



**Simulação do desempenho energético e lumínico de estratégias de  
controlo de estores venezianos**

**Rodrigo Mogárrio Freitas Leal**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

Orientadores: Professor Doutor Francisco Afonso Severino Regateiro

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

**Júri**

Presidente: Professor Doutor Augusto Martins Gomes

Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Professor Doutor Carlos Augusto Santos Silva

**Outubro 2016**



## **Agradecimentos**

Com esta dissertação finalizo o curso de engenharia civil e também uma importante etapa da minha vida. Como tal gostaria de deixar agradecimentos às pessoas que tornaram isto possível.

Gostaria de agradecer à minha família, aos meus pais pelo apoio que me deram e pela paciência que tiveram comigo e aos meus irmãos pela ajuda que me deram durante a dissertação.

Ao meu orientador Prof. Francisco Regateiro e à minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Maria Glória Gomes pela paciência, motivação, disponibilidade, conselhos, transmissão de conhecimentos, críticas construtivas e apoio ao longo da dissertação.

Ao Prof. Fernando Branco por ter sugerido a ideia de estudar sistemas de estores automatizados.

Ao engenheiro Paulo Chagas da Cruzfer por me ter facultado informações cruciais sobre os estores analisados neste trabalho.



## Abstract

Considering the benefits of daylight to humans and the inefficiency of manual blind operation by the users, automated blind control strategies represent an opportunity for daylighting improvement with both user visual comfort and building energy efficiency impacts.

In this work, several strategies for venetian blind control are proposed and simulated with building energy simulation software, using a DECivil IST office room as a case study. The strategies are simulated for different conditions, such as: façade orientation (South, East, West and North); blind position in relation to the window (interior or exterior); season (summer or winter); type of blind (simple venetian blinds or split blinds); and different climatic conditions (four European countries).

In order to quantify the performance of the control strategies performance indexes were created. The visual comfort performance index was calculated recurring to six different visual comfort metrics. The energy consumption performance index was calculated recurring to the final energy needs of the HVAC equipment and the electric lighting. Lastly the global performance index was calculated with the two other calculated indexes

A comparison of energy and visual comfort performance among strategies is made. As a final result, best suited strategies are recommended according to the conditions which the office is exposed to.

**Keywords:** Blind Automation, Blind Control Strategy, Energy Efficiency, Visual Comfort, Building Energy Simulation, Daylighting



## Resumo

Face aos benefícios da luz solar para o ser humano e à ineficiência inerente da operação manual de estores por parte dos utilizadores, as estratégias de operação automática de estores representam uma oportunidade de melhoria do aproveitamento da luz solar, quer para o conforto dos utilizadores quer para uma melhoria da eficiência energética de edifícios.

No presente trabalho foram propostas várias estratégias de controlo automático e outras estratégias estáticas de estores venezianos, tendo-se realizado simulações energéticas considerando-se como caso de estudo um gabinete do edifício do DECivil-IST. Estas estratégias foram simuladas 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).

Para medir o desempenho das estratégias construíram-se índices de desempenho. Consideraram-se seis métricas de conforto visual que foram agregadas em um índice de desempenho de conforto visual. Além disso, consideraram-se as necessidades energéticas finais do sistema AVAC e na iluminação energética, que foram agregadas num índice de desempenho de consumo energético. Estes dois índices foram posteriormente agregados num só índice de desempenho global.

Deste modo, pode comparar-se o desempenho energético e do conforto visual proporcionados por cada estratégia de controlo numa tentativa de perceber e recomendar qual a melhor, consoante as condições a que o gabinete está exposto.

**Palavras-chave:** Estores Automáticos, Estratégia de Controlo de Estores, Eficiência Energética, Conforto Visual, Simulação Energética de Edifícios, Iluminação natural





# Índice

Agradecimentos .....	i
Abstract .....	iii
Resumo .....	v
Índice.....	vii
Índice de tabelas .....	xi
Índice de figuras .....	xiii
Simbologia.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estrutura do Trabalho .....	2
2. Controlo automático da iluminação natural .....	3
2.1. Métricas de conforto visual.....	5
2.1.1. Métricas de quantidade de luz.....	6
2.1.1.1. Iluminância .....	6
2.1.1.2. Daylight Factor .....	8
2.1.1.3. Daylight Autonomy .....	9
2.1.1.4. Continuous Daylight Autonomy .....	10
2.1.1.5. Spatial Daylight Autonomy.....	10
2.1.1.6. Useful Daylight Illuminance.....	11
2.1.2. Métricas de uniformidade de iluminação .....	12
2.1.2.1. Rácios de iluminância .....	12
2.1.3. Métricas de encandeamento .....	13
2.1.3.1. Luminância .....	14
2.1.3.2. Rácios de luminância.....	15
2.1.3.3. Daylight Glare Index .....	17
2.1.3.4. New Daylight Glare Index.....	18
2.1.3.5. Daylight Glare Probability.....	19
2.1.3.6. Simplified Daylight Glare Probability .....	20

2.2. Controlo manual de dispositivos de sombreamento .....	20
2.3. Controlo automático de dispositivos de sombreamento.....	21
3. Simulação energética de estratégias de controlo automático de estores venezianos .....	29
3.1. Descrição do caso de estudo.....	29
3.1.1. Edifício - Pavilhão de civil .....	29
3.1.2. Gabinete.....	29
3.2. Metodologia .....	31
3.2.1. Estratégias de controlo .....	32
3.2.2. Medidas de desempenho.....	35
3.3. Descrição do <i>software</i> utilizado .....	38
3.3.1. Enery Plus.....	39
3.3.1.1. Energy Management System .....	41
3.3.2. MLE+.....	42
3.3.3. Modelo do gabinete .....	43
3.3.3.1. Location and Climate.....	45
3.3.3.2. Surface Construction Elements .....	46
3.3.3.3. Thermal Zones and Surfaces .....	46
3.3.3.4. Internal Gains .....	47
3.3.3.5. Daylighting .....	48
3.3.3.6. Zone HVAC Controls and Thermostats .....	49
3.3.3.7. Energy Management System .....	50
3.4. Métodos de simulação .....	50
3.4.1. Implementação das medidas de desempenho .....	51
3.4.2. Implementação das estratégias de controlo.....	53
4. Análise e discussão de resultados .....	57
4.1. Estores interiores Vs estores exteriores.....	57
4.1.1. Impacto do posicionamento dos estores no Verão .....	57
4.1.2. Impacto do posicionamento dos estores no Inverno.....	58
4.1.3. Impacto anual do posicionamento dos estores .....	60
4.2. Simulações de estores exteriores em Portugal no verão .....	61

4.2.1. Sul.....	61
4.2.2. Este, Oeste e Norte .....	65
4.3. Simulações de estores exteriores em Portugal no inverno.....	67
4.3.1. Sul.....	67
4.3.2. Este, Oeste e Norte .....	69
4.4. Simulações de estores exteriores noutros países europeus .....	71
4.4.1. Impacto das estratégias de controlo de estores na estação de Verão .....	72
4.4.1.1. Berlim, Alemanha.....	72
4.4.1.2. Sofia, Bulgária.....	73
4.4.1.3. Copenhaga, Dinamarca .....	73
4.4.1.4. Análise comparativa entre os diferentes países europeus .....	74
4.4.2. Impacto das estratégias de controlo de estores na estação de Inverno.....	74
4.4.2.1. Berlim, Alemanha.....	74
4.4.2.2. Sofia, Bulgária.....	75
4.4.2.3. Copenhaga, Dinamarca .....	75
4.4.2.4. Análise comparativa entre os diferentes países europeus .....	75
5. Conclusões .....	77
5.1. Desenvolvimentos futuros .....	79
Referências bibliográficas .....	81
Anexo A – Programa do EMS para o cálculo de métricas de conforto visual e medidas de desempenho .....	I
Anexo B – Programa em VBA para o cálculo das métricas de uniformidade de iluminação natural na superfície de trabalho .....	III
Anexo C – Programas para a implementação da estratégia 5 consoante as diferentes orientações da fachada.....	IV
Anexo D – Metodologia de simulação e respetivos programas .....	VI
Anexo E - Ajuste da posição da superfície de trabalho .....	XIV
Anexo F - Gráficos do consumo energético das simulações para Lisboa .....	XVI
Anexo G – Restante descrição do modelo .....	XVIII
Simulation Parameters.....	XVIII
Schedules .....	XVIII

Zone HVAC Forced Air Units..... XIX

Zone HVAC Equipment Connections ..... XX

Node-Branch Management..... XX

External Interface..... XX

Reports ..... XX

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Valores de iluminância na superfície de trabalho utilizados .....	7
Tabela 2 – Valores de iluminância utilizados na métrica Daylight Autonomy (DA) .....	10
Tabela 3 – Valores de iluminância utilizados na métrica DA <sub>con</sub> .....	10
Tabela 4 – Diferentes intervalos do Useful Daylight Illuminance (UDI) utilizados .....	12
Tabela 5 – Valores de referência dos índices de uniformidade de iluminância (U <sub>méd</sub> e U <sub>máx</sub> ) .....	13
Tabela 6 – Valores de luminâncias em ecrãs .....	17
Tabela 7 – Valores de referência de rácios de luminância .....	17
Tabela 8 – Valores do DGI e respetivas perceções de encandeamento (Chauvel et al., 1982) .....	18
Tabela 9 – Valores do DGP (Mardaljevic et al., 2012; Zelenay, 2011).....	19
Tabela 10 – Estratégias de controlo automático de estores utilizadas por outros autores.....	27
Tabela 11 - Desenho legendado das camadas de material que constituem as paredes exterior e interior .....	31
Tabela 12 – Estratégias de controlo.....	32
Tabela 13 – Fração de tempo e que os dispositivos de sombreamento se encontram ativos (Despacho n.º 15793-K/2013, 2013) .....	33
Tabela 14 – Métricas de conforto visual .....	35
Tabela 15 – Valores de referência de rácios de luminância .....	36
Tabela 16 – Pesos atribuídos a cada índice para o cálculo dos diferentes índices agregados .....	38
Tabela 17 - Métricas de conforto visual e respetivos métodos de simulação .....	52
Tabela 18 - Estratégias de controlo e respetivos métodos de simulação .....	53
Tabela 19 – Variáveis pré-definidas .....	54
Tabela 20 – Consumos médios (apenas climatização) por estratégia (entre todas as estratégias consideradas) dos estores interiores e exteriores por estação e total .....	61
Tabela 21 – Coordenadas de cidades estrangeiras simuladas (notação decimal) .....	72
Tabela 22 – Valor das distâncias arredondadas por defeito. ....	XV



## Índice de figuras

Figura 1 – Campo de visão horizontal (Aprile et al., 2014) .....	14
Figura 2 – Campo de visão vertical (Johnson, 2015) .....	15
Figura 3 – Panorama e Ergorama no campo de visão (Sutter et al., 2006) .....	16
Figura 4 – Diferentes zonas do campo de visão (Lee et al., 2009) .....	16
Figura 5 – Localização do IST em Lisboa (esquerda) e do pavilhão de civil no campus do IST (direita) .....	29
Figura 6 – Imagem 3D do gabinete (Faustino, 2012) .....	30
Figura 7 – Vista da parede interior, que está orientada para Oeste, de dentro do gabinete (esquerda), vista da parede interior, que está orientada para sul, de dentro do gabinete (centro), fotografia de parte do teto e de parte da parede interior norte do gabinete (direita), (Faustino, 2012) .....	31
Figura 8 – Exemplificação da distribuição de 60% do tempo em que os estores estão fechados (tracejado) consoante a orientação do vão envidraçado .....	33
Figura 9 – Diagrama das simulações efetuadas consoante as condições externas .....	34
Figura 10 – Ângulo de cut-off (Gomes, Santos, & Rodrigues, 2014) .....	34
Figura 11 – Distribuição dos pesos segundo categorias para o cálculo do índice agregado do desempenho global .....	37
Figura 12 – Esquema do programa Energy Plus (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013e) .....	39
Figura 13 – Diagrama das fases de simulação do EP e dos respetivos <i>calling points</i> (esquerda), interface do <i>EP-Launch</i> (direita) .....	42
Figura 14 – Interação do MLE+ com <i>softwares</i> de simulação e com o Matlab (Bernal et al., 2012) .....	43
Figura 15 – Planta de localização da superfície de trabalho e do utilizador no gabinete em estudo .....	45
Figura 16 – Planta de localização dos pontos de referência em relação à superfície de trabalho .....	48
Figura 17 – Planta de localização da grelha de pontos de referência (vermelho) no gabinete .....	49
Figura 18 – Movimento do sol no hemisfério Norte (House Plans Helper, 2015) .....	51
Figura 19 – Resultados da média das métricas de conforto visual para cada tipo de estratégias simuladas de verão para a orientação Sul .....	57
Figura 20 – Resultados da média das necessidades de iluminação elétrica (esquerda) e das necessidades finais de energia (direita) para cada tipo de estratégias simuladas de verão para a orientação Sul .....	58
Figura 21 – Resultados das métricas de conforto visual para cada tipo de estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul .....	59
Figura 22 – Resultados das necessidades de iluminação elétrica (esquerda) e das necessidades finais de energia (direita) para cada tipo de estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul .....	59
Figura 23 – Resultados das métricas de conforto visual para as estratégias simuladas de verão para a orientação Sul .....	62
Figura 24 – Índices agregados das estratégias simuladas de verão para a orientação Sul .....	65
Figura 25 – Índices agregados das estratégias simuladas de verão para as orientações Este (esquerda), Oeste (centro) e Norte (direita) .....	66

Figura 26 – Resultados das métricas de conforto visual para as estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul .....	67
Figura 27 – Índices agregados das estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul .....	69
Figura 28 – Índices agregados das estratégias simuladas de inverno para as orientações Este (esquerda), Oeste (centro) e Norte (direita).....	71
Figura 29 – Índices agregados de conforto visual (esquerda), das necessidades energéticas (centro) e de desempenho global (direita) para as simulações em todas as cidades simuladas para a orientação sul no verão .....	74
Figura 30 – Índices agregados de conforto visual (esquerda) e das necessidades energéticas (direita) para as simulações em todas as cidades simuladas para a orientação sul no inverno .....	76
Figura 31 – Programa do SEM para calcular métricas de conforto e consumos energéticos .....	I
Figura 32 – Programa do EMS para inicializar medidas de desempenho e definir mudança de horário .....	II
Figura 33 - Esquema de funcionamento do programa VBA para o cálculo das métricas uniformidade.....	III
Figura 34 – Programas do EMS para a implementação da estratégia 5 para a orientação Este .....	IV
Figura 35 - Programas do EMS para a implementação da estratégia 5 para a orientação Sul .....	V
Figura 36 – Programas do EMS para a implementação da estratégia 5 para a orientação Oeste .....	V
Figura 37 – Esquema geral do processo de simulação das estratégias de controlo .....	VI
Figura 38 – Esquema de funcionamento do programa multiplicar.....	IX
Figura 39 – Imagens de alterações da diretoria devido ao programa preparação de inverno .....	X
Figura 40 – Esquema de funcionamento do programa preparação geral .....	XI
Figura 41 – Esquema simplificado de funcionamento de co-simulação e interação com variáveis do EP e do programa de preparação geral .....	XIII
Figura 42 – Posição da superfície de trabalho em relação à parede exterior (esquerda), diagrama exemplificativo do cálculo de iluminâncias médias e rácios entre estas (direita) .....	XIV
Figura 43 - Necessidades energéticas das simulações de verão para todas as orientações.....	XVI
Figura 44 - Necessidades energéticas das simulações de inverno para todas as orientações.....	XVII



## Simbologia

ADENE	Agência para a Energia
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
CDA	Continuous Daylight Autonomy
CEI	Comunidade dos Estados Independentes
CIBSE	The Chartered Institution of Building Service Engineers
CRT	Cathode Ray Tube
DA	Daylight Autonomy
DECivil	Departamento de Engenharia Civil
DF	Daylight Factor
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DGI	Daylight Glare Index
DGI <sub>N</sub>	New Daylight Glare Index
DGP	Daylight Glare Probability
DGP <sub>S</sub>	Simplified Daylight Glare Probability
$E_{m\acute{a}x}$	Iluminância máxima na superfície em causa (lux)
$E_{m\acute{e}d}$	Iluminância média na superfície em causa (lux)
$E_{m\acute{i}n}$	Iluminância mínima na superfície em causa (lux)
EMS	Energy Management System
EP	Energy Plus
$E_p$	Iluminância de um ponto numa determinada superfície
EPW	Energy Plus Weather
Erl	Energy Plus Runtime Language
EU	European Union
$G_i$	Glare Index
HACA	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
ID	Input Data File
IEA	International Energy Agency
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IS <sub>i</sub>	Índice Agregado da estratégia i
IST	Instituto Superior Técnico
LCD	Liquid Crystal Display
LEED	Leadership in Energy and Environment Design
LTI	Laboratório de Tecnologias e Informação
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
IWEC	International Weather for Energy Calculations
LEED	The Leadership in Energy and Environmental Design
$L_\gamma$	Luminância
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Habitação
$\bar{R}_{ij}$	Índice normalizado j da estratégia i
rph	Renovações por hora
sDA	Spatial Daylight Autonomy
SCE	Sistema de Certificação Energética de Edifícios
UDI	Useful Daylight Illuminance
UE	União Europeia
$U_{m\acute{a}x}$	Iluminância máxima na superfície em causa (lux)
$U_{m\acute{e}d}$	Iluminância média na superfície em causa (lux)
$U_{m\acute{i}n}$	Iluminância mínima na superfície em causa (lux)
US	United States of America

UTC	Universal Time Coordinated
VBA	Visual Basic for Applications
WEST	Western European Summer Time
WET	Western European Time

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A eficiência energética tem grande importância no contexto ambiental, sendo uma das áreas relevantes para limitar o consumo energético e diminuir as emissões de gases de estufa. Além disto, estima-se que vai ainda existir um crescimento demográfico mundial e da conseqüente procura de energia. Estimativas apontam ainda para 1,2 biliões de pessoas, que representa 17% da população mundial, sem acesso a energia elétrica (OCDE & IEA, 2015). Segundo World Energy Council (2013), prevê-se um aumento da procura de energia entre 27% a 61% até 2050.

A União Europeia tem regulamentação com vista a promover o aumento da eficiência energética, a redução da emissão de gases de estufa e o aumento da utilização de energias renováveis em todos os países membros (Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, 2010, 2012, 2014). A motivação deste tipo de medidas é económica e ambiental. A eficiência energética é encarada como um recurso energético necessário para manter a economia da União Europeia competitiva e para diminuir a dependência externa de energia. Além disto existe uma preocupação ambiental de redução das emissões de gases de estufa de modo a mitigar os efeitos do aquecimento global. A União Europeia tem como objetivo reduzir os consumos de energia em 20% até 2020 e 27% adicionais até 2030 como uma das metas ambientais.

Na União Europeia os edifícios representam 40% do consumo total de energia e por essa razão, é um dos setores com maior potencial de impacto na eficiência energética. Destes edifícios, 90% são privados, o que leva à necessidade de financiamento público (algum desse financiamento é de fundos europeus) de modo a promover a eficiência energética.

