPSA Conf.*, pp. 1073–1078, 2001.
- [26] S. Herkel, U. Knapp, e J. Pfafferott, «Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings», *Build. Environ.*, vol. 43, n. 4, pp. 588–600, 2008.
- [27] B. Jeong, J. W. Jeong, e J. S. Park, «Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings», *Energy Build.*, vol. 127, pp. 206–216, 2016.
- [28] J. S. Park e H. J. Kim, «A field study of occupant behavior and energy consumption in apartments with mechanical ventilation», *Energy Build.*, vol. 50, pp. 19–25, 2012.
- [29] G. S. Brager, G. Paliage, e R. de Dear, «Operable windows, personal control and occupant comfort», *ASHRAE Trans.*, vol. 110 (2), pp. 17–35, 2004.
- [30] M. Paciuk, «The role of personal control of the environment in thermal comfort and satisfaction

- at the workplace», University of Wisconsin-Milwaukee, 1989.
- [31] R. Dear, G. Brager, e D. Cooper, «Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference», 1997.
- [32] L. Gynther, I. Mikkonen, e A. Smits, «Evaluation of European energy behavioural change programmes», *Energy Effic.*, 2011.
- [33] Edp, «Viva a sua casa com uma energia mais sustentável - Dicas de eficiência energética», 2012.
- [34] C. Gomes e C. A. Silva, «Intelligent Energy Management Systems in Office Buildings 2 . Bibliography review 2 . 1 Building Energy Management System (BEMS)».
- [35] «Thermal Comfort», em *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 2001, p. 8.1-8.29.
- [36] EN ISO 7730:2005 (CEN 2005), «Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV (predicted mean vote) and PPD (predicted percentage of dissatisfied) indices and local thermal comfort», 2005.
- [37] F. P.O., *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*. New York, 1970.
- [38] J. F. Nicol e M. A. Humphreys, «Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings», *Energy Build.*, vol. 34, n. 6, pp. 563–572, 2002.
- [39] R. and A. E. ASHRAE, American Society of Heating, «ASHARE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy», pp. 1–52, 2003.
- [40] L. G. Berglund e A. Fobelets, «Subjective human response to low level air currents and asymmetric radiation», em *ASHRAE Transactions*, 1987.
- [41] Soteris A. Kalogirou, *Solar energy engineering: Processes and systems*, 2ªEd. Elsevier Academic Press, 2009.
- [42] ASHRAE, «Airflow around buildings», em *ASHRAE Fundamentals Handbook*, Atlanta, GA, 2001.
- [43] ASHRAE, «Nonresidential Cooling and Heating», em *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 2001, p. 29.1-29.40, ISBN:978-1883413880.
- [44] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, e D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7ª Ed. Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc , ISBN: 978-0470-50197-9.
- [45] ASHRAE, «Fenestration», em *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 2001, p. 30.1-30.68, ISBN: 978-1883413880.

ANEXOS

ANEXO A. ÂNGULOS SOLARES

O sol é a fonte de energia mais importante que possuímos. Porém, a energia que recebemos do sol não é igual em qualquer altura do ano ou em qualquer parte do mundo. Esta está continuamente a variar. É possível, no entanto, prever a energia que chega, a cada instante, a cada ponto da crosta terrestre, uma vez que conhecemos o ciclo do movimento da terra à volta do sol, que se repete anualmente, com pequeníssimas variações.

Os modelos que descrevem a posição solar relativamente às coordenadas terrestres são bastante precisos. Nestes modelos, a posição do sol é descrita como um ponto num espaço tridimensional e pode ser determinada com base em dois ângulos e uma distância, relativamente a um observador. Um destes ângulos é a altitude solar, α , que representa o ângulo entre²⁷ direção dos raios solares e o plano horizontal. O outro é ângulo de azimuth, a_s , que representa o ângulo entre a projeção dum raio solar sobre o plano horizontal e a direção Norte-Sul. Existem duas convenções diferentes para este ângulo: uma mede o ângulo relativamente à direção sul e outro relativamente à direção norte.

O ângulo de altitude solar (α) é definido com base na equação (i).

$$\sin \alpha = \cos L \cos \delta_s \cos h_s + \sin L \sin \delta_s \quad (i)$$

L : Latitude [°]; δ_s : Declinação solar [°]; h_s : Ângulo de hora solar [°]

O ângulo de azimuth solar tanto pode ser calculado com base na equação (ii) (convenção sul), como na equação (iii) (convenção norte):

$$\sin a_s = \cos \delta_s \sin h_s / \cos \alpha \quad (ii)$$

$$\sin a_s = \frac{-\sin h_s}{\sin \theta} \quad (iii)$$

θ : ângulo de zénite[°]

²⁷ Dada a distância do sol à terra e dada a proporção do seu tamanho é de prever que os raios incidentes na terra tenham todos a mesma direção, aproximadamente.