Melhorar a eficiência energética de edifícios pode ser feito com recurso a elementos passivos ou ativos. Elementos passivos são elementos que não reagem dinamicamente a variações ambientais, tais como: isolamento térmico, caixilharias, vidros, lâmpadas mais eficientes, entre outros dispositivos de sombreamento não automáticos. Elementos ativos referem-se a elementos que se adaptam à mudança de fatores ambientais como: dispositivos de sombreamento automático, controlo de iluminação elétrica, sistemas de controlo de temperatura, entre outros. Este trabalho foca-se na melhoria da eficiência energética através do controlo automático de dispositivos de sombreamento, em particular estores venezianos simples e estores venezianos de dupla orientação.

Nesta dissertação foi realizado um conjunto alargado de simulações energéticas de um edifício de modo a que se pudessem testar diferentes estratégias de controlo de estores venezianos e permitir a sua comparação entre vários cenários. O ambiente de simulação permitiu comparações do mesmo modelo face a fatores ambientais diferentes, o que de outro modo não seria possível. Estas simulações foram feitas num modelo de um gabinete singular real do edifício do DECivil no campus da alameda do IST num *software* de simulação térmica de

edifícios, o *Energy Plus*. Além disto foram utilizados outros programas auxiliares na preparação, execução e análise de resultados destas simulações tais como: Matlab (incluindo MLE+); Excel.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo simular várias estratégias de controlo de estores aplicados a um gabinete singular para diferentes condições, especificamente: diferentes orientações da fachada; diferentes posições dos estores em relação à janela (interior ou exterior); diferentes períodos do ano (verão e inverno); diferentes tipos de estores venezianos (simples ou de dupla orientação); diferentes localizações geográficas. Com este estudo pretende-se analisar condições de controlo de estores venezianos, o desempenho energético, condições de conforto visual das diferentes estratégias para as diferentes condições às quais está sujeito o gabinete e identificar qual a estratégia dinâmica mais indicada para cada situação. Esta dissertação foi focada sobretudo em Lisboa mas também foram analisadas simulações para Berlim na Alemanha, Copenhaga na Dinamarca e Sofia na Bulgária.

## **1.3. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos cuja descrição dos conteúdos apresentada de seguida.

O capítulo 1 diz respeito à introdução deste trabalho, do tema e do contexto em que foi considerado.

No capítulo 2 são explicados alguns dos efeitos da luz natural no ser humano, bem como algumas das preferências relativamente à iluminação de espaços de trabalho por parte dos utilizadores. São também evidenciados alguns casos de poupança energética devido ao controlo adequado de estores. Além disso, descrevem-se várias métricas de conforto visual utilizadas por outros autores separadas em três categorias: quantidade de luz; uniformidade de iluminação; encandeamento. Descreve-se também as razões que levam os utilizadores a operar os estores manualmente, por vezes de maneira errada ou ineficiente. Por fim explicam-se algumas preocupações a ter com a implementação de sistemas de controlo automático de estores e descrevem-se vários tipos de controlo automático de estores utilizados por outros autores.

No capítulo 3 é descrito o gabinete que foi modelado. De seguida, descrevem-se as medidas de desempenho energético e de desempenho de conforto visual propostas para utilização nas simulações. Por último descreve-se o *software* utilizado para as simulações, que foram o *Energy Plus* (EP) e MLE+. É ainda apresentado detalhadamente a modelação do gabinete no EP. Finalmente, é descrita a implementação no *software* das medidas de desempenho e das estratégias de controlo descritas no capítulo anterior.

No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados das simulações.

No capítulo 5 referem-se as principais conclusões deste trabalho e sugere-se algum trabalho futuro a realizar no seguimento desta dissertação.

## 2. Controlo da iluminação natural

A IESNA (IESNA, 2000) define luz como a energia radiante que seja capaz de estimular a retina e causar uma sensação visual. A luz visível tem um espectro entre 380 nm e 780 nm e pode ter origem elétrica ou natural.

A luz elétrica é emitida por lâmpadas e tem a vantagem face à luz natural de estar disponível a nível constante durante todo o dia e durante a noite. Apesar disto os espectros emitidos por este tipo de iluminação são geralmente menos completos e mais concentrados na zona do espectro visível mais sensível do olho humano de modo a obter uma maior eficiência luminosa, isto tem como consequência uma menor capacidade de se distinguirem as cores (Kelly & O'Connell, 1997).

A luz natural tem a sua origem no Sol e tem um espectro completo que abrange todos os comprimentos de onda da luz visível. Além disto é uma fonte luminosa de grande intensidade, podendo uma claraboia com 1 m<sup>2</sup> ter aproximadamente 100000 lm em dias de céu limpo e entre 20000 lm e 30000 lm em dias de céu nublado (David et al., 2011).

A luz natural tem outros efeitos biológicos no ser humano que evoluiu ao longo de milhares de anos sendo sujeito a vários ciclos temporais e desenvolveu relógios biológicos que lhe permitem seguir o progresso de cada ciclo. Um destes relógios é o denominado *relógio circadiano*, o qual acompanha o período diário, que está relacionado com a iluminação. A dessincronização entre o relógio circadiano e o ambiente externo pode acontecer devido a pouca exposição à luz solar, o que pode afetar negativamente a saúde (Boyce et al., 2003; Gery & Koeffler, 2010; Golombek et al., 2013; Pauley, 2004).

A iluminação natural tem vários efeitos benéficos para a saúde. Estudos indicam que exposição a luz solar melhora a sensação de bem-estar e reduz a sonolência (Aries, 2005; Kaida et al., 2006; Kosuke et al., 2006; van Bommel, 2006), embora isto também seja observado para a luz elétrica (Aries, 2005; Smolders et al., 2012). A presença de luz natural é particularmente importante em tarefas que exijam a distinção de cores. Isto é relevante pois a luz solar tem um espectro mais completo do que a iluminação elétrica comum (Boyce et al., 2003).

O estudo Heschong Mahone Group (1999a) encontrou uma correlação positiva entre a iluminação natural e melhor desempenho académico em várias escolas e um outro estudo dos mesmos autores (Heschong Mahone Group, 1999b) encontrou uma correlação positiva entre a iluminação natural e aumento de vendas em várias lojas. Este último estudo sugere uma possível correlação positiva entre a iluminação natural e a produtividade noutras áreas de trabalho.

Por outro lado, o excesso de luz também deve ser evitado, podendo causar condições de desconforto lumínico, em particular de encandeamento. O encandeamento é em geral separado em dois tipos: encandeamento incapacitante e encandeamento de desconforto.

O encandeamento incapacitante ocorre quando, a presença excessiva de luz no olho, causa perda de visibilidade, quando a visão é parcialmente ou totalmente impedida (Ruck et al., 2001), e quando causa perda

de desempenho de conforto visual na execução de tarefas. Este tipo de encandeamento é pouco importante para aplicações em espaços interiores, mas relevante em estradas (IESNA, 2000).

O encandeamento de desconforto causa desconforto por parte dos utilizadores mas não tem um impacto negativo na visibilidade ou no desempenho de conforto visual. O funcionamento deste tipo de encandeamento não é ainda muito bem entendido (IESNA, 2000; Lee et al., 2009; Ruck et al., 2001). No entanto tentativas de quantificar e medir este fenómeno foram feitas com base em várias variáveis, tais como: tamanho da fonte de encandeamento; luminância; número de fontes de encandeamento; posição das fontes de encandeamento no campo de visão; luminância de fundo (Ruck et al., 2001).

Em Suk et al. (2013) propõe-se a separação entre encandeamento absoluto e encandeamento relativo. O encandeamento absoluto ocorre para fontes luminosas com níveis muito altos de luminância, este tipo de encandeamento causa desconforto e dano nos recetores visuais. O encandeamento relativo é causado por níveis de encandeamento aos quais o olho humano se consegue adaptar, sendo medido através dos contrastes no campo de visão.

Em vários estudos (Chauvel et al., 1982; Osterhaus, 2005; Ruck et al., 2001; Sutter et al., 2006) é sugerido que a suscetibilidade ao encandeamento é maior com iluminação elétrica do que com iluminação solar, dando assim importância à vista disponível através de uma janela.

De facto os utilizadores preferem ter vista para o exterior desde que esta não cause encandeamento (Santos, 2011; Technical Committee CEN/TC 169, 2002; Vine et al., 1998). Em Santos (2011) 84% dos utilizadores inquiridos responderam que era muito importante a presença de janelas no ambiente de trabalho. Além disto, em edifícios de escritórios existe geralmente uma preferência, por parte dos utilizadores, de ter um lugar perto da janela. Isto deve-se à vontade de ter uma vista e a presença de luz solar (Aries, 2005; Zhang & Barrett, 2012).

Vários estudos apontam para a preferência de iluminação natural face a iluminação elétrica (Foster & Oreszczyn, 2001; Galasiu & Veitch, 2006; Osterhaus, 2005; Santos, 2011). Em (Santos, 2011) verificou-se que 67% das pessoas preferem exclusivamente luz solar e o número sobe para 99,5% quando também se considera quem prefere uma combinação entre luz solar e luz elétrica.

Em Zhang & Barrett (2012) verificou-se que mesmo em situações de desconforto visual alguns utilizadores baixavam apenas metades dos estores para que continuassem a ter vista para o exterior. Esta preferência estende-se a sistemas de controlo automático (Ruck et al., 2001).

Para além da preferência pela iluminação natural no conforto visual do utilizador há que ter em conta também o impacto no consumo energético de sistemas de iluminação/sombreamento. O controlo de estores quer seja manual quer em particular, automático, tem impacto diferente no consumo energético, consoante os tipos de controlo utilizados. Controlos que dão prioridade à vertente térmica terão menor consumo energético mas também terão níveis de satisfação e aceitação menores por parte dos utilizadores. Um bom sistema de

automação de estores terá sempre de ser um balanço entre poupança energética e conforto do utilizador (Chaiwiwatworakul et al., 2009; Lee & Selkowitz, 1994; Lindelöf, 2007; Oh et al., 2012; Ruck et al., 2001).

Em Oh et al. (2012) foram simulados seis tipos de controlo e avaliados os consumos energéticos de cada um. O tipo de controlo de referência foi considerado como sendo um escritório sem estores, o seu consumo energético total foi de 7536 kWh. Quatro das simulações foram feitas com ângulo da lamela constante, três com diferentes valores de refletância em toda a lamela e uma com valores diferentes de refletância na frente e no tardo da lamela. Os consumos totais foram 79%, 89% e 103% do caso de referência por ordem da maior para a menor refletância. Na simulação com diferentes valores de refletância na frente e no tardo da lamela o consumo foi de 75% do caso de referência. O outro tipo de controlo acionava os estores se a radiação incidente na superfície de trabalho fosse superior a  $50 \text{ W/m}^2$  e o seu consumo foi de 71% do caso de referência.

Em DiBartolomeo et al. (1996) quando comparado a estores com ângulo de lamela fixo os estores com controlo automático originaram poupanças energéticas de 37% a 75%, para fachadas orientadas para sul, e 51% a 71%, para fachadas orientadas para sudoeste.

Em Athienitis & Tzempelikos (2002) foi testado um método de controlo automatizado de estores venezianos e verificaram-se poupanças na iluminação elétrica até 75% nos dias de céu nublado e até 90% em dias de céu limpo em relação à situação de ausência de sistema automático.

Em Chaiwiwatworakul et al. (2009) simularam-se várias estratégias de controlo automático de estores e uma delas proporcionava poupanças na iluminação elétrica de até 80% num ano inteiro. Esta estratégia utilizava valores da irradiância, valores do DGI e de iluminância para acionar os estores.

Em Lee et al. (2009) foram monitorizados estores interiores e exteriores numa fachada orientada para sul, alguns com controlos automáticos e outros com controlo manual. Concluiu-se que para estores interiores, o controlo automático tinha poupanças de energia elétrica de até 4% em iluminação elétrica e de até 7% em necessidades de arrefecimento. Para estores exteriores a poupança energética para um controlo automático era de até 5% em iluminação elétrica e de até 2% em necessidades de arrefecimento.

## **2.1. Métricas de conforto visual**

Para qualquer sistema de iluminação natural o conforto visual dos seus utilizadores é uma peça fundamental. De modo a tentar quantificar esse conforto utilizam-se métricas capazes de medir aspetos particulares do conforto visual. Além disso apesar de existirem muitas métricas de conforto visual nenhuma destas é capaz de prever com precisão a sensação de encandeamento devido às preferências pessoais dos utilizadores (Zelenay, 2011).

Apesar disto existe um esforço a nível mundial de tentar definir guias para o aproveitamento eficiente da iluminação natural. No Reino Unido, o CIBSE (The Chartered Institution of Building Service Engineers) produziu um guia extensivo (CIBSE, 2012) para a eficiência energética em edifícios. Entre os temas abordados no guia

estão os sistemas de controlo automático e o planeamento para melhor aproveitamento da iluminação elétrica e natural.

O LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) é um sistema de certificação de projetos para edifícios ambientalmente sustentáveis (U.S. Green Building Council, 2013), que está disperso em mais de 150 países, com o intuito de classificar com melhor categoria projetos que tenham mais pontos segundo os parâmetros definidos. Neste sistema de certificação consideram-se vários aspetos da construção do edifício entre os quais a iluminação elétrica e a iluminação natural.

A IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) lançou um livro (IESNA, 2000) que descreve extensamente vários aspetos da iluminação elétrica e natural. Este livro tem recomendações de valores e de projeto de vários sistemas de iluminação.

Neste trabalho destacam-se três tipos de métricas: métricas de quantidade de luz; métricas de uniformidade de iluminação; métricas de encandeamento.

### **2.1.1. Métricas de quantidade de luz**

De modo a que utilizadores possam executar tarefas necessitam de uma quantidade de luz adequada, pois um nível de iluminação quer reduzido quer em excesso pode causar desconforto visual. Este tipo de métricas é geralmente calculado medindo o fluxo luminoso por unidade de área na superfície (iluminância), com o valor absoluto ou através de índices calculados com esses valores.

#### **2.1.1.1. Iluminância**

A iluminância num ponto de uma determinada superfície ( $E_p$ ) é definida como o rácio entre o fluxo luminoso incidente numa vizinhança infinitesimal desse ponto e a área dessa superfície (equação (1)). Esta grandeza traduz a iluminação incidente numa superfície.

$$E_p = \frac{d\phi}{dA} [\text{lux}] \quad (1)$$

$\phi$  – fluxo luminoso (lm);

$A$  – área da superfície que contém o ponto  $p$  ( $\text{m}^2$ );

Esta grandeza tem a vantagem de representar um valor único e de ser simples de calcular, na medida em que é um valor recebido diretamente de uma leitura de um sensor. Apesar disso, tem algumas limitações: não tem em conta o encandeamento, apesar de haver limites propostos de iluminância máxima; não tem em conta a origem da luz (natural ou elétrica), apesar de no caso de *software* utilizado neste trabalho (ver 3.3) se poder aceder à iluminância natural; é uma medida temporária que não tem em conta as mudanças ao longo do tempo, por essa razão tem de ser frequentemente registada.

Para esta grandeza existem vários valores de referência dependentemente do tipo de utilização do espaço e da superfície em que esta é medida. Os valores apresentados na Tabela 1 são válidos para espaços de escritório.



A superfície de trabalho é a superfície mais comum onde esta grandeza é medida. O valor de 500 lux é o valor mais utilizado como valor de referência recomendado na superfície de trabalho. Este valor na superfície de trabalho, é bastante utilizado como valor de referência em sistema de iluminação elétrica automática, isto é, valor abaixo do qual a iluminação elétrica se liga automaticamente, total ou parcialmente, para atingir uma iluminância mínima de 500 lux.

**Tabela 1 – Valores de iluminância na superfície de trabalho utilizados**

Referência	Iluminância na superfície de trabalho
Aste et al. (2012); Athienitis & Tzempelikos (2002); Bauer et al. (1996); Krarti et al. (2005); Mardaljevic & Nabil (2005); Oh et al. (2012); Reinhart (2004); Ruck et al. (2001); Shen & Tzempelikos (2012) (2013); Tzempelikos & Shen (2013); Tzempelikos & Athienitis (2007)	500 lux na superfície de trabalho como valor de referência para o controlo automático da iluminação elétrica.
Chaiwivatworakul & Chirattananon (2013); Chaiwivatworakul et al. (2009); Chauvel et al. (1982); Kim et al. (2009 <sup>a</sup> ); Lindelöf (2007); Reinhart (2004); Technical Committee CEN/TC 169 (2002)	500 lux na superfície de trabalho como iluminância desejada pelos utilizadores.
Vartiainen (2001)	500 lux, 300 lux e 100 lux consoante a posição no espaço iluminado.
Aries (2005)	500 lux na superfície de trabalho como iluminância desejada mas 800 lux é preferida pelos utilizadores.
Santos (2011)	Níveis de iluminância natural entre 150 lux a 200 lux garantiam conforto visual mas para iluminação elétrica eram necessários níveis de iluminância entre 400 lux a 500 lux.
U.S. Green Building Council (2013)	Iluminâncias de 300 lux no mínimo e 3000 lux no máximo.
David et al. (2011)	300 lux na superfície de trabalho como valor de referência para o controlo automático da iluminação elétrica.
Zelenay (2011)	Entre 300 lux e 500 lux na superfície de trabalho seriam iluminâncias desejadas por se tratar de trabalho de computador.
Dubois (2001 <sup>a</sup> ) (2001b)	Iluminância na superfície de trabalho para trabalhar em papel: <100 lux demasiado escuro; 100-300 lux escuro; 300-500 lux aceitável; >500 lux ideal. Iluminância na superfície de trabalho para trabalhar no computador: <100 lux demasiado escuro; 100-300 lux aceitável; 300-500 lux ideal; >500 lux demasiado.
CIBSE (2012)	360 lux para escritórios normais e 380 lux para escritórios open-plan de iluminância mínimos garantidos por iluminação elétrica.
Boyce et al. (2006)	Iluminâncias na superfície de trabalho de 400 lux no mínimo e 700 lux no máximo.
Reinhart et al. (2006)	150 lux, 300 lux e 1000 lux na superfície de trabalho como iluminâncias desejadas para comparação.
Franzetti et al. (2004)	425 lux na superfície de trabalho como iluminância desejada.
Newsham & Veitch (2000)	Utilizadores preferiam iluminância na superfície de trabalho de 458 lux.
Newsham (1994)	Casos diferentes 500 lux e 150 lux na superfície de trabalho como valores de referência para o controlo automático da iluminação elétrica.
Olbina & Hu (2012)	510 lux na superfície de trabalho como valor de referência para o controlo automático da iluminação elétrica.
Vine et al. (1998)	Entre 510 lux e 700 lux na superfície de trabalho seriam iluminâncias desejadas pelos utilizadores.
Lee & Selkowitz (1994)	538 lux na superfície de trabalho como iluminância desejada.
Lee et al. (2009)	A iluminação elétrica fornecia um valor de 538 lux na superfície de trabalho.
DiBartolomeo et al. (1996)	538 lux (+25%, -10%) na superfície de trabalho como iluminância desejada (485 lux – 675 lux).
Fernandes et al. (2013)	540 lux na superfície de trabalho como valor de referência para o controlo automático da iluminação elétrica.
Jennings et al. (2000)	A iluminação elétrica fornecia um valor entre 550 lux e 650 lux na superfície de trabalho.
Guillemin & Morel (2001)	600 lux na superfície de trabalho como iluminância desejada.
Manav (2007)	Utilizadores preferiam valores de iluminância na superfície de trabalho de 2000 lux face ao valor de 500 lux geralmente recomendado.
Chan et al. (2015)	2670 lux na superfície de trabalho como iluminância máxima.

Existem também recomendações de iluminância provenientes de regulamentos. Na norma europeia EN ISO 12464-1 (Technical Committee CEN/TC 169, 2002) recomenda-se a iluminância de 500 lux para o plano de trabalho de um escritório, apesar de em algumas tarefas específicas se recomendar iluminância de 300 lux. Na certificação para construções sustentáveis LEED (U.S. Green Building Council, 2013) recomenda-se níveis de iluminância entre 300 lux e 3000 lux.

Outras medidas de iluminância incluem iluminância na parede e iluminância vertical ao nível do olho do utilizador. Em Lindelöf (2007) concluiu-se que a iluminância na parede não deveria ser maior do que 1000 lux nem menor que 150 lux. Para a iluminância vertical ao nível do olho o valor deve ser menor que 1000 lux (Aries, 2005; Chan et al., 2015).

### **2.1.1.2. Daylight Factor**

A métrica *daylight factor* (DF) de um determinado ponto num determinado plano é o rácio entre a iluminância natural num determinado ponto interior e a iluminância num ponto exterior proveniente do céu cuja distribuição é conhecida ou presumida como a iluminância natural exterior num plano horizontal devido a um hemisfério celeste desobstruído desse mesmo céu (Ruck et al., 2001). Este fator, na sua génese, ignora a contribuição da iluminação direta para ambas a iluminâncias, ou seja é aplicado em dias de céu encoberto. Na prática é o rácio entre a iluminância horizontal de um ponto interior (e.g. superfície de trabalho) e a iluminância horizontal exterior em condições de céu encoberto.

Esta métrica é muito utilizada por ser simples de calcular (equação (2)) e ter sido adotada em vários regulamentos (National House Building Council, 2008).

$$DF = \frac{E_{p,obs}}{E_{p,desobs}} \quad (2)$$

$E_{p,obs}$  – iluminância horizontal do ponto P (lux);

$E_{p,desobs}$  – iluminância horizontal no ponto p sem obstruções físicas (lux);

A métrica DF é geralmente apresentada em percentagem e existem valores máximos aconselhados dependentemente da utilização do espaço em causa. Em geral, a percentagem deverá ser maior ou igual a 2%, no caso de a percentagem ser menor do que 5% considera-se necessária a utilização de iluminação elétrica e no caso de a percentagem ser pelo menos 5% considera-se que não é necessário utilizar iluminação elétrica (Chartered Institution of Building Services Engineers, 2008; National House Building Council, 2008). Estas percentagens presumem uma iluminância horizontal exterior de 10 klux de modo a que 5% corresponda a 500 lux na superfície de trabalho e os 2% correspondam a 200 lux na superfície de trabalho. Estas percentagens de referência podem ser aplicadas de modo geral apesar de algumas divisões poderem ter valores de referência diferentes consoante a sua utilização.

Em Dubois (2001a) (2001b) consideram-se valores de referência da percentagem da métrica DF algo semelhantes. Valores superiores a 5% são ideais para tarefas de trabalho com papel mas demasiado altos para

tarefas em computadores. Valores entre 2% e 5% são preferidos por oferecerem maior potencial de utilização da luz solar. Valores entre 1% e 2% são aceitáveis mas implicam um potencial de utilização da luz solar menor. Enquanto valores abaixo dos 1% são inaceitáveis por corresponderem a situações demasiado escuras.

Apesar de ser muito utilizada (Bauer et al., 1996; Cantin & Dubois, 2011; Dubois, 2001a, 2001b; Nabil & Mardaljevic, 2006; Ramos & Ghisi, 2010; Reinhart et al., 2006; Reinhart & Weissman, 2012; Ruck et al., 2001) esta métrica tem várias limitações: é indiferente à orientação do edifício; é indiferente à localização do edifício; não considera a variação das condições de iluminância ao longo do dia; não considera radiação solar direta nem iluminação direta; não considera encandeamento por parte de utilizadores.

De facto, como no cálculo da métrica não é considerada a iluminação direta do sol, devido à simetria do céu a iluminância interior mantém-se igual independentemente da orientação do edifício, fazendo com que a métrica DF seja insensível a essa mesma orientação. Uma vez que esta métrica não considera a posição do sol, a localização geográfica não tem efeito no valor da métrica.

Quando a iluminância exterior baixa de valor isto afeta a iluminância interior, mas o rácio de iluminâncias mantém-se constante. Como consequência a métrica não acompanha as variações diárias de iluminância.

Por definição esta métrica não considera radiação nem iluminação diretas. Isto quer dizer que esta métrica é uma representação incompleta para céus pouco nublados ou descobertos. Além disto, a métrica é insensível a estratégias que visem redirecionar luz solar ou bloquear a radiação direta. Por esta razão a medição da métrica DF é, por vezes, feita bloqueando a radiação direta com dispositivos de sombreamento (Reinhart et al., 2006).

O encandeamento é uma parte muito importante do conforto visual e, conseqüentemente, uma parte importante do projeto de iluminação de qualquer espaço. Esta métrica não tem em conta a possibilidade de encandeamento por parte do utilizador e, como tal, é incompleta do ponto de vista do conforto visual.

Esta métrica é menos indicada para fazer previsões (e.g. conforto visual, consumos energéticos, entre outros) do que métricas como o DA (Daylight Autonomy) (ver 2.1.1.3), CDA (Continuous Daylight Autonomy) (ver 2.1.1.4) ou UDI (Useful Daylight Illuminance) (ver 2.1.1.6) mas tem a vantagem de ter valores de referência a seguir que não é o caso das outras métricas referidas (Reinhart et al., 2006).

### **2.1.1.3. Daylight Autonomy**

A *Daylight Autonomy* (DA) é uma métrica que representa a fração de tempo num ano em que os valores de iluminância natural na superfície de trabalho estão acima de um determinado valor (equação (3)). Esta métrica é geralmente apresentada em percentagem e apesar de na sua definição esta métrica não estar associada a nenhum valor específico é tipicamente calculada para o valor de 500 lux, apesar de também ser usada para outros valores (ver Tabela 2).

$$DA = \frac{\sum da_i \times t_i}{\sum t_i} \in [0, 1] \text{ com } da_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{natural} \geq 500 \text{ lux} \\ 0 & \text{se } E_{natural} < 500 \text{ lux} \end{cases} \quad (3)$$

$t_i$  – hora de ocupação;

**Tabela 2 – Valores de iluminância utilizados na métrica Daylight Autonomy (DA)**

Referência	Iluminância mínima (lux)
Reinhart et al. (2006)	1000
Mardaljevic & Nabil (2005); Nabil & Mardaljevic (2006); Reinhart (2004); Reinhart & Weissman (2012); Shen & Tzempelikos (2012); Tzempelikos & Shen (2013); Tzempelikos & Athienitis (2007); Zelenay (2011)	500
Reinhart et al. (2006)	400
Gilani et al. (2015); Konis & Lee (2015); Reinhart & Weissman (2012); Wittkopf et al. (2006); Zelenay (2011)	300
Reinhart et al. (2006); Reinhart & Weissman (2012)	150
Konis & Lee (2015)	100

#### 2.1.1.4. Continuous Daylight Autonomy

A métrica *continuous daylight autonomy* ( $DA_{con}$ ) é uma métrica que representa a fração de tempo num ano em que os valores de iluminância natural na superfície de trabalho estão acima de um determinado valor considerando também a contribuição de iluminâncias inferiores à iluminância mínima (equação (4)). Esta métrica é uma melhoria da métrica DA, tem em conta a contribuição para a iluminância natural de iluminâncias abaixo da iluminância mínima (4), e é geralmente apresentada em percentagem. Apesar de na sua definição esta métrica não estar associada a nenhum valor específico é tipicamente calculada para o valor de 500 lux apesar de também ser usada para outros valores (ver Tabela 3).

$$DA_{con} = \frac{\sum da_i \times t_i}{\sum t_i} \in [0, 1] \text{ com } da_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{natural} \geq 500 \text{ lux} \\ il & \text{se } E_{natural} < 500 \text{ lux} \end{cases} \quad (4)$$

- il – iluminância na superfície de trabalho (lux);
- $t_i$  – hora de ocupação;
- $E_{natural}$  – iluminância natural;

**Tabela 3 – Valores de iluminância utilizados na métrica  $DA_{con}$**

Referência	Iluminância mínima (lux)
Reinhart et al. (2006)	1000
Chan et al. (2015); Tzempelikos & Shen (2013)	500
Reinhart et al. (2006)	400
Reinhart et al. (2006)	150

#### 2.1.1.5. Spatial Daylight Autonomy

A métrica *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) representa a percentagem de uma área em que a iluminância está acima de um valor definido numa fração de tempo durante um ano. Esta métrica é geralmente apresentada em percentagem e apesar de na sua definição esta métrica não estar associada a nenhum valor específico é tipicamente calculada para  $sDA_{300/50\%}$ , isto é, para o valor de 300 lux e para 50% do tempo (Gilani et al., 2015; U.S. Green Building Council, 2013; Wagdy & Fathy, 2015). Para calcular esta métrica calcula-se a métrica DA em cada ponto de uma grelha definida na área em causa e apenas os pontos em que a métrica DA é que são utilizados para os cálculos da equação (5).

A certificação LEED (U.S. Green Building Council, 2013) recomenda um mínimo de 55% e um valor preferido de 75% para a métrica  $sDA_{300/50\%}$  em edifícios de escritório.

$$sDA_{x/y\%} = \frac{\sum sda_i \times DA}{\sum p_i} \in [0, 1] \text{ com } sda_i = \begin{cases} 1 & \text{se } DA \geq DA_{limite} \\ 0 & \text{se } DA < DA_{limite} \end{cases}$$

- $p_i$  – ponto na grelha de medição da iluminância; (5)  
 $x$  – iluminância mínima de referência (lux);  
 $y$  – fracção do tempo em que a iluminância tem de ser maior que  $x$ ;  
 $E_{natural}$  – iluminância natural;  
 $DA_{limite}$  – valor de referência, varia entre autores  
 $DA$  - ver 2.1.1.3;

### 2.1.1.6. Useful Daylight Illuminance

A métrica *Useful Daylight Illuminance* (UDI) representa a fracção de tempo num ano em que os valores de iluminância natural na superfície de trabalho estão dentro de um determinado intervalo. Um das vantagens desta abordagem em relação à métrica DA é que o DA não tem em conta iluminância abaixo do limite especificado, que é relevante para os utilizadores e tem impacto na utilização da iluminação elétrica. Outra das vantagens é que a métrica DA também não tem em conta o valor pelo qual o limite especificado foi ultrapassado, isto é importante por valores muito altos de iluminância poderem estar também associados ao desconforto visual dos utilizadores. Conclui-se portanto que este índice, em comparação com a métrica DA, tem em conta o desconforto do utilizador (Mardaljevic & Nabil, 2005; Nabil & Mardaljevic, 2006).

Definido por Mardaljevic & Nabil (2005) esta métrica é tipicamente apresentada em percentagem e calculada para o intervalo entre 100 lux e 2000 lux, apesar de também ser utilizada com outros intervalos (ver Tabela 4). Considera-se que a iluminância na superfície de trabalho é útil para o utilizador a partir dos 100 lux e abaixo dos 2000 lux. Entre os 100 lux e os 500 lux considera-se que a iluminação é útil mas precisa de ser complementada com iluminação elétrica. Com valores de iluminância entre os 500 lux e os 2000 lux considera-se que a iluminação é útil e autónoma, isto é, não necessita de iluminação elétrica complementar. Para se medir a fracção de tempo em que a iluminância está em cada um dos intervalos referidos anteriormente calculam-se cinco métricas:  $UDI_{100}$ , para iluminâncias abaixo dos 100 lux;  $UDI_{100-500}$ , para iluminâncias entre 100 lux e 500 lux;  $UDI_{500-2000}$ , para iluminâncias entre os 500 lux e os 2000 lux;  $UDI_{100-2000}$ , para iluminâncias entre os 100 lux e os 2000 lux;  $UDI_{2000}$ , para iluminâncias acima dos 2000 lux. Na equação (6) descreve-se o cálculo das métricas  $UDI_{100-2000}$  e  $UDI_{2000}$ , as restantes calculam-se de modo semelhante a uma das duas apresentadas.

$$UDI = \frac{\sum udi_i \times t_i}{\sum t_i} \in [0, 1] \begin{cases} UDI_{100-2000} \text{ com } udi_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{inf} \leq E_{natural} \leq E_{sup} \\ 0 & \text{se } E_{natural} < E_{inf} \vee E_{natural} > E_{sup} \end{cases} \\ UDI_{2000} \text{ com } udi_i = \begin{cases} 1 & \text{se } E_{natural} > E_{sup} \\ 0 & \text{se } E_{natural} \leq E_{sup} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

- $il$  – iluminância na superfície de trabalho (lux);  
 $t_i$  – hora de ocupação;  
 $E_{natural}$  – iluminância natural;  
 $E_{inf}$  – limite inferior da iluminância útil;  
 $E_{sup}$  – limite superior da iluminância útil;

Em Mardaljevic et al. (2012) propôs-se intervalos diferentes no cálculo do UDI (ver Tabela 4). Considerou-se o valor máximo de iluminância de 3000 lux e um valor de autonomia de iluminação elétrica de 300 lux.

Em Hachem et al. (2014) considerou-se uma iluminância útil mínima de 300 lux, uma iluminância autônoma de 500 lux e uma iluminância máxima de 2500 lux, esta última tem o valor recomendado para edifícios residenciais.

Em David et al. (2011) foi utilizado um UDI modificado de modo a considerar de maneira indireta a iluminação solar direta. Neste caso o valor mínimo útil de iluminação coincide com o valor de autonomia de iluminação elétrica de 300 lux e o valor máximo de 8000 lux é utilizado por se considerar que acima deste valor existe iluminação direta.

**Tabela 4 – Diferentes intervalos do Useful Daylight Illuminance (UDI) utilizados**

Referência	Limite inferior (lux)	Valor de autonomia (lux)	Limite superior (lux)
Bellia et al. (2015); Chaiwiwatworakul & Chirarattananon (2013); Gilani et al. (2015); Hu & Olbina (2011); Manzan (2014); Mardaljevic (2006); Mardaljevic & Nabil (2005); Nabil & Mardaljevic (2006); Olbina & Hu (2012); Ramos & Ghisi (2010); Reinhart et al. (2006); Reinhart & Weissman (2012); Shen & Tzempelikos (2013); Tzempelikos & Shen (2013); Zelenay (2011)	100	500	2000
Mardaljevic et al. (2012)	100	300	3000
Hachem et al. (2014)	300	500	2500
David et al. (2011)	300	300	8000

## 2.1.2. Métricas de uniformidade de iluminação

Uma distribuição de iluminação mais uniforme faz com que as diferenças de iluminação sejam menos acentuadas, o que contribui para um menor esforço visual na adaptação dos olhos face a diferentes níveis de iluminação. Este tipo de métrica é geralmente medida com valores de iluminância na superfície de trabalho.

Medir a uniformidade de iluminação permite diferenciar situações aparentemente semelhantes, que tenham quantidades de luz semelhantes, mas que têm distribuições de iluminação diferentes. Isto pode acontecer no caso de uma superfície apresentar uma distribuição muito homogênea e outra superfície apresentar uma distribuição muito heterogênea mas ambas terem uma iluminância média igual.

### 2.1.2.1. Rácios de iluminância

Desconforto visual ocorre quando existe excesso de iluminância (ver 2.1.1.1) numa dada superfície mas também pode ocorrer quando o contraste de iluminâncias nessa mesma superfície é muito acentuado. A uniformidade da iluminância é calculada para uma superfície num determinado momento e pode tomar forma através do cálculo de dois índices diferentes (equações (7) e (8)). Os índices de uniformidade de iluminância são calculados pelo rácio entre a iluminância mínima da superfície em causa e dependentemente do índice em questão a iluminância média da superfície em causa ( $U_{méd}$ , equação (7)) ou a iluminância máxima da superfície em causa ( $U_{máx}$ , equação (8)).

Em Technical Committee CEN/TC 169 (2002) além da uniformidade da superfície de trabalho são também considerados valores para a uniformidade da iluminação na área em redor, bem como recomendações sobre os níveis de iluminação entre a superfície de trabalho e a área em redor desta.

$$U_{méd} = \frac{E_{mín}}{E_{méd}} \quad (7)$$

$E_{mín}$  – iluminância mínima na superfície em causa (lux);

$E_{méd}$  – iluminância média na superfície em causa (lux);

Para o índice  $U_{méd}$ , o valor em CIBSE (2012) recomenda valores acima dos 0,7 (ver Tabela 5).

$$U_{máx} = \frac{E_{mín}}{E_{máx}} \quad (8)$$

$E_{mín}$  – iluminância mínima na superfície em causa (lux);

$E_{máx}$  – iluminância máxima na superfície em causa (lux);

Para o índice  $U_{máx}$  considera-se, em geral, o valor 0,5 como mínimo para o conforto visual mas consideram-se valores acima de 0,7 como valores desejáveis, apesar de também se usarem outros valores (ver Tabela 5).

**Tabela 5 – Valores de referência dos índices de uniformidade de iluminância ( $U_{méd}$  e  $U_{máx}$ )**

Referência	$U_{máx}$ , aceitável	$U_{máx}$ , recomendado	$U_{méd}$
Dubois (2001a) (2001b); Saunders (1969); Slater & Boyce (1990)	>0,5	>0,7	-
CIBSE (2012)	>0,2	-	>0,7
Technical Committee CEN/TC 169 (2002)	>0,7	-	-
Dubois (2001b)	-	-	>0,8

Apesar destes índices poderem ser calculados para qualquer tipo de iluminação em Slater & Boyce (1990) recomenda-se que estes índices devam ser utilizados para iluminação elétrica porque a iluminação natural é à partida menos uniforme o que poderá distorcer os valores calculados. Além disto, deve ter-se em atenção que os utilizadores são mais tolerantes a condições de encandeamento se a fonte for de iluminação natural (ver 2). Efetivamente, os utilizadores aceitam contrastes maiores de iluminância para iluminação natural do que para iluminação elétrica (Ruck et al., 2001).

### 2.1.3. Métricas de encandeamento

As métricas de encandeamento visam identificar situações de encandeamento de desconforto (ver 2) por parte dos utilizadores. Estas métricas, em geral, baseiam-se em valores de luminância de superfície e fontes luminosas. Algumas destas métricas são índices de encandeamento e, apesar de existirem vários índices, descreve-se de seguida apenas alguns dos que se adequam à iluminação natural.