ANEXO B. FATORES DE FORMA

É possível determinar o fator de forma de qualquer geometria com recurso à equação (iv) [44].

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (\text{iv})$$

Porém, obter a solução analítica da equação (iv), pode ser uma tarefa demorosa e pode ser contornada em casos específicos. Resultados para esta equação estão disponíveis em [44] sob a forma de gráficos e de equações simples, que relacionam o fator de forma à disposição e dimensão das superfícies. O procedimento usado para o cálculo dos fatores de forma das paredes resume-se em parte pela consulta dos resultados presentes na Figura 38.

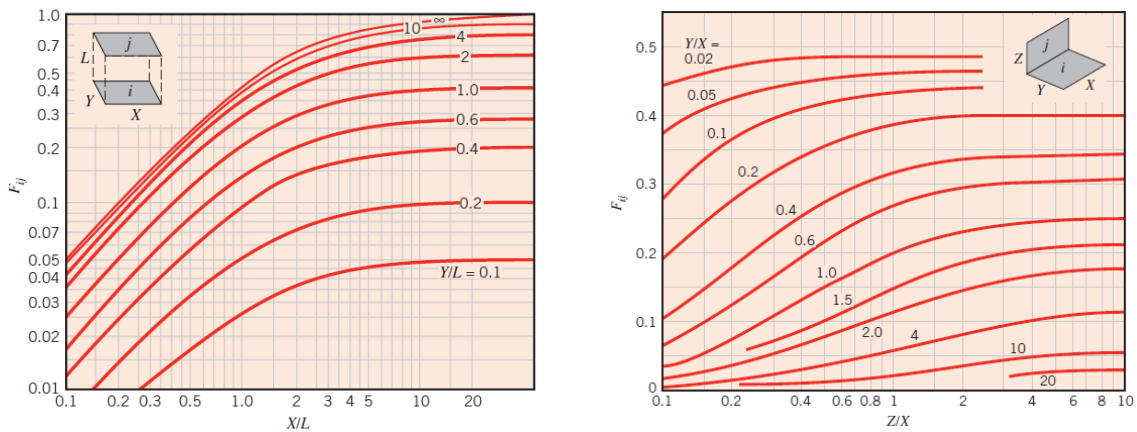


Figura 38. Fatores de forma para (a) superfícies retangulares paralelas e (b) superfícies retangulares perpendiculares [44]

Através das propriedades conhecidas dos fatores de forma pode-se a partir dos mesmos resultados tirar conclusões para outra configurações. Este facto irá ser explicado com mais clareza de seguida. Para calcular $F_{k, janela}$ é preciso fazê-lo isoladamente para cada superfície. A sala pode ser aproximada ao esquema da Figura 39.

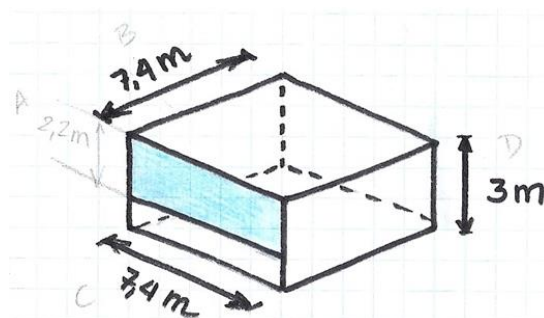
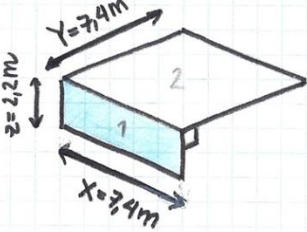
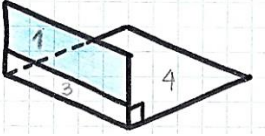