### 2.1.3.1. Luminância

A luminância vista de um ponto numa superfície numa determinada direção é uma grandeza que mede a intensidade luminosa emitida nessa direção por unidade de área visível nesse mesmo ponto (equação (9)). A luminância representa a luz emitida por uma determinada fonte ou refletida numa superfície numa direção específica. Além disto esta medida está relacionada com a percepção que o olho humano tem em relação à iluminação.

$$L_{\gamma} = \frac{dI_{\gamma}}{dA_{vis}} [\text{cd}/\text{m}^2] \quad (9)$$

$I_{\gamma}$  – intensidade luminosa (cd);  
 $A_{vis}$  – área visível da fonte de emissão ( $\text{m}^2$ );  
 $\gamma$  – ângulo entre a normal da área de emissão e a linha entre o ponto p e a fonte de emissão;

Para esta grandeza o desconforto visual é frequentemente verificado através de rácios de luminância (ver 2.1.3.2). Porém para a luminância absoluta existe a preocupação de definir valores máximos. Para qualquer dos casos os valores podem variar consoante zonas específicas do campo de visão onde as medidas foram efetuadas.

O campo de visão de um ser humano é a vista que este tem num determinado momento e é constituído pela soma do campo de visão de cada olho (ver Figura 1 e Figura 2). Para cada olho, o campo de visão estende-se horizontalmente aproximadamente  $60^{\circ}$  do lado nasal (limitado pelo nariz),  $90^{\circ}$  do outro lado e verticalmente aproximadamente  $70^{\circ}$  para baixo (limitado pela bochecha),  $50^{\circ}$  para cima (limitado pelas sobrancelhas). Com a soma do campo de visão de cada olho no total o campo de visão estende-se aproximadamente no plano horizontal  $90^{\circ}$  para cada lado, no plano vertical  $70^{\circ}$  para baixo e  $50^{\circ}$  para cima (Dubois, 2001a).

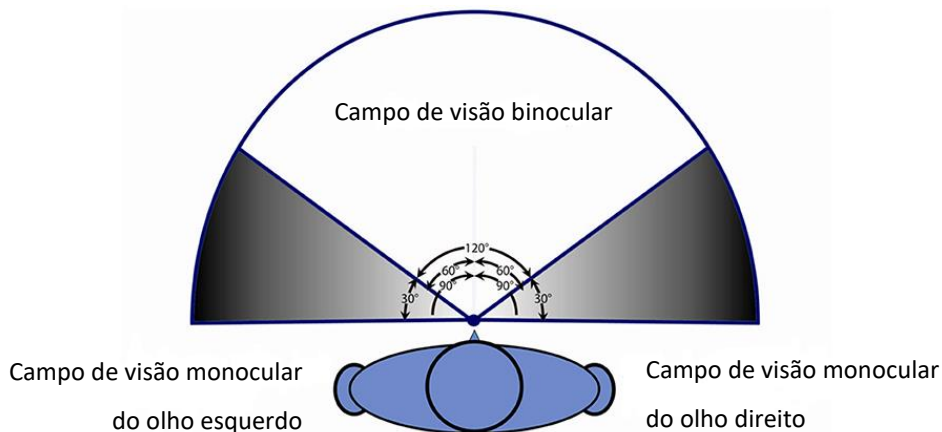


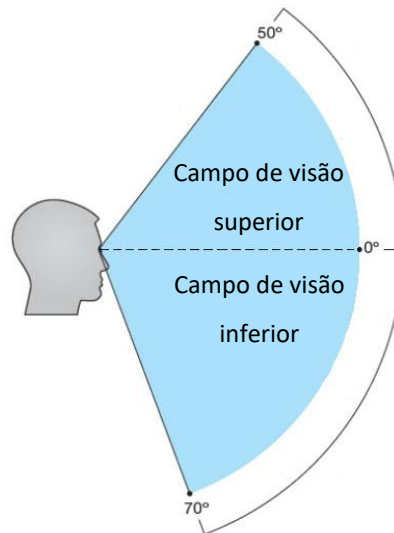
Figura 1 – Campo de visão horizontal (Aprile et al., 2014)

Em Dubois (2001a) (2001b) (2003) considerou-se como  $2000 \text{ cd}/\text{m}^2$  o limite máximo de luminância geral e  $1000 \text{ cd}/\text{m}^2$  como limite máximo de luminância no campo de visão. Além disto, considerou-se que valores abaixo dos  $500 \text{ cd}/\text{m}^2$  eram preferíveis mas valores abaixo de  $30 \text{ cd}/\text{m}^2$  eram demasiado escuros.



Em Wymelenberg & Inanici (2009) concluiu-se que a luminância máxima considerada pelos utilizadores num grande campo de visão (campo de visão semi-esférico, 90° para cada um dos lados e 90° para cima e para baixo) era em média 1610 cd/m<sup>2</sup>.

Em Sutter et al. (2006) foi considerada como luminância máxima do campo de visão 500 cd/m<sup>2</sup> e como luminância máxima na janela considerou-se o valor 1800 cd/m<sup>2</sup>.



**Figura 2 – Campo de visão vertical (Johnson, 2015)**

Em Aries (2005) concluiu-se que a luminância máxima aceitável no campo de visão pelos utilizadores era de 1600 cd/m<sup>2</sup> apesar de a aceitação subir consideravelmente se este valor fosse 1500 cd/m<sup>2</sup>. Além disso concluiu-se que a iluminância máxima de fontes de iluminação deveria ser 1500 cd/m<sup>2</sup>.

Em Shin et al. (2012) recomenda-se 3200 cd/m<sup>2</sup> como luminância máxima aceitável, 5600 cd/m<sup>2</sup> como luminância a partir da qual se sente desconforto e 10000 cd/m<sup>2</sup> como valor máximo absoluto a partir do qual ocorre encandeamento intolerável.

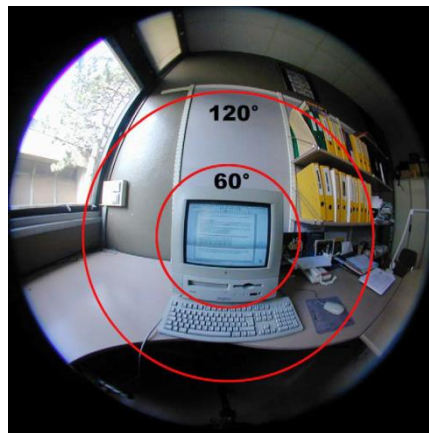
Em Bülow-Hübe (2008) considerou 2000 cd/m<sup>2</sup> como luminância máxima na janela ao passo que em Wienold & Christoffersen (2006) considera-se como valor de limite máximo de luminância 50000 cd/m<sup>2</sup>.

Concluiu-se, com isto que, apesar de alguns autores utilizarem valores algo semelhantes, não existe consenso sobre os valores máximos de luminância absoluta.

### **2.1.3.2. Rácios de luminância**

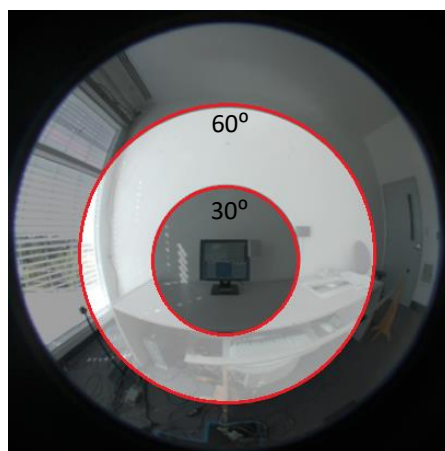
O encandeamento, além de acontecer com valores muito altos de luminância, pode ocorrer também se o contraste de luminâncias entre zonas adjacentes for muito elevado. Estas zonas adjacentes são zonas presentes no campo de visão (ver 2.1.3.1), apesar de, em alguns casos, não serem estritamente definidas (Aries, 2005; IESNA, 2000; Konis & Lee, 2015; Manav, 2007). Uma das zonas é a da tarefa, que em ambiente de escritório é, geralmente, um ecrã de computador, mas pode também ser uma folha de papel. As outras zonas poderão ser descritas essencialmente de dois modos consoante os autores.

Alguns autores (Dubois, 2001a, 2001b, 2003; Sutter et al., 2006; Zelenay, 2011) utilizam as zonas panorama e ergorama. O panorama é a vista dentro de um cone de 120° a 140° centrado na direção do olhar e o ergorama é a vista dentro de um cone de 60° também centrado na direção do olhar (ver Figura 3).



**Figura 3 – Panorama e Ergorama no campo de visão (Sutter et al., 2006)**

Outros autores (Fernandes et al., 2013; Lee et al., 2009) utilizam três zonas: um cone de 30° centrado na direção do olhar, que será chamado de cone um; um cone entre 30° a 60° centrado na direção do olhar, que será chamado de cone dois; um cone entre 60° a 90° centrado na direção do olhar, que será chamado de cone três (ver Figura 4).



**Figura 4 – Diferentes zonas do campo de visão (Lee et al., 2009)**

Em escritórios modernos frequentemente as tarefas de trabalho são executados num computador. Tendo isto em conta, a luminância da tarefa de trabalho é representada muitas vezes pela luminância de um ecrã. O valor mais utilizado é de 200 cd/m<sup>2</sup> apesar de haver outros valores (ver Tabela 6). Este valor varia consoante o tipo de ecrã, com valores de luminância mais baixos para ecrãs mais antigos e valores maiores para ecrãs mais modernos (Aries, 2005; Bülow-Hübe, 2008).

Embora os computadores estejam muito difundidos em trabalhos de escritório, no caso de as tarefas serem executadas em papel recomendam-se valores de luminância de 70 cd/m<sup>2</sup> (Winterbottom & Wilkins, 2009).

**Tabela 6 – Valores de luminâncias em ecrãs**

Referência	Luminância no ecrã (cd/m <sup>2</sup> )
Bülow-Hübe (2008)	400
Aries (2005)	250-300
Wymelenberg & Inanici (2009)	255
Fernandes et al. (2013); Konis & Lee (2015); Lee et al. (2009); Zelenay (2011)	200
Boyce et al. (2006)	120
Aries (2005); Bülow-Hübe (2008); Sutter et al. (2006)	100
Dubois (2003)	90
Ruck et al. (2001)	85

Os contrastes de luminância são por norma contrastes entre a luminância da tarefa e outras zonas do campo de visão. Existe uma grande coerência nos valores de referência dos rácios utilizados, a maior diferença ocorre na seleção das zonas entre as quais se calculam os rácios (ver Tabela 7).

**Tabela 7 – Valores de referência de rácios de luminância**

Referência	Descrição			
	Entre tarefa e cone um	Entre tarefa e cone dois	Entre tarefa e cone três	
Fernandes et al. (2013); Lee et al. (2009)	1:3 – 3:1	1:10 – 10:1	1:40 – 40:1	
Dubois (2001a) (2001b) (2003); Sutter et al. (2006)	Entre papel e ecrã	Entre tarefa e ergorama	Entre tarefa e panorama	Entre tarefa e campo de visão
	1:3 – 3:1	1:3 – 3:1	1:10 – 10:1	1:20 – 20:1
Zelenay (2011)	Entre papel e ecrã	Entre tarefa e ergorama	Entre tarefa e panorama	Entre tarefa e campo de visão
	1:3 – 3:1	1:3 – 3:1	1:10 – 10:1	1:40 – 40:1
IESNA (2000)	Entre papel e ecrã	Entre tarefa e zona adjacente	Entre tarefa e zona de fundo	Entre fonte luminosa e zona adjacente
	1:3 – 3:1	1:3 – 3:1	1:10 – 10:1	1:20 – 20:1
Manav (2007)	Consideraram como rácios de luminância desejados valores no intervalo 1:3 – 3:1 entre a tarefa e a zona adjacente.			
Konis & Lee (2015)	Consideraram como rácios de luminância desejados valores no intervalo 1:10 – 10:1 entre a tarefa e a zona de fundo.			
Aries (2005)	Consideraram como rácios de luminância desejados valores no intervalo 1:20 – 20:1 entre uma fonte luminosa e a parede.			

### 2.1.3.3. Daylight Glare Index

O índice de encandeamento *Daylight Glare Index* (DGI), por vezes designado por *Discomfort Glare Index* (Yao, 2014), tem como propósito quantificar e prever o encandeamento de grandes fontes luminosas como janelas. Este índice de encandeamento é o mais utilizado para a iluminação natural (Osterhaus, 2005; Yao, 2014) e pode ser calculado através da equação proposta por Chauvel et al. (1982) (equações (10) e (11)).

Este índice apresenta algumas limitações na sua aplicação. Por considerar apenas a luminância média da janela o DGI não tem em conta a luz direta. Isto é pouco realista no sentido em que iluminação direta é um fator muito relevante no desconforto visual do utilizador e pode causar mais desconforto do que a luminância média da janela equivalente. Além disto valores de DGI não são fiáveis quando a fonte luminosa ocupa uma grande porção do campo de visão nem quando a luminância das paredes é semelhante à luminância da janela (Bellia et al., 2008) e existem algumas diferenças entre as previsões do DGI e as condições reais do céu (Bellia et al., 2008). Em Sutter et al. (2006) concluiu-se que GI sobrestima o encandeamento sentido por utilizadores causado por iluminação solar.

$$DGI = 10 \log_{10} \left[ 0,478 \sum_{i=1}^n G_i \right] \quad (10)$$

$G_i$  – índice de encandeamento (glare index) da janela  $i$ ;

$$G_i = \left( \frac{L_{s,i}^{1,6} \times \omega_{s,i}^{0,8}}{L_f + 0,07 \omega^{0,5} \times L_{jan}} \right)$$

$L_s$  – luminância de uma fonte luminosa  $\left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right)$ ;  
 $\omega_s$  – ângulo sólido subtendido pela superfície da fonte luminosa do ponto de vista do observador (sr);  
 $L_f$  – luminância de fundo  $\left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right)$ ;  
 $\omega$  – ângulo sólido subtendido pela superfície da janela do ponto de vista do observador (sr);  
 $L_{jan}$  – luminância média da janela  $\left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}\right)$ ;

(11)

Em Chauvel et al. (1982) foi criada uma tabela de valores do DGI e a respetiva percepção do encandeamento por parte dos utilizadores (ver Tabela 8). Com base nesta tabela considerou-se como valor de limite máximo aceitável do DGI o valor de 22.

**Tabela 8 – Valores do DGI e respetivas percepções de encandeamento (Chauvel et al., 1982)**

Descrição da sensação de encandeamento	DGI
Impercetível	16
Aceitável	18
	20
-	22
Desconfortável	24
	26
Intolerável	28

O valor de limite de 22 é o mais utilizado como valor de referência (Chaiwiwatworakul et al., 2009; Oh et al., 2012; Yao, 2014) apesar de em alguns casos serem utilizados outros valores. Além disto, este valor também é utilizado em estratégias de controlo de estores (ver 2.3).

Alguns dos outros valores utilizados foram também utilizados em estratégias de controlo automático de estores (ver 2.3) e em Lee et al. (2009) consideraram-se valores aceitáveis no intervalo entre 20 e 28 (entre aceitável e intolerável na Tabela 8).

#### **2.1.3.4. New Daylight Glare Index**

Este índice de encandeamento foi proposto (DGI<sub>N</sub>) (Nazzal, 2001, 2005) com o objetivo de ultrapassar algumas das limitações do DGI (ver 2.1.3.3). A equação do DGI<sub>N</sub> (equação (12)) é algo semelhante à equação do DGI mas apresenta várias diferenças da definição das variáveis. As fontes de luminância e os ângulos sólidos foram modificados de modo a ter em conta a posição do observador e um fator de configuração.

$$DGI_N = 8 \log_{10} \left\{ 0,25 \frac{\sum_{i=1}^n L_{exterior,i}^2 \times \Omega_{pN}}{L_{adaptação} + 0,07 \left[ \sum_{i=1}^n (\omega_{N,i} \times L_{janela,i}^2) \right]^{0,5}} \right\}$$

$$\begin{aligned} L_{exterior} & - \text{luminância vertical exterior sem obstaculos } \left( \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right); \\ \Omega_{pN} & - \text{ângulo sólido subtendido pela superfície da} \\ & \text{fonte luminosa do ponto de vista do observador (sr);} \\ L_{adaptação} & - \text{luminância ambiente incluindo reflexos de superfícies interiores (cd/m}^2\text{);} \\ \omega_N & - \text{ângulo sólido aparente de cada fonte luminosa viste do ponto de observação (sr);} \\ L_{janela} & - \text{luminância vertical média da janela } \left( \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right); \end{aligned} \quad (12)$$

A sensação de encandeamento aumenta com o aumento da iluminância vertical da janela. No  $DGI_N$  isto acontece, porém no DGI acontece o inverso (Nazzal, 2005), isto é, o DGI não considera corretamente a iluminância vertical.

### 2.1.3.5. Daylight Glare Probability

O índice de encandeamento *Daylight Glare Probability* (DGP) foi criado para avaliar de forma mais precisa o encandeamento causado pela luz natural. Proposto em Wienold & Christoffersen (2005) e validado em Wienold & Christoffersen (2006), pode calcular-se este índice através da equação (13).

$$DGP = 5,87 \times 10^{-5} \times E_V + 0,0918 \log_{10} \left[ 1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{L_{s,i}^2 \times \omega_{s,i}}{E_V^{1,87} \times P_i^2} \right) \right] + 0,16$$

$$\begin{aligned} E_V & - \text{iluminância vertical ao nível do olho do utilizador devido à fonte luminosa (lux);} \\ L_s & - \text{luminância de uma fonte luminosa } \left( \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right); \\ \omega_s & - \text{ângulo sólido subtendido pela superfície da} \\ & \text{fonte luminosa do ponto de vista do observador (sr);} \\ P & - \text{índice de posição;} \end{aligned} \quad (13)$$

O índice de posição representa a mudança na percepção do desconforto causado pelo encandeamento devido à diferença da posição da fonte luminosa e a direção do olhar do observador.

Para o cálculo deste índice os autores Wienold & Christoffersen (2005) (2006) consideraram que para os valores do DGP serem válidos têm de estar entre 0,2 e 0,8 e a iluminância vertical ao nível do olho do observador ( $E_V$ ) tem de ser maior que 380 lux. O DGP tem uma componente que considera a iluminância vertical ao nível do olho do observador ( $E_V$ ), por esta razão tem uma correlação muito forte com a percepção de encandeamento (Wienold & Christoffersen, 2005).

Os valores do DGP e as respetivos níveis de encandeamento são separados em três categorias (ver Tabela 9).

**Tabela 9 – Valores do DGP (Mardaljevic et al., 2012; Zelenay, 2011)**

<b>DGP ≤ 0,35</b>	A – a melhor classe de escritórios: encandeamento abaixo de impercetível
<b>DGP ≤ 0,40</b>	B – boa classe de escritórios: encandeamento abaixo de percetível
<b>DGP ≤ 0,45</b>	C – classe razoável de escritórios: encandeamento abaixo de perturbador

### 2.1.3.6. Simplified Daylight Glare Probability

Em Wienold (2007) foi proposto o índice *Simplified Daylight Glare Probability* (DGPs) que é uma versão simplificada do DGP onde apenas se considera o efeito da iluminância vertical ao nível do olho do utilizador. Isto resulta numa equação mais simples (equação (14)) que conseqüentemente necessita de um menor esforço de cálculo computacional.

$$DGP_s = 6,22 \times 10^{-5} \times E_v + 0,184 \quad (14)$$

$E_v$  – iluminância vertical ao nível do olho do utilizador produzida pela fonte luminosa (lux);

Os valores do DGP e as respetivas sensações de encandeamento são as mesmas que para o DGP (ver Tabela 9).

## 2.2. Controlo manual de dispositivos de sombreamento

Os dispositivos de sombreamento são tradicionalmente operados manualmente pelos utilizadores do espaço e esta operação acontece por várias razões. Vários estudos indicam que a maior causa de fecho dos estores são o encandeamento seguido do desconforto pelos ganhos solares (Rea, 1984; Vine et al., 1998).

Em Santos (2011) concluiu-se que o encandeamento no ecrã é um dos maiores obstáculos ao conforto visual. Em Pigg et al. (1996) conclui-se através de um questionário que, das operações de estores, 43% eram para bloquear iluminação direta e 37% eram para impedir encandeamento no ecrã. Em Zhang & Barrett (2012) a maior causa de fecho de estores era a penetração de luz solar (encandeamento). Por outro lado, quanto maiores eram os ganhos solares menor era o número de estores fechados. Havia também uma correlação com a altura solar, sendo que quando esta era menor havia maior área de janelas coberta por estores.

Já em Zelenay (2011) verificou-se, através da análise de inquéritos, que a maior causa para o fecho dos estores (71%) era reduzir a sensação de encandeamento e reflexos no ecrã, seguido pela necessidade de arrefecimento devido desconforto causado pelos ganhos solares (21%) e para diminuir a iluminação do espaço (21%), por último para poupar energia (7%) e outros motivos (7%). Verificaram que as razões para a abertura de estores eram para entrar mais luz no espaço (100%), para ter acesso a vista do exterior (71%), para aquecer o espaço (21%) e para abrir a janela (7%).

A operação manual de estores está sujeita a várias ineficiências por parte dos utilizadores. Estores operados manualmente tendem a ser operados uma vez por dia e a ficarem na mesma posição o resto do dia (Galasiu & Veitch, 2006; Rubin et al., 1978; Ruck et al., 2001; Zhang & Barrett, 2012).

Num estudo Kim et al. (2009b) ao manuseamento de 468 estores durante quatro dias revelou que mais de 50% dos estores não foram operados durante o dia inteiro, juntando a este valor os estores utilizados apenas uma vez durante o dia a percentagem sobe para 95%.

Em Pigg et al. (1996) verificou-se que entre 30% a 36% dos utilizadores nunca mudavam a posição dos estores. Dos restantes utilizadores metade mudavam a posição dos estores entre uma a quatro vezes por semana.

Em Reinhart & Voss (2003) observou-se que os utilizadores raramente fechavam manualmente os estores quando estes eram abertos automaticamente. Inversamente, abriam os estores manualmente quando estes eram fechados automaticamente.

Em Foster & Oreszczyn (2001) foi reportado que a utilização de estores por parte dos utilizadores era por vezes inapropriada. Os estores nem sempre eram abertos quando não havia muita iluminação solar e quando os ganhos solares eram muito altos não só não eram fechados como em alguns casos eram mais abertos. Acrescentado a isso os estores em geral estavam fechados durante a maior parte do tempo.

Uma possível solução para estas ineficiências é a utilização de sistemas de controlo automático de estores, que será descrita no capítulo seguinte.

### **2.3. Controlo automático de dispositivos de sombreamento**

O controlo automático de estores surge com o intuito de melhorar o desempenho lumínico e energético destes dispositivos. De facto, Rubin et al. (1978) sugere que um sistema automático de estores é importante para a poupança energética por não haver interesse por parte do utilizador de operar os estores com esse objetivo.

Em Lee et al. (2009) através da monitorização de vários estores interiores e exteriores na fachada orientada para sul, alguns com controlo automático e outros de controlo manual mediram-se os períodos de tempo de desconforto em horas para o utilizador por dia. Para estores interiores com controlo manual este período foi entre 2,3 e 3,7 horas e para controlo automático foi entre 0 e 1,1 horas. Para estores exteriores com controlo manual este período foi entre 0,7 e 3,8 horas e para controlo automático foi entre 0,2 e 0,3 horas.

A gestão da iluminação natural nos edifícios é um problema complexo, como tal é preciso ter em conta os fatores que podem afetar essa mesma gestão. Apesar de muitos destes fatores não serem tidos em conta por terem pouca relevância neste trabalho em casos reais têm maior relevância e deveriam ser ponderados.

Um dos problemas dos sistemas automatizados de controlo de estores é a alta variabilidade de preferências dos utilizadores no que toca aos valores de referência para o dito controlo (Galasiu & Veitch, 2006; Newsham, 1994; Osterhaus & Bailey, 1992; Velds, 2000).

Quando o controlo de estores é automático existe uma maior preocupação relativa à aceitação do controlo automático por parte dos utilizadores.

Em Vine et al. (1998) verificou-se que modos de controlo automático de estores têm menos aceitação por parte dos utilizadores que o controlo manual. Apesar disto os utilizadores de controlo manual reportaram mais situações de desconforto visual devido a encandeamento quer de luz natural quer de luz elétrica.

Em Santos (2011) verificou-se que os utilizadores preferem o controlo manual dos dispositivos de sombreamento e das luzes elétricas por terem mais controlo sobre a sua operação, mesmo que isso se reflita em operar estes dispositivos menos vezes ou não opera-los de todo. Isto indica que os utilizadores tendem a

ser mais exigentes com o controlo quando este não é feito por eles. Além disto, os utilizadores fechavam e abriam os estores venezianos completamente sem aproveitar a possibilidade de ajustar o ângulo das lamelas.

Uma possível solução para este problema é permitir maior controlo em sistemas automáticos por parte dos utilizadores. Vários estudos apontam para a necessidade de controlo manual que se sobreponha ao controlo automático de para ter maior aceitação por parte dos utilizadores (Galasiu & Veitch, 2006; Osterhaus, 2005).

Outra das maneiras de resolver ou mitigar o problema será um sistema semiautomático que permita ao utilizador definir os valores dos fatores pelos quais os estores são controlados (e.g. iluminância, DGI). Este tipo de sistemas apesar de ter menos aceitação que controlo manual de estores tem maior aceitação que estores automáticos que não têm em conta preferências pessoais (Vine et al., 1998).

No caso de os estores serem operados automaticamente através de um motor, o seu ruído deve ser tido em consideração pois poderá distrair o utilizador (DiBartolomeo et al., 1996; Lee et al., 2009; Ruck et al., 2001). Para não incomodar o utilizador com ruído constante, a operação automática dos estores não deve ser feita de modo contínuo (Lindelöf, 2007).

Em IESNA (2000) recomenda-se colocar o ecrã e a orientação do utilizador a 90° da orientação da janela para evitar encandeamento através de reflexos. Carmody & Haglund (2006) sugerem que numa situação em que há encandeamento na parede lateral, este será sempre pior na janela. Aries (2005) observou que posições frontais em relação à janela tinham uma maior iluminância ao nível dos olhos que uma posição lateral frente a uma parede, aumentando assim o risco de encandeamento. Aries (2005) conclui também que o tipo de ecrã tem efeito na satisfação do utilizador relativamente às condições de iluminação. Os utilizadores de ecrãs CRT (tubos de raios catódicos) queixaram-se de excesso de luz nos seus ecrãs. Em contrapartida, os utilizadores de ecrãs LCD ficaram mais satisfeitos com os níveis de iluminação. Isto deve-se sobretudo à maior iluminância dos ecrãs LCD ( $\pm 300 \text{ cd/m}^2$ ) e ao facto de serem ecrãs planos.

Outros detalhes a ter em conta são os objetos e as superfícies interiores do espaço. A refletância de paredes, teto e mobiliário têm importância na distribuição da luz numa divisão (Ruck et al., 2001). Adicionalmente os sistemas de iluminação devem ter em conta um espaço completamente mobilado pois a distribuição da luz é diferente de um espaço não mobilado (Hadwan & Carter, 2006; Oh et al., 2012).

Em qualquer sistema de sombreamento deve ser tido em conta a envolvente do edifício, prédios e/ou árvores envolventes, que podem bloquear luz solar em certas alturas do dia ou ano. No caso das árvores de folha caduca podem bloquear a luz solar no verão e primavera, quando o sol está mais alto, e deixam a fachada exposta à luz solar no outono e inverno, quando o sol está mais baixo (Aries, 2005), o que é benéfico em termos térmicos e energéticos mas poderá provocar alguma situação de encandeamento.

Independentemente do tipo de controlo dos estores o conforto visual do utilizador só deve ser tido em conta quando este se encontrar no espaço (CIBSE, 2012), pelo que devem ser instalados sensores ocupação do espaço alterando-se o tipo de controlo consoante o estado. Em Guillemin & Morel (2001) foi sugerido um



algoritmo de controlo de estores que tinha em conta a ocupação do espaço pelos utilizadores. No caso de um utilizador se ausentar por mais de 15 minutos, o algoritmo mudava o modo de funcionamento dando maior prioridade à poupança energética do que ao conforto visual, revertendo a mudança quando era detetado um utilizador no espaço em questão.

Em sistemas de controlo automático de iluminação elétrica, que recorrem a sensores de ocupação verificaram-se poupanças no consumo energético significativas.

Em Reinhart (2004) através de estudo de simulação conclui-se que a existência de sensores de ocupação a controlar a iluminação elétrica podiam poupar cerca de 20% no consumo energético de iluminação.

Em Jennings et al. (2000) concluiu-se também por via numérica que permitiriam a utilização de sensores de ocupação poupanças de 20% a 26% na luz elétrica face ao controlo manual.

Em Tzempelikos & Athienitis (2007) foram realizadas simulações com e sem controlo ativo de iluminação. Simulou-se um cenário com as luzes sempre ligadas e outro cenário em que o controlo ativo tinha como objetivo manter um mínimo de 500 lux enquanto o escritório estivesse ocupado. Conclui-se que com controlo ativo de iluminação elétrica a poupança anual de iluminação era 76% menor e a poupança de energia elétrica anual total era 22% menor.

Apesar dos exemplos descritos serem apenas aplicações para iluminação elétrica, o potencial de poupança energética justifica uma análise com aplicações em automação de estores. No caso de o espaço estar desocupado pode-se adotar um tipo de controlo com prioridade exclusivamente térmica. Sendo que neste caso o controlo térmico é completamente independente do tipo de controlo quando o espaço está ocupado.

Em baixo descrevem-se vários tipos de controlo automático de estores utilizados ou propostos por diferentes autores. Estas estratégias usam, em geral, quatro tipos de parâmetros isoladamente ou em combinação: valores de radiação solar; índices de encandeamento; valores de iluminância; bloqueio de radiação direta. Na Tabela 10 estão listadas todas as estratégias descritas e organizadas por tipo de parâmetro e autores.

Os valores de radiação utilizados variam muito, quer em termos de valor absoluto quer na sua definição, pois diferentes autores utilizam diferentes medidas de radiação. Apesar de existirem alguns valores semelhantes utilizados por diferentes autores não existe convergência nem nos valores nem nas medidas utilizadas.

Os índices de encandeamento utilizados nas estratégias em baixo foram apenas dois:  $G_i$ ; DGI. Em ambos os casos os valores destes índices que foram utilizados eram muito semelhantes.

Para os valores de iluminância utilizam-se geralmente valores da iluminância exterior ou da iluminância na superfície de trabalho. Na iluminância exterior os valores utilizados variam bastante mas na iluminância da superfície de trabalho existe uma maior convergência nos valores utilizados.

Bloquear a radiação direta pode ser feito ou colocando as lamelas (se existirem) com o ângulo de *cut-off* ou baixando o dispositivo de sombreamento o suficiente para bloquear a radiação direta de incidir ou numa zona

específica do espaço ou em toda a área do espaço em questão. O ângulo de cut-off é um ângulo tal que permita a maior abertura possível sem deixar passar radiação direta.

Em Vine et al. (1998) foram observados comportamentos por parte de utilizadores sujeitos a três tipos de controlo de estores: automático; semiautomático; manual (ver 2.2). No modo completamente automático os estores fechavam para impedir a radiação direta na superfície de trabalho. No caso desta última condição não ser satisfeita os estores abrem ou fecham de modo a garantir um nível de iluminância entre 540 lux e 700 lux. No modo semiautomático, o controlo funciona do mesmo modo mas os utilizadores podem definir a iluminância alvo como qualquer valor entre 240 lux e 1650 lux. Neste modo de operação dos estores, os valores médios escolhidos pelos utilizadores foram de 793 lux na parte da manhã e 696 lux na parte da tarde.

Em Ruck et al. (2001) controlou-se automaticamente o ângulo das lamelas de estores venezianos, tal que os níveis de iluminância se mantivessem nos 500 lux ao longo do dia sem nunca subir os estores.

Em Olbina & Hu (2012) para controlar automaticamente estores de dupla orientação foi utilizado o valor de iluminância perto da janela. Para o efeito, a secção superior abria as lamelas de modo a proporcionar a maior iluminância possível sem que esta excedesse 2000 lux. No caso de as lamelas não poderem abrir mais e a iluminância estar abaixo do valor referido, a secção imediatamente abaixo começa também a abrir as lamelas e assim sucessivamente.

Estores de dupla orientação referem-se, neste caso, a estores venezianos de lamelas horizontais em que os estores são controlados independentemente em duas ou mais secções horizontais separadas em vez de todas as lamelas terem a mesma posição.

Em da Silva et al. (2012) foram feitas simulações com controlo dinâmico de estores. Entre os critérios utilizados encontram-se radiação solar vertical transmitida + radiação solar difusa, DGI e radiação solar direta na superfície de trabalho. Nas simulações em que os estores foram controlados pelo DGI como valor de controlo, foram usados como valores de referência máximos do DGI entre 20 e 24. Nas simulações em que foi utilizada a radiação solar vertical transmitida + radiação solar difusa como valor de controlo, foram usados como valores de referência máximos 100 e 200 W/m<sup>2</sup>. Nas simulações em que foi utilizada a radiação solar direta na superfície de trabalho como valor de controlo, foi utilizado como valor de referência 50 W/m<sup>2</sup>. Em Zelenay (2011) foi simulado o controlo de estores tendo em conta o valor da radiação direta na superfície de trabalho, adotando-se 50 W/m<sup>2</sup> como valor limite acima do qual os estores eram fechados.

Em Reinhart (2004) o controlo da altura dos estores era feito consoante o valor da radiação solar direta na superfície de trabalho. Para valores acima dos 50 W/m<sup>2</sup> os estores eram fechados, enquanto o ângulo da lamela era ajustado entre um conjunto de valores pré-determinados que bloqueasse a radiação direta.

Em Tzempelikos & Athienitis (2007) fizeram-se simulações de controlo ativo de estores nas quais o controlo consistia em baixar totalmente os estores quando a radiação solar direta incidente na janela era superior a 20 W/m<sup>2</sup> nas horas de trabalho.

Na Norma EN ISO 13790 (2006) considera-se que para efeitos de cálculo os estores estão fechados quando a irradiância solar no plano vertical está acima dos  $300 \text{ W/m}^2$  e abertos caso contrário. Além disto, também o regulamento português RECS recomenda a mesma estratégia de controlo (Portaria n.º 349-D/2013, 2013).

Em Guillemain & Morel (2001) foi proposto um algoritmo de controlo de estores para ativar os estores sempre que a irradiância solar direta estivesse acima dos  $100 \text{ W/m}^2$ .

Em Moeseke et al. (2007) foram realizadas simulações em que o controlo era efetuado através de níveis de irradiância na fachada diferentes consoante a temperatura alvo no espaço em causa. Determinou-se que para temperaturas alvo entre  $23^\circ\text{C}$  e  $24^\circ\text{C}$  os níveis de irradiância máxima podiam ser entre  $200 \text{ W/m}^2$  e  $300 \text{ W/m}^2$ , valores que seriam suficientes para impedir ganhos solares significativos.

Em Newsham (1994) foi utilizado como método de controlo dos estores o valor de  $233 \text{ W/m}^2$  de intensidade do raio solar vertical no utilizador. Na simulação considerou-se que este valor seria suficiente para evitar desconforto por parte do utilizador.

Em Oh et al. (2012) foram feitas simulações no *Energy Plus* de controlo automático de estores. Um dos objetivos era manter o DGI perto das janela abaixo de 22. Através da análise de níveis de radiação juntamente com outros fatores concluiu-se que níveis de radiação solar na janela abaixo de  $50 \text{ W/m}^2$  não causavam desconforto visual. Como tal sugeriram como método de controlo fechar os estores venezianos quando a radiação solar da janela atinge este valor e abrir quando fosse menor.

Em Oh et al. (2013) foi simulada um estratégia de controlo automático de estores venezianos do consumo total anual de energia e de manter o DGI perto da janela abaixo de 22. Neste mesmo estudo é sugerida como estratégia de controlo automático de estores fechar as lamelas quando a radiação solar incidente na janela é maior do que  $50 \text{ W/m}^2$  e abrir as lamelas caso contrário.

Em Shen & Tzempelikos (2012) foi simulado um controlo automático de estores de rolo que fechava caso a iluminação natural direta incidente na fachada fosse maior que  $20 \text{ W/m}^2$  e abria caso contrário.

Em Aste et al. (2012) considerou-se como estratégia de controlo automático de estores que os estores ativariam se o índice de encandeamento fosse superior a 19. No verão acrescentava-se a condição de ativar os estores de a irradiância incidente na janela for superior a  $200 \text{ W/m}^2$ .

Em DiBartolomeo et al. (1996) foi utilizado um algoritmo para o controlo automático dos estores. Este algoritmo tinha como principal prioridade bloquear a radiação direta. Em segundo plano estava o objetivo de garantir que a iluminação da superfície de trabalho se mantivesse no intervalo entre 485 lux e 675 lux com o máximo de luz natural, no caso de esta não ser suficiente a iluminação elétrica era ligada.

Em Kim et al. (2009a) foram testados dois métodos de controlo automático de estores tendo em conta a iluminância exterior. Um dos métodos era mais conservador do ponto de vista energético e fechava os estores bem como as lamelas quando a iluminância exterior atingia os 16 klux e abria totalmente caso contrário. O

outro método dava mais atenção ao conforto e fechava os estores quando o valor da iluminância exterior atingia os 25 klux exceto das 12:00 às 13:00 em que esse valor descia para 16 klux.

Em Reinhart & Voss (2003) testaram-se estores automáticos que fechavam quando a iluminância exterior ultrapassava os 28 klux e abria caso contrário. No entanto, conclui-se que devido a uma maior relutância dos utilizadores de aceitar o fecho do que a abertura dos estores seria mais adequado como método de controlo abrir os estores caso a iluminância exterior fosse inferior a 28 klux e fechar caso fosse superior a 50 klux.

Em Chaiwiwatworakul et al. (2009) foram simuladas três estratégias de controlo automático de estores venezianos. A estratégia 1 consistia em ajustar o ângulo das lamelas tal que bloqueasse a iluminação direta mantendo as lamelas o mais aberto possível. A estratégia 2 é diferente da estratégia 1 apenas por acrescentar um índice que considera que se o seu valor for superior a 0,8 considera-se que o céu está nublado e com o céu nublado pode-se abrir totalmente as lamelas. A estratégia 3 funciona através de regras ajustando o ângulo da lamela para manter o DGI abaixo dos 22 e a iluminância interior acima dos 500 lux.

Em Vartiainen (2001) foram feitas simulações nas quais foi utilizado um estore veneziano para bloquear radiação solar direta com o intuito de evitar o encandeamento.

Em Lee et al. (2009) foram testados vários tipos de controlo automático de estores venezianos simples, estores de orientação dupla e estores de rolo. Um dos métodos de controlo automático dos estores simples utiliza a iluminância vertical exterior e a iluminância da superfície de trabalho como parâmetros de controlo. No caso da iluminância exterior estar acima dos 30 klux o ângulo da lamela era o ângulo de cut-off e, caso fosse necessário, fecharia mais a lamela para manter a iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux. No caso da iluminância exterior estar inferior a 30 klux o ângulo da lamela era o ângulo horizontal de modo a não bloquear a vista e, caso fosse necessário, fecharia mais a lamela para manter a iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux. Outro método de controlo incidia nos estores de dupla orientação e utilizava a iluminância vertical exterior como parâmetro de controlo. Os estores baixavam completamente caso a iluminância exterior fosse superior a 9-15 klux e abriam completamente caso contrário. Outro método de controlo incidia nos estores de rolo e utilizava a iluminância vertical exterior e a iluminância da superfície de trabalho como parâmetros de controlo. No caso da iluminância exterior estar acima dos 30 klux os estores baixavam o suficiente para bloquear a radiação direta e caso necessário baixaria mais para manter a iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux. Para a iluminância exterior abaixo dos 30 klux os estores abriam ou fechavam para manter a iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux.

Em Athienitis & Tzempelikos (2002) o método de controlo de estores utilizado consistia em calcular o ângulo da lamela apropriado enquanto a altura do estore estava fixa de modo a proporcionar uma vista ao utilizador. O ângulo da lamela é calculado tal que deixe passar o máximo de iluminação solar sem deixar passar iluminação direta, de modo a evitar encandeamento.

**Tabela 10 – Estratégias de controlo automático de estores utilizadas por outros autores**

<b>Categoria</b>	<b>Referência</b>	<b>Descrição</b>	
<b>Radiação</b>	da Silva et al. (2012)	Fechar os estores se a radiação solar vertical transmitida + radiação solar difusa for superior a 100 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	da Silva et al. (2012)	Fechar os estores se a radiação solar vertical transmitida + radiação solar difusa for superior a 200 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	da Silva et al. (2012); Zelenay (2011)	Fechar os estores se a radiação direta na superfície de trabalho for superior a 50 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	Reinhart (2004)	Fechar os estores se a radiação direta na superfície de trabalho for superior a 50 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário e controlar as lamelas de modo a terem o ângulo de cut-off.	
	Tzempelikos & Athienitis (2007)	Fechar os estores se a radiação direta na janela for superior a 20 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	EN ISO 13790 (2006)	Fechar os estores se a irradiância for superior a 300 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	Guillemin & Morel (2001)	Fechar os estores se a irradiância solar direta for superior a 100 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	Moeseke et al. (2007)	Propõe-se uma estratégia que feche os estores se a irradiância for superior a um valor no intervalo 200-300 W/m <sup>2</sup> e abri-las caso contrário.	
	Newsham (1994)	Fechar os estores se a intensidade do raio solar no utilizador for superior a 233 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
	Oh et al. (2012) (2013)	Propõe-se uma estratégia que feche as lamelas se a radiação solar incidente na janela for superior a 50 W/m <sup>2</sup> e abri-las caso contrário.	
	Shen & Tzempelikos (2012)	Fechar os estores se a intensidade da radiação solar direta incidente na fachada for superior a 20 W/m <sup>2</sup> e abrir caso contrário.	
<b>Radiação / índice de encandeamento</b>	Lee & Selkowitz (1994)	Fechar os estores se a radiação solar direta transmitida for superior a 94,5 W/m <sup>2</sup> ou se o GI exceder o valor de 20 e abrir caso contrário.	
	Aste et al. (2012)	Fechar os estores se a irradiância incidente na janela for superior a 200 W/m <sup>2</sup> (apenas no verão) ou se o GI exceder o valor de 19 e abrir caso contrário.	
<b>Índice de encandeamento</b>	da Silva et al. (2012)	Fechar os estores se o DGI for superior a 20 e abrir caso contrário.	
	da Silva et al. (2012)	Fechar os estores se o DGI for superior a 24 e abrir caso contrário.	
	Oh et al. (2012)	Fechar os estores se o DGI for superior a 22 e abrir caso contrário.	
	Oh et al. (2013)	Ajustar ângulo da lamela tal que o consumo energético seja o menor possível mantendo o DGI abaixo dos 22.	
<b>Índice de encandeamento / iluminância</b>	Chaiwiwatworakul et al. (2009)	Ajustar o ângulo da lamela tal que o DGI de mantenha abaixo dos 22 e se possível manter a iluminância na superfície de trabalho acima dos 500 lux.	
<b>Iluminância</b>	Ruck et al. (2001)	Ajustar ângulo da lamela tal que a iluminância no plano de trabalho se mantenha nos 500 lux.	
	Olbina & Hu (2012)	Ajustar o ângulo da lamela para permitir maior iluminância possível abaixo dos 2000 lux.	
	Kim et al. (2009a)	Fechar os estores se a iluminância exterior for superior a 16 klux e abrir caso contrário.	
	Kim et al. (2009a)	Fechar os estores se a iluminância exterior for superior a 25 klux e abrir caso contrário mas esse valor passava para 16 klux entre as 12:00 e as 13:00.	
	Reinhart & Voss (2003)	Fechar os estores se a iluminância exterior for superior a 28 klux e abrir caso contrário.	
	Reinhart & Voss (2003)	Fechar estores se a iluminância exterior for superior a 50 klux e abrir caso fosse menor que 28 klux.	
	Lee et al. (2009)	Fechar os estores se a iluminância exterior for superior a 9-15 klux e abrir caso contrário.	
<b>Bloquear radiação direta / iluminância</b>	Lee et al. (2009)	Se a iluminância vertical exterior for superior a 30 klux ajustar ângulo da lamela para ângulo de cut-off se e se necessário fechar mais o ângulo das lamelas para manter iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux e se a iluminância vertical exterior for inferior a 30 klux ajustar o ângulo para posição horizontal e se necessário fechar mais o ângulo das lamelas para manter iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux.	
	Lee et al. (2009)	Se a iluminância vertical exterior for superior a 30 klux ajustar a altura dos estores de modo a bloquear a radiação direta e se necessário fechar mais os estores para manter iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux e se a iluminância vertical exterior for inferior a 30 klux ajustar a altura dos estores para manter iluminância na superfície de trabalho no intervalo 570-670 lux.	
	Vine et al. (1998)	Ajustar os estores ou as lamelas para bloquear radiação direta e se necessário fechar mais os estores ou as lamelas para manter iluminância no intervalo 540-700 lux.	
	Vine et al. (1998)	Ajustar os estores ou as lamelas para bloquear radiação direta e se necessário fechar mais os estores ou as lamelas para manter iluminância no valor 793 lux (na parte da manhã) e 696 lux (na parte da tarde).	
	DiBartolomeo et al. (1996)	Fechar os estores se para bloquear radiação direta e se necessário fechar mais para manter iluminância no intervalo 485-675 lux.	
	Lee & Selkowitz (1994)	Ajustar as lamelas para bloquear radiação direta e se necessário fechar mais as lamelas para manter iluminância no valor 538 lux.	
	<b>Bloquear radiação direta</b>	Chaiwiwatworakul et al. (2009)	Ajustar ângulo da lamela para ângulo de cut-off.
		Chaiwiwatworakul et al. (2009)	Ajustar ângulo da lamela para ângulo de cut-off e no caso de o céu estar nublado abrir lamelas ao máximo.
Vartiainen (2001)		Ajustar ângulo da lamela para ângulo de cut-off.	
Athienitis & Tzempelikos (2002)		Ajustar ângulo da lamela para ângulo de cut-off mantendo altura do estore fixa para permitir o utilizador ter vista para o exterior.	

Em Lee & Selkowitz (1994) foram simuladas estratégias de controlo automático de estores nas quais se considerou 538 lux o valor de iluminância desejado na superfície de trabalho e o controlo de encandeamento era feito bloqueando a iluminação direta. Foi também modelada uma estratégia de simulação que representava o controlo manual dos utilizadores. Esta estratégia consistia em fechar completamente os estores quando a radiação solar direta transmitida excedia os  $94.5 \text{ W/m}^2$  ou quando o GI excedia o valor 20.

Através do controlo manual de estores por parte dos utilizadores é possível retirar valores desejados e apropriados como parâmetros para sistemas de controlo automático de estores.

Em Lindelöf (2007) através da operação manual de estores por parte dos utilizadores concluiu-se que iluminâncias de 400-500 lux são valores desejados de conforto, ao passo que em Newsham & Veitch (2000) concluiu-se que o valor de 458 lux pode ser considerado como valor de iluminância de referência, a partir do qual se pode controlar condições de iluminação natural. De modo mais geral no intervalo entre 200 lux e 500 lux conclui-se que não havia necessidade de mudar as condições de iluminância.

Em Sutter et al. (2006) concluiu-se que 50% dos estores eram ativados quando a iluminância vertical global estava acima dos 15 klux. Conclui-se também que 75% das pessoas abrem os estores quando valores de luminância da janela ficam abaixo dos  $1000 \text{ cd/m}^2$  e 75% das pessoas fecham os estores quando valores de luminância da janela ficam acima dos  $9000 \text{ cd/m}^2$ .

Em Zhang & Barrett (2012) verificou-se que o valor de  $150 \text{ W/m}^2$  pode ser considerado um valor de referência. Para valores inferiores a de  $150 \text{ W/m}^2$  estão mais estores fechados do que abertos, ao passo que para valores superiores a tendência inverte-se. Isto deve-se ao facto de que a razão principal de fecho dos estores é para evitar a penetração da luz solar. Os utilizadores sobem os estores para receberem mais luz solar sem ficarem encadeados, mesmo que isso signifique aumento dos ganhos solares.

Em Vine et al. (1998) no modo manual de controlo, no qual os utilizadores ficam totalmente responsáveis pela operação dos estores, os valores médios de iluminância escolhidos como valores preferenciais foram  $1493 \pm 653 \text{ lux}$  da parte da manhã e  $1030 \pm 248 \text{ lux}$  da parte da tarde.

### 3. Simulação energética de estratégias de controlo automático de estores venezianos

De modo a testar e comparar estratégias de controlo automático de estores foi necessário identificar quais as estratégias a utilizar e como medir o seu desempenho. Para testar e comparar diferentes estratégias de controlo automático de estores foi utilizado um modelo computacional de um gabinete real num *software* de simulação térmica. O gabinete utilizado neste trabalho, já modelado em Faustino (2012), foi atualizado e modificado para o objetivo deste estudo. O gabinete localiza-se no IST, Lisboa e foi modelado e simulado no *Energy Plus*.

#### 3.1. Descrição do caso de estudo

##### 3.1.1. Edifício - Pavilhão de civil

O caso de estudo consiste num gabinete do Pavilhão do Departamento de Engenharia Civil (DECivil) localizado no campus da Alameda do IST, que se encontra numa zona central da cidade de Lisboa como de pode ver na Figura 5. No canto noroeste deste campus encontra-se o pavilhão de Engenharia Civil que foi construído no início dos anos 90.

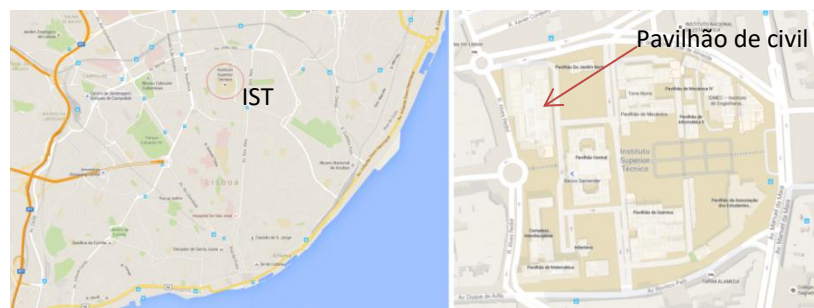


Figura 5 – Localização do IST em Lisboa (esquerda) e do pavilhão de civil no campus do IST (direita)

Este edifício tem uma altura máxima da fachada de 24 m e tem sete pisos dos quais quatro são pisos elevados (0, 1, 2, 3). O piso 2, onde se encontra o gabinete em estudo, tem vários gabinetes de trabalho dos centros de investigação, gabinetes de professores, salas de secretariados e alguns laboratórios informáticos. Neste piso as salas e gabinetes do pavilhão estão distribuídos maioritariamente em fachadas orientadas a este e oeste, com a fachada exterior a ter cerca de 66% de área de envidraçados.

##### 3.1.2. Gabinete

O gabinete simulado no presente estudo (ver Figura 6) utilizado apenas por um utilizador encontra-se no segundo piso, piso intermédio, do pavilhão de civil no IST em Lisboa. A fachada orientada para Este é a única superfície em contacto com o exterior. Com um pé direito de 3,15 metros e uma área de 14,06 m<sup>2</sup> o gabinete tem um volume de 44,30 m<sup>3</sup>. Neste gabinete há diversos equipamentos: computador; monitor; *scanner*; impressora; telefone; *fax*. A iluminação é feita através de um candeeiro de secretária e duas luminárias de teto com lâmpadas fluorescentes.



**Figura 6 – Imagem 3D do gabinete (Faustino, 2012)**

Com apenas uma parede exterior, podendo-se considerar, por simplificação todas as restantes fronteiras adiabáticas, as trocas térmicas desta superfície ganham maior relevância em particular as trocas pelo envidraçado. Esta parede tem uma área de  $12 \text{ m}^2$  sendo que o envidraçado representa cerca de 66% dessa área ( $8 \text{ m}^2$ ).

Como se pode observar na Tabela 11, a parede exterior é constituída por uma parte opaca constituída por uma parede dupla e também por um vão envidraçado com um dispositivo de sombreamento. A parede dupla é em alvenaria de tijolo furado de 11 cm no interior, caixa-de-ar de 9 cm e painel pré-fabricado de betão armado com 8 cm de espessura. O acabamento do lado interior é constituído por reboco pintado enquanto não existe acabamento exterior. O vão envidraçado possui um caixilho de alumínio termolacado de correr sem corte térmico e o vidro é simples temperado de 6 mm de espessura.

Na fachada existem estores exteriores venezianos de dupla orientação Warema E80A6 cujas lamelas têm 8 cm de largura, 0,44 mm de espessura e um espaçamento entre si de 7 cm. Os valores da refletância são diferentes consoante a cor das lamelas, neste caso para a cor prateada (*silver* no catálogo (WAREMA, 2015)) a refletância solar é 0,58 e a refletância visual é de 0,57. Como as lamelas são de alumínio considerou-se que as lamelas tinham a condutibilidade térmica do material alumínio,  $205 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

A parede interior (ver Figura 7 (esquerda)), Oeste, que está do lado oposto à parede exterior e em contato com o corredor, é constituída por três áreas de envidraçado com betão na sua envolvente, por uma porta de madeira e na restante área por alvenaria em parede simples.

Como se pode ver na Tabela 11 a parede é a alvenaria simples de tijolo furado de 7 cm e rebocado em ambos os lados com 2 cm de espessura.

As restantes paredes são constituídas por divisórias em pladur duplo de 10 mm de espessura com 10 cm de caixa-de-ar. Na parte superior destas paredes existem área de envidraçado com duas camadas de vidro de 3 mm separadas por uma caixa-de-ar de 10 cm. Além disto, como se pode ver na Figura 7 (centro), ambas as paredes têm uma porta de acesso ao gabinete adjacente. Na parede a norte existe ainda um pilar em betão armado à vista ( $55 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$ ).

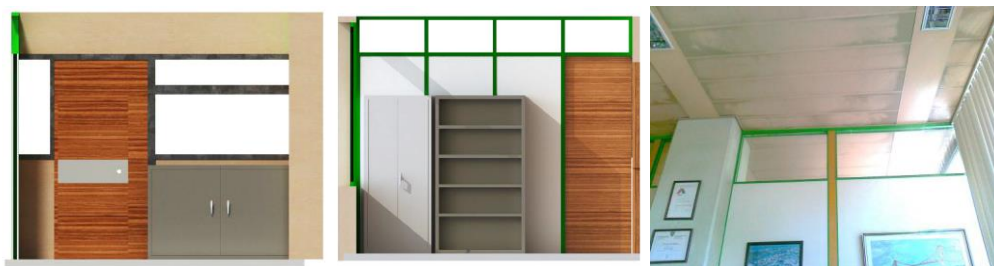
A laje é uma laje de cocos de 40 cm de espessura e forra com lajetas de 4 cm. Assente nesta laje está um pavimento composto por placas de cortiça, ou “corticite”.



**Tabela 11 - Desenho legendado das camadas de material que constituem as paredes exterior e interior**

Elemento construtivo	Perfil transversal	Material	Espessura (cm)	U (W/(m <sup>2</sup> °C))
Parede exterior (Este)		(1) Betão armado com % armadura < 1 %	8	1,48
		(2) Caixa-de-ar não ventilada	9	
		(4) Tijolo cerâmico furado (11 cm)	11	
		(3) Argamassa e reboco tradicional	2	
		-	30 (total)	
Parede interior (Sul, Oeste e Norte)		(1) Argamassa e reboco tradicional	2	2,08
		(2) Tijolo cerâmico furado (7 cm)	7	
		(3) Argamassa e reboco tradicional	2	
		-	11 (total)	

Como de pode ver na Figura 7 (direita) existe um teto falso com placas de alumínio perfuradas e tem duas lâmpadas TL-D58w/840 Phillips para iluminação elétrica da divisão.



**Figura 7 – Vista da parede interior, que está orientada para Oeste, de dentro do gabinete (esquerda), vista da parede interior, que está orientada para sul, de dentro do gabinete (centro), fotografia de parte to teto e de parte da parede interior norte do gabinete (direita), (Faustino, 2012)**

Os elementos estruturais como lajes, vigas e pilares são em betão armado.

### 3.2. Metodologia

Neste subcapítulo é apresentada a metodologia do trabalho, em particular as estratégias de controlo dos estores venezianos propostas assim como a forma de avaliação do desempenho de cada estratégia adotada no presente estudo com enfoque nas métricas de conforto visual e medidas de consumo energético.

No entanto existem fatores que não foram considerados neste trabalho como a vista da janela, que tem um impacto significativo mas que é difícil de quantificar, ou a variabilidade das preferências pessoais de conforto visual dos utilizadores.

### 3.2.1. Estratégias de controlo

Como se pode observar na Tabela 12, para este trabalho foram consideradas 14 estratégias de controlo automático de estores diferentes. Apesar dos estores serem de dupla orientação utilizaram-se estratégias de controlo de dupla orientação mas também estratégias de estores venezianos tradicionais. A diferença entre as estratégias dos dois tipos de estores é essencialmente que nos estores de dupla orientação se mantém a secção superior dos estores com as lamelas abertas (horizontais) de modo a entrar maior iluminação natural, desde que não incida diretamente na superfície de trabalho.

As estratégias do 1 ao 11 são estratégias para estores simples e as estratégias do 12 ao 14 são estratégias para estores de dupla orientação. Entre as estratégias de controlo simuladas destacam-se três tipos de estratégias: estratégias estáticas; estratégias regulamentares; estratégias dinâmicas.

**Tabela 12 – Estratégias de controlo**

Estratégia	Tipo de estratégia	Tipo de estore	Descrição
E1	Estática	Simples	Estores abertos
E2			Estores fechados
E3	Lamelas a 90° (abertas)		
E4	Lamelas a 45°		
E5	Regulamento		Estores fechados 60% do dia
E6			Estores fechados 60% da área
E7	Estores fechados se a radiação solar for maior que 300 W/m <sup>2</sup>		
E8	Dinâmica		Lamelas com ângulo de cut-off
E9			Estores fechados se o DGI for maior que 22
E10			Lamelas com ângulo que permita maior DGI abaixo dos 22
E11			Lamelas com ângulo que permita a menor iluminância acima dos 500 lux
E12	Estática	Dupla orientação	Secção superior com lamelas a 90° e secção inferior com os estores fechados
E13	Dinâmica		Secção superior com lamelas a 90° e secção inferior com as lamelas com ângulo de cut-off
E14			Secção superior com lamelas a 90° e secção inferior com os estores fechados se o DGI for maior que 22

As estratégias estáticas representam casos limite e foram simuladas com o objetivo de comparar resultados com as estratégias dinâmicas. A estratégia 1 (E1) representa os estores completamente abertos durante todo o período da simulação, permitindo a entrada de toda a radiação. A E2 representa os estores fechados e as lamelas fechadas durante todo o período da simulação, bloqueando toda a radiação. A E3 representa os estores fechados e as lamelas completamente abertas, 90°, durante todo o período de simulação. A E4 representa os estores fechados e as lamelas meio abertas, 45°, durante todo o período de simulação. A E12 representa o segmento superior dos estores com as lamelas a 90° e o segmento inferior dos estores fechado com as lamelas fechadas durante todo o período de simulação. Permitindo deste modo entrada de radiação na parte superior da janela e bloqueando a parte inferior da janela.

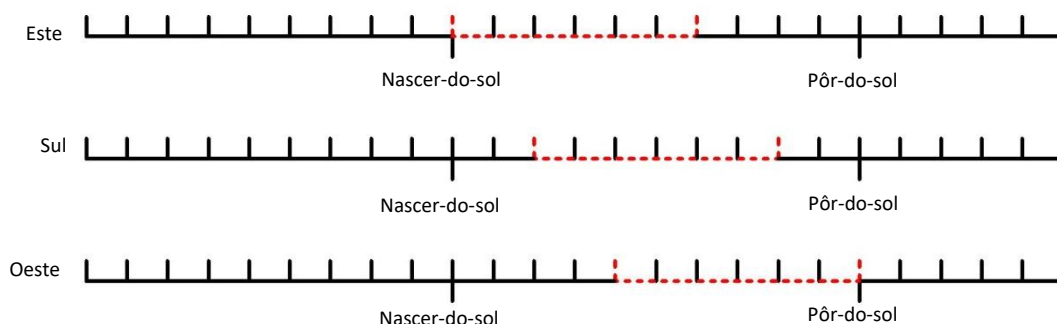
As estratégias regulamentares representam métodos de cálculo presentes no regulamento português e na EN ISO 13790 (Despacho n.º 15793-K/2013, 2013; EN ISO 13790, 2006; Portaria n.º 349-D/2013, 2013).

A E5 representa o método de cálculo apresentado em (Despacho n.º 15793-K/2013, 2013). Efetivamente no cálculo do fator solar do vão envidraçado na estação de arrefecimento é considerado um índice que representa a fração de tempo do dia em que os estores estão ativados consoante a orientação deste vão (ver Tabela 13). Para as orientações Oeste, Sul e Este considera-se que os estores estão ativados 60% da duração do dia. Para a orientação Norte e para qualquer orientação na estação de aquecimento considera-se que os estores estão sempre abertos.

**Tabela 13 – Fração de tempo e que os dispositivos de sombreamento se encontram ativos (Despacho n.º 15793-K/2013, 2013)**

Orientação do vão	N	NE/NO	S	SE/SO	E/O	H
Fração do dia ativo	0	0,4	0,6	0,7	0,6	0,9

O regulamento especifica a fração do dia mas não a altura do dia em que os estores devem estar ativos. Na tentativa de distribuir esses 60% eficientemente considerou-se a altura do dia em que a radiação solar direta no vão envidraçado, consoante a orientação, seria máxima para mitigar ao máximo os efeitos da radiação solar (ver Figura 8). Para a orientação Este esses 60% de período de acionamento do estore foram adotados durante o período da manhã, começando ao nascer do sol. Para a orientação Oeste os 60% foram colocados ao fim do dia, acabando ao pôr-do-sol. Para a orientação Sul os 60% foram centrados ao meio dia solar.



**Figura 8 – Exemplificação da distribuição de 60% do tempo em que os estores estão fechados (tracejado) consoante a orientação do vão envidraçado**

As estratégias E6 e E7 representam condições alternativas a respeitar no caso de simulação segundo o RECS e no caso da E7 também na EN ISO 13790 (EN ISO 13790, 2006).

A E6 considera os estores ativos constantemente numa área correspondente a 60% da área total do vão envidraçado. Considerou-se, por uma questão de realismo, 60% da área superior da janela.

A E7 considera que os estores estão ativos no caso da radiação solar, incidente na fachada for superior a 300 W/m<sup>2</sup>. Neste caso radiação solar é a global que incluiu radiação solar direta e difusa.

As estratégias dinâmicas representam estratégias cujo controlo depende de parâmetros dinâmicos que têm em conta o conforto do utilizador. Estas estratégias estão ativas apenas durante o horário de trabalho.

Na E8 operam-se as lamelas automaticamente de modo a que estas tenham o ângulo de cut-off. Este ângulo é o mais aberto possível enquanto bloquear a radiação direta (ver Figura 10), permitindo apenas a entrada de radiação difusa. Nesta estratégia considera-se que a iluminação direta é responsável pelo encandeamento dos utilizadores.

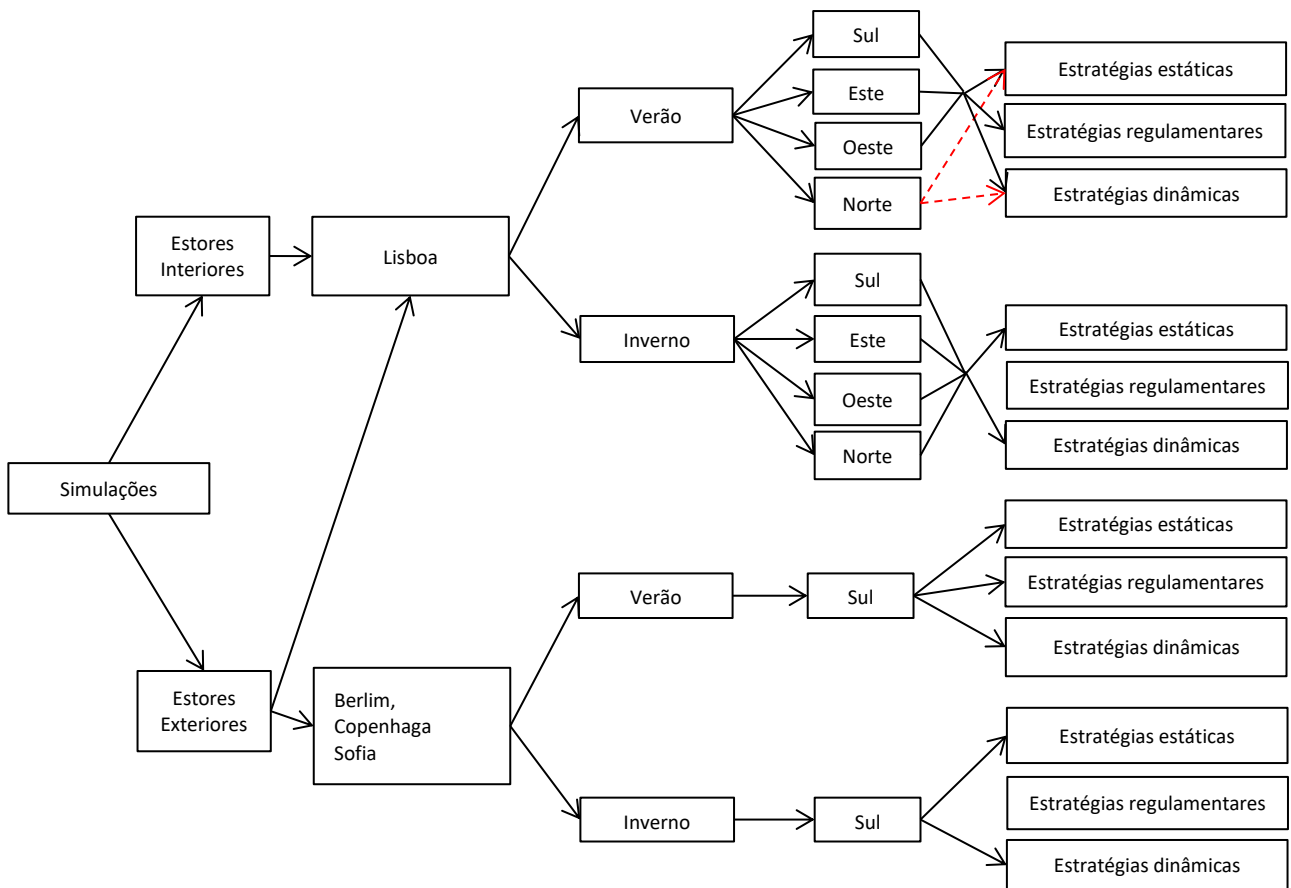


Figura 9 – Diagrama das simulações efetuadas consoante as condições externas

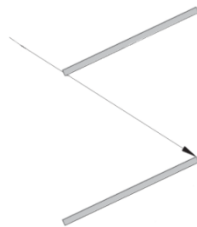


Figura 10 – Ângulo de cut-off (Gomes, Santos, & Rodrigues, 2014)

A E13 mantém o segmento superior dos estores com as lamelas a um ângulo de 90° (lamelas abertas) e o segmento inferior com as lamelas no ângulo de cut-off, idêntico à E8.

Na E9 opera-se os estores consoante o valor do DGI à altura média do olho de uma pessoa sentada, 1,2 m. Os estores fecham em caso de haver encandeamento para o utilizador, ou seja, o valor do DGI for superior a 22 e abriam caso contrário.

A E14 mantém o segmento superior dos estores com as lamelas a um ângulo de 90° (aberto) e o segmento inferior com controlo de estores de modo a fecharem caso o DGI ser superior a 22 (idêntico a E9).

A E10 representa um controlo do ângulo das lamelas tal que o ângulo destas permita a maior abertura possível sem que o DGI à altura do olho ultrapasse os 22. A E11 representa um controlo do ângulo das lamelas, tal que estas permitam a menor abertura possível que mantenha a iluminância na superfície de trabalho acima dos 500 lux.

Estas estratégias foram simuladas para diferentes condições externas. Essas condições estão relacionadas com a localização geográfica (Lisboa, Berlim, Copenhaga, Sofia); tipo de estores (interiores ou exteriores); orientação da fachada (Sul, Este, Oeste e Norte); período do ano (Verão e Inverno). Várias combinações destas condições foram testadas como se pode ver na Figura 9.

### 3.2.2. Medidas de desempenho

Para todas as simulações foram calculadas um total de nove métricas de conforto visual (Tabela 14) distribuídas em três tipos: quantidade de luz natural, uniformidade da iluminação natural, encandeamento.

**Tabela 14 – Métricas de conforto visual**

Métrica	Tipo de métrica	Descrição
<b>UDI100</b>	Quantidade de luz	Rácio unitário do período de tempo em que a iluminância está abaixo dos 100 lux.
<b>UDI100-500</b>		Rácio unitário do período de tempo em que a iluminância está entre os 100 lux e os 500 lux.
<b>UDI500-2000</b>		Rácio unitário do período de tempo em que a iluminância está entre os 500 lux e os 2000 lux.
<b>UDI100-2000</b>		Rácio unitário do período de tempo em que a iluminância está entre os 100 lux e os 2000 lux.
<b>UDI2000</b>		Rácio unitário do período de tempo em que a iluminância está acima dos 2000 lux.
$\frac{U_{\min}}{U_{\max}_{>0,5}}$ (%)	Uniformidade da iluminação natural	Percentagem de tempo em que o rácio desta métrica está abaixo dos 0,5.
$\frac{U_{\min}}{U_{\max}_{>0,7}}$ (%)		Percentagem de tempo em que o rácio desta métrica está abaixo dos 0,7.
$\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}}_{>0,7}}$ (%)		Percentagem de tempo em que o rácio desta métrica está abaixo dos 0,7.
<b>DGI&lt;22(%)</b>	Encandeamento	Percentagem de tempo em que o DGI está abaixo dos 22.

Para medir a quantidade de luz natural foi calculado o UDI (ver 2.1.1.6). Para o efeito calcularam-se, no período de ocupação do gabinete, cinco índices complementares: UDI<sub>100</sub>, para iluminâncias abaixo dos 100 lux; UDI<sub>100-500</sub>, para iluminâncias entre 100 lux e 500 lux; UDI<sub>500-2000</sub>, para iluminâncias entre os 500 lux e os 2000 lux; UDI<sub>100-2000</sub>, para iluminâncias entre os 100 lux e os 2000 lux; UDI<sub>2000</sub>, para iluminâncias acima dos 2000 lux. Sendo o UDI<sub>100-2000</sub> o mais relevante, os índices UDI<sub>100-500</sub> e UDI<sub>500-2000</sub> foram calculados para diferenciar a parte da iluminância útil autónoma, isto é, que não necessita de iluminação elétrica.

Para medir a uniformidade da iluminação natural calcularam-se dois rácios de iluminância na superfície de trabalho:  $U_{\min}/U_{\max}$ ;  $U_{\min}/U_{\text{méd}}$ .  $U_{\min}$  refere-se à iluminância mínima na superfície de trabalho,  $U_{\text{méd}}$  refere-se à

iluminância média na superfície de trabalho e  $U_{m\acute{a}x}$  refere-se à iluminância máxima na superfície de trabalho. Foram utilizadas como métricas as percentagens do tempo de ocupação nas quais estes índices estavam acima de valores de referência (Tabela 15).

**Tabela 15 – Valores de referência de rácios de iluminância**

Rácios CIBSE (2012); Dubois,( 2001a) (2001b); Saunders (1969); Slater & Boyce (1990)	Aceitável	Mínimo
$U_{m\acute{i}n}/U_{m\acute{a}x}$	0,7	0,5
$U_{m\acute{i}n}/U_{m\acute{e}d}$	-	0,7

Para medir o nível de encandeamento calculou-se a percentagem de tempo em que o DGI ao nível do olho de um utilizador sentado (1,2 m) estava abaixo de 22, semelhante a métricas utilizadas por outros autores (Oh et al., 2012, 2013). No presente trabalho optou-se por fazer o cálculo à altura do olho de um utilizador sentado de 1,2 m (Lee et al., 2009) embora noutros trabalhos tenha sido calculado à altura do olho de um utilizador em pé (Oh et al., 2012) ou à altura da superfície de trabalho (Aste et al., 2012).

O método como o DGI é calculado no EP tem algumas modificações (equação (15)) face à sua definição apresentada nas equações (10) e (11). No índice de encandeamento a parcela da luminância da fonte luminosa ( $L_s$ ) considerou-se que era igual à luminância da janela ( $L_{jan}$ ), aproximação semelhante à adotada por Chaiwiwatworakul et al. (2009), e a parcela do ângulo sólido ( $\omega_s$ ) foi modificado para ter em conta a direção para a qual o utilizador está virado ( $\Omega$ ).

$$G_i = \left( \frac{L_{jan}^{1,6} \times \Omega^{0,8}}{L_f + 0,07\omega^{0,5} \times L_{jan}} \right)$$

- $\Omega$  – ângulo sólido subtendido pela janela modificado para considerar a direção da orientação do utilizador (sr) (15)  
 $L_f$  – luminância de fundo ( $cd/m^2$ )  
 $\omega$  – ângulo sólido subtendido pela superfície da janela do ponto de vista do observador (sr)  
 $L_{jan}$  – luminância média da janela ( $cd/m^2$ )

Neste caso, considerou-se que o utilizador estava orientado para uma das paredes interiores, 90° no sentido dos ponteiros do relógio da orientação da fachada.

Para todas as simulações foram calculadas três componentes de necessidades energéticas: necessidades de energia para arrefecimento, necessidades de energia para aquecimento, consumo de iluminação elétrica. As necessidades de energia para arrefecimento e aquecimento, calculadas em  $kWh/m^2$ , representam respetivamente a energia útil necessária para arrefecer e aquecer a temperatura do ar para a temperatura de conforto (considerada abaixo de 25°C na estação de arrefecimento e acima de 20°C na estação de aquecimento). Para que estes valores representem o consumo real do sistema de AVAC é necessário ajusta-los à eficiência dos equipamentos, dividindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento de por índices previstos pelo regulamento português (Portaria n.º 349-B/2013, 2013) COP e EER respetivamente. Os valores

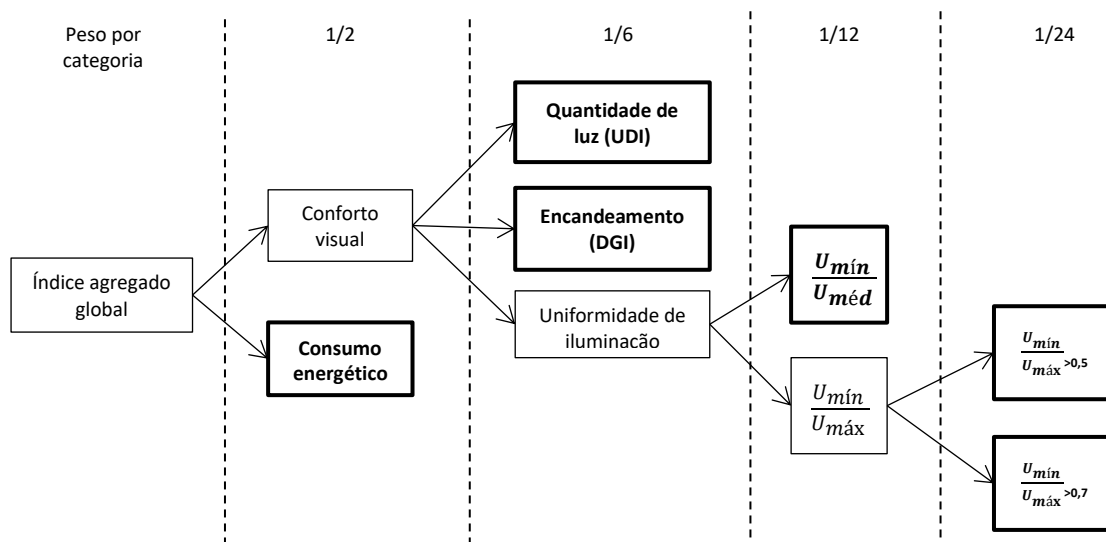
do COP e do EER foram definidos de acordo com o regulamento português para um equipamento de ar condicionado multi-split de classe B como 3,40 e 3,00 respetivamente. O consumo de iluminação elétrica, calculada em kWh/m<sup>2</sup>, representa a energia elétrica consumida pelo sistema de iluminação elétrica. Estas medidas de energia representam a energia útil. Na realidade a energia consumida, energia final, dependerá dos rendimentos dos equipamentos de AVAC e do sistema de iluminação elétrica.

De modo a quantificar o desempenho das estratégias foi utilizado um método de análise multicritério, proposto por Díaz-Balteiro & Romero (2004), de modo a criar um índice agregado (ver equação (16)) que representa o desempenho energético e o desempenho do conforto visual de cada estratégia. Deste modo, torna-se possível a comparação direta entre os desempenhos de cada estratégia para a mesma orientação.

$$IS_i = \sum_{j=1}^m W_j \bar{R}_{ij} \forall i$$

- $IS_i$  – índice agregado da estratégia i  
 $m$  – número de índices normalizados agregados em IS  
 $W_j$  – peso do índice j  
 $\bar{R}_{ij}$  – índice normalizado j da estratégia i

Para comparar o desempenho das diferentes estratégias optou por se calcular três índices agregados (ver Tabela 16). Os pesos foram distribuídos de forma equitativa segundo categorias. Na Figura 11 pode ver-se a distribuição dos pesos de acordo com as categorias identificadas para o índice agregado global, os outros 2 índices estão explicados em baixo.



**Figura 11 – Distribuição dos pesos segundo categorias para o cálculo do índice agregado do desempenho global**

Para o índice agregado do conforto visual consideraram-se três categorias de métricas com pesos idênticos de 1/3: métricas de quantidade de luz (UDI); métricas de encandeamento (DGI<sub><22</sub> (%)); métricas de uniformidade de iluminação ( $\frac{U_{mín}}{U_{máx}} > 0,5$  (%);  $\frac{U_{mín}}{U_{máx}} > 0,7$  (%);  $\frac{U_{mín}}{U_{méd}} > 0,7$  (%)). Dentro da categoria de métricas de uniformidade de

iluminação atribuiu-se peso idêntico de 0,5 às métricas que analisaram o rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\max}}$  e o rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}}}$ . Por sua vez, no caso das métricas que analisam o rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\max}}$  atribuiu-se também um peso de 0,5 a cada uma das métricas neste grupo (  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,5}}$  e  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,7}}$  ). Para o índice agregado do consumo energético considerou-se apenas um índice, o consumo energético total. Como tal, este índice teve o peso de um no cálculo deste índice agregado. Para o índice agregado global consideraram-se pesos idênticos (0,5) para o consumo energético total e para as métricas de conforto visual.

**Tabela 16 – Pesos atribuídos a cada índice para o cálculo dos diferentes índices agregados**

	UDI	DGI<22 (%)	$\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,5}}$ (%)	$\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,7}}$ (%)	$\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}>0,7}}$ (%)	Consumo energético total
Índice agregado do conforto visual	1/3	1/3	1/12	1/12	1/6	-
Índice agregado do consumo energético	-	-	-	-	-	1
Índice agregado do desempenho global	1/6	1/6	1/24	1/24	1/12	1/2

Para o cálculo dos índices agregados, normalizaram-se os valores das métricas de conforto visual e do valor total dos consumos energéticos e a fórmula utilizada para a normalização é diferente consoante o tipo de índice a ser normalizado. No caso das métricas de conforto visual, quanto maior o seu valor mais favorável a situação, e para estes casos utilizou-se a equação (17) de modo a normalizar os valores entre zero (menos favorável) e um (mais favorável).

$$\bar{R}_{ij} = \frac{R_{ij} - R_{*j}}{R_j^* - R_{*j}} \forall i, j \quad (17)$$

- $R_{ij}$  – valor não normalizado do índice j para a estratégia i
- $R_{*j}$  – valor menos favorável do índice j entre todas as estratégias
- $R_j^*$  – valor mais favorável do índice j entre todas as estratégias

Enquanto no caso do consumo energético quanto menor o índice mais favorável a situação, e para estes casos utilizou-se a equação (18), de modo a normalizar os valores entre zero (menos favorável) e um (mais favorável).

$$\bar{R}_{ij} = \frac{R_{*j} - R_{ij}}{R_{*j} - R_j^*} \forall i, j \quad (18)$$

### 3.3. Descrição do software utilizado

O software escolhido para a simulação foi o *Energy Plus*, em seguida explicar-se-á um pouco da sua estrutura e algumas das suas propriedades. Muita desta informação está presente nos documentos de apoio do programa



(Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013a, 2013b, 2013c, 2013d, 2013e, 2013f). Além disso utilizaram-se outros softwares em conjunto com o EP para atingir alguns objetivos específicos: EMS e MLE+.

O gabinete foi originalmente modelado por Faustino (2012) na versão 1.2.0 do *Energy Plus*. Posteriormente foi atualizado para a versão 8.1.0 através de ferramentas adequadas para o efeito, disponibilizadas no sítio da internet referente ao programa *Energy Plus* ("<http://energyplus.helpserve.com/Knowledgebase/List/Index/47>," n.d.). Neste capítulo serão enumerados e explicados os elementos do modelo original com a exceção de alguns elementos que foram modificados ou criados para o modelo atualizado.

### 3.3.1. Energy Plus

Criado em 2001 pelo *US Department of Energy*, o *Energy Plus* tem como a sua origem o BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) e o DOE-2, dois programas desenvolvidos no final dos anos 70 e início dos anos 80, do século passado respetivamente.

O programa foi desenvolvido originalmente em linguagem FORTRAN90 como um motor de simulação e não como uma interface para o utilizador, isto é, foi pensado para que outros programas pudessem servir como interface. Esta abordagem juntamente com a disponibilidade do *software* (código aberto) promove o desenvolvimento de interfaces específicas para necessidades particulares da sua utilização. O programa é constituído por vários módulos que funcionam em conjunto para efetuar os cálculos organizados segundo a Figura 12 (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013b, 2013e).

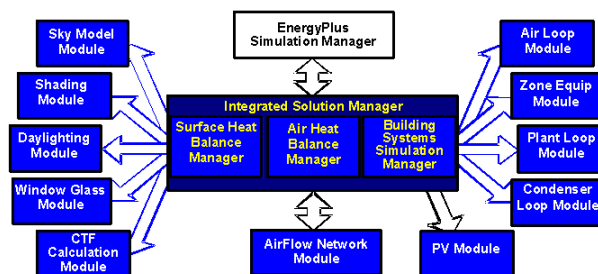


Figura 12 – Esquema do programa Energy Plus (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013e)

O *Energy Plus* calcula as necessidades de arrefecimento e/ou aquecimento para manter uma determinada temperatura numa dada zona térmica tendo em conta os consumos elétricos, o funcionamento de sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento, níveis de iluminação, entre outros. Isto é realizado simulando o modelo do edifício e os respetivos sistemas, quando expostos a diferentes condições climáticas.

Como *input* foram utilizados dois ficheiros: um ficheiro com extensão *idf* (*input data file*), e um ficheiro com extensão *epw* (*EnergyPlus weather*). O ficheiro *idf* é um ficheiro em ASCII que descreve o modelo e o ficheiro *epw* é também um ficheiro em ASCII que contém informação meteorológica local de hora a hora ou em

intervalos menores. Para associar estes dois ficheiros utiliza-se o *EP-Launch* que tem uma interface (ver Figura 13 (direita)) que permite selecionar os dois ficheiros e correr a simulação.

Neste trabalho, o ficheiro *epw* diz respeito à cidade de Lisboa. As informações meteorológicas deste ficheiro climático foram recolhidas pelo Instituto de Meteorologia 1951-80, pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) e outras fontes de informações publicamente acessíveis. Os ficheiros *epw* foram criados em 2005 pelo INETI e disponibilizados publicamente no sítio da internet do EP (“<https://energyplus.net/weather>,” n.d.)

Existe um vasto número de ficheiros de output possíveis no programa (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013d). Vão ser explicados apenas alguns desses ficheiros de *output*, considerados mais relevantes para o presente estudo.

O ficheiro de erros “.err” contém informação sobre todos os erros que ocorreram na simulação. Existem três categorias de erros: *Warning*; *Severe*; *Fatal*. Os erros na categoria *Warning* servem apenas como aviso de situações que, não sendo verdadeiramente de erro nem sendo situações graves, poderão chamar à atenção de situações indesejáveis. Os erros na categoria *Severe* são erros graves que apesar de não impossibilitar a execução da simulação devem ser corrigidos. Por fim, os erros na categoria *Fatal* são erros que fazem o programa abortar impedindo assim a finalização da simulação, pelo que obrigatoriamente têm de ser corrigidos.

O ficheiro “.edd” é produzido se for criado um objeto *Output:EnergyManagementSystem* (ver Anexo G) no modelo do EP. Este ficheiro contém três tipos de informação sobre o *Energy Management System*: uma lista dos atuadores disponíveis; uma lista das variáveis internas disponíveis; um registo da execução dos programas criados pelo utilizador em Erl (*EnergyPlus Runtime Language*).

O ficheiro “.rdd” é produzido criando um objeto *Output:VariableDictionary* (ver Anexo G) no ficheiro de *input* do modelo. Este ficheiro tem uma lista das variáveis de *output* do EP disponíveis.

O ficheiro “.csv” contém informação sobre os valores das variáveis de *output* especificadas no programa pelo utilizador e a informação está em formato de folha de cálculo. Neste caso a extensão do ficheiro é *csv* mas pode ter extensão *.tab* ou *.txt*, sendo que a única diferença é terem diferentes separadores entre os valores.

O ficheiro “nome do ficheiro”*Map.tab* é produzido criando um objeto *Output:IlluminanceMap* (ver 3.3.3.5). Este ficheiro contém informação sobre a iluminância natural numa grelha de pontos, com um máximo 2500 pontos a uma altura fixa, definida pelo utilizador no objeto anteriormente referido. Neste caso a extensão do ficheiro é *.tab* mas pode ter extensão *.csv* ou *.txt*, sendo que a única diferença é terem diferentes separadores entre os valores.

O ficheiro de desenho “.dxf” é produzido criando um objeto *Output:Surfaces:Drawing* no ficheiro de *input* do modelo. Este é um ficheiro ASCII com uma estrutura própria de modo a ser lido por programas de visualização

específicos como *Autocad* entre outros. Neste ficheiro estão definidas todas as superfícies e uma seta com a direção norte ao nível do solo.

Neste trabalho as estratégias de controlo automático de estores têm particular importância. O *Energy Plus* tem vários tipos de controlo automatizado de estores (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013f), estes podem ser controlados através de um horário de funcionamento e/ou por métodos que se focam em objetivos específicos: na minimização das cargas de arrefecimento limitando os ganhos solares, minimização das cargas de aquecimento fechando durante a noite para isolar (bom para estores de materiais muito isolantes) e abrindo durante o dia para aproveitar os ganhos solares, minimizar cargas de aquecimento ou arrefecimento exclusivamente através das propriedades isolantes do material dos estores e controlar os estores através de um índice de encandeamento de conforto baixando os estores quando este é ultrapassado., entre outros.

O programa também permite controlar o ângulo da lamela nos estores venezianos de três formas: ângulo fixo num determinado valor, ângulo controlado por um horário (pode mudar apenas de hora a hora) e bloquear radiação direta.

O *software* está limitado apenas a esses tipos de controlo, para utilizar tipos de controlo mais personalizados é necessário utilizar ferramentas específicas. Foram utilizadas duas maneiras diferentes de atingir esse objetivo: utilizar o EMS (*Energy Management System*) e utilização de *softwares* que possibilitam co-simulações entre o EP e outros programas, como MLE+.

### **3.3.1.1. Energy Management System**

O EMS permite controlo personalizado e sobreposição de alguns aspetos do EP. Através da criação de programas por parte do utilizador em Erl (*EnergyPlus Runtime Language*), uma linguagem simples própria do programa. No EMS existem várias ferramentas e classes de objetos no EP que facilitam a sua utilização. Neste capítulo apenas serão explicados alguns dos que foram considerados mais relevantes para este trabalho. (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013a)

Ao se criar um objeto *EnergyManagementSystem:Sensor* declara uma variável global no EMS. Esta variável pode ser qualquer uma das variáveis de output do EP, isto possibilita a interação com valores ambientais que variam ao longo da simulação. Uma lista dos possíveis sensores encontra-se no ficheiro de output <nome do ficheiro de *input* do modelo>.rdd.

AO se criar um objeto *EnergyManagementSystem:Actuator* declara-se uma variável global no EMS. Esta variável pode atuar sobre diversos valores de objetos no EP, neste trabalho foi usado para fechar e abrir estores, assim como mudar o ângulo das lamelas dos estores venezianos. Uma lista dos possíveis atuadores encontra-se no ficheiro de output <nome do ficheiro de *input* do modelo>.edd.

Também ao se criar um objeto *EnergyManagementSystem:GlobalVariable* declara uma variável global no EMS. Esta variável pode ser usada para guardar valores intermédios. Além disto esta variável é global e por essa

razão pode ser acedida em vários programas do EMS, ao contrário de outras variáveis criadas localmente em cada programa do EMS.

Variáveis locais também podem ser criadas sem serem explicitamente declaradas. Podem ser criadas no programa e utilizadas para armazenar informação temporária ou intermédia.

Variáveis *Built-in*, ou pré-definidas, são variáveis já declaradas pelo EP e podem ser usadas em qualquer programa do EMS. Estas variáveis têm informação como data, hora,  $\pi$ , entre outras.

Para escrever um programa no EMS tem de ser criado um objeto *EnergyManagementSystem:Program*. Neste objeto escreve-se na primeira linha o nome do programa e nas restantes linhas escreve-se o programa em Erl.

Para o programa ser executado durante a simulação é necessário criar um objeto *EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager*. Neste objeto tem de se especificar o nome do objeto em causa, o nome do programa a executar e em que *calling point* é que o programa irá ser executado, referindo-se *calling point* aos pontos da simulação em que o EP permite que o EMS corra os seus programas se, assim estiver definido, existem vários pontos pré-definidos ao longo do programa onde isto pode acontecer, tal como mostra a Figura 13.

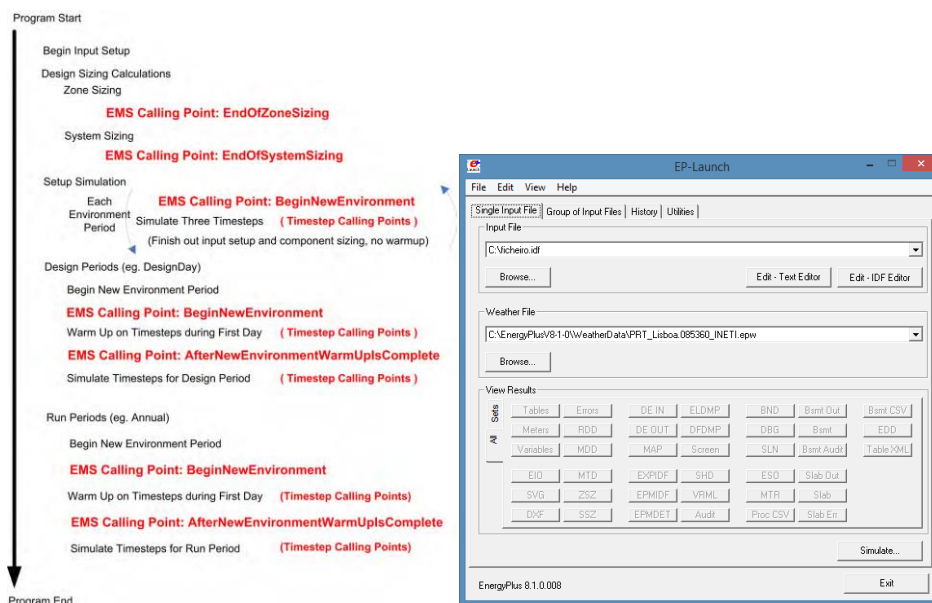


Figura 13 – Diagrama das fases de simulação do EP e dos respetivos calling points (esquerda), interface do EP-Launch (direita)

### 3.3.2. MLE+

O MLE+ é uma *toolbox* do *Matlab* que permite a co-simulação entre o EP e o *Matlab* (ver Figura 14), aliando a simulação energética do primeiro com as capacidades de programação do segundo (Bernal et al., 2012).

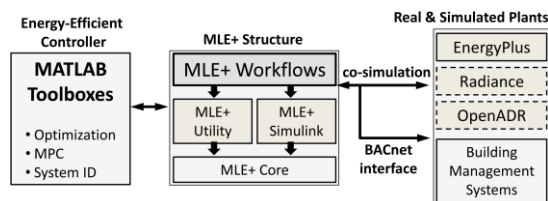


Figura 14 – Interação do MLE+ com *softwares* de simulação e com o Matlab (Bernal et al., 2012)

Para efetuar uma co-simulação com outros programas é necessário definir vários objetos no EP do grupo *ExternalInterface*, pois é através destes objetos que o EP irá interagir com os outros *softwares*. Para que seja possível essa interação é necessário criar um objeto da classe *ExternalInterface* com a opção *PtolemyServer* no EP. Este objeto ativa a interface externa do EP que permite que os restantes objetos do grupo *ExternalInterface* enviar e receber valores para outro programa durante uma co-simulação.

Em co-simulação existem três tipos de objetos no EP que podem receber informação de outros programas: *ExternalInterface:Schedule*; *ExternalInterface:Actuator*; *ExternalInterface:Variable*. Estes objetos são semelhantes aos objetos *ScheduleCompact*, *EnergyManagement:Actuator* e *EnergyManagement:GlobalVariable* respetivamente, sendo que a diferença é receber informação de outros programas (Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013c).

Destes objetos apenas dois foram utilizados. O objeto *ExternalInterface:Schedule* foi utilizado para controlo do ângulo da lamela dos