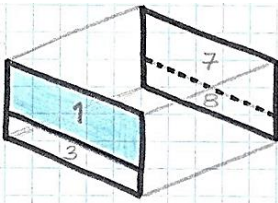


Figura 39. Modelo da Sala

<p>$F_{teto,janela}$</p> <p>Fração da radiação que abandona o teto e intersecta a janela</p>		$F_{teto,janela} = F_{21}$
<p>$F_{chão,janela}$</p> <p>Fração da radiação que é emitida pelo teto e incide sobre a janela</p>		$F_{chão,janela} = F_{4 \rightarrow (1+3)} - F_{4 \rightarrow 3}$
<p>$F_{parede lateral,janela}$</p> <p>Fração da radiação que é emitida por qualquer uma das paredes laterais e incide sobre a janela</p>		$F_{paredelateral,janela} = F_{(5+6) \rightarrow 1} = \frac{A_5 F_{51} + A_6 F_{61}}{A_5 + A_6}$ <p>Foi possível obter-se F_{61} a partir do sistema de equações que usa propriedades dos fatores de forma.</p> $\begin{cases} F_{(5+6) \rightarrow (1+3)} = \frac{A_5(F_{51} + F_{53})}{A_5 + A_6} + \frac{A_6(F_{61} + F_{63})}{A_5 + A_6} \\ A_6 F_{61} = A_5 F_{53} \end{cases}$
<p>$F_{parede corredor,janela}$</p> <p>Fração da radiação que é emitida por qualquer uma das paredes laterais e incide sobre a janela</p>		$F_{parede corredor,janela} = F_{(7+8) \rightarrow 1} = \frac{A_7 F_{71} + A_8 F_{81}}{A_7 + A_8}$ <p>Para obter F_{81} foi preciso um sistema de três equações escritas com base nas regras operativas dos fatores de forma.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Por simetria: $F_{81} = F_{37}$ 2. Pela Regra da Reciprocidade de fatores de forma: $A_3 F_{37} = A_7 F_{73}$ 3. Pela regra de adição de fatores de forma: $F_{(7+8) \rightarrow (1+3)} = \frac{A_7(F_{71} + F_{73}) + A_8(F_{83} + F_{81})}{A_7 + A_8}$ $\Rightarrow F_{81} = \frac{1}{2A_8} [(A_8 + A_7)F_{(7+8) \rightarrow (1+3)} - A_8 F_{83} - A_7 F_{71}]$

Repare que usando esta metodologia estamos a assumir hipóteses simplificadoras que apresentam uma aproximação bastante razoável da realidade, como:

- uniformidade da temperatura nas superfícies
- meio não participante
- paredes idelamente difusas com propriedades constantes

O ar é um meio participativo que apenas pode ser ignorado quando a distância percorrida pela radiação é relativamente pequena.

segunda opção como escolha é imprescindível o conhecimento de algumas regras básicas destes ficheiros:

- A informação está organizada por objetos (“*Objects*”) que se dividem em campos (“*fields*”). (No *IDFEditor* os objetos ainda são agrupados em grupos (“*Groups*”) para facilitar o processo de edição).
- Os campos são separados por vírgulas (,)
- O último campo é seguido por ponto e vírgula (;)
- Os comentários vêm a seguir a pontos de exclamação (!)

A Figura 41 representa um excerto dum ficheiro IDF aberto num editor de texto, onde se evidenciam estas regras.

```

Building,
  NONE,                !- Name
  0,                   !- North Axis {deg}
  Suburbs,             !- Terrain
  3.9999999E-02,       !- Loads Convergence Tolerance Value
  0.4000000,          !- Temperature Convergence Tolerance Value {deltaC}
  FullInteriorAndExterior, !- Solar Distribution
  25,                 !- Maximum Number of Warmup Days
  6;                  !- Minimum Number of Warmup Days
  
```

Figura 41. Excerto de ficheiro idf

Como usar a ferramenta?

Na pasta principal do programa, “EnergyPlusVx-x-x”, devemos clicar duas vezes com o botão direito do rato sobre *Ep_Launch.exe* e deverá surgir uma janela como na Figura 42.

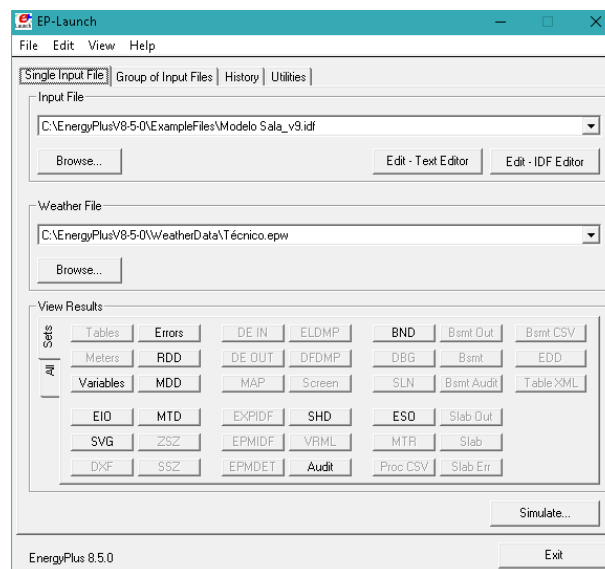


Figura 42. Janela do EP-Launch

Como interpretar os dados de um weatherfile?

Na diretoria C:\EnergyPlusVx-x-x\PreProcess\WeatherConverter existe uma função chamada weather.exe que deve ser utilizada para converter o ficheiro .epw para um formato .csv que pode ser lido em excel .

Deve ser tido em conta que de todas as variáveis presentes nos ficheiros climáticos só os parâmetros radiação global/total, temperatura de bolbo seco, humidade relativa e vento foram realmente medidos, os restantes foram estimados a partir deles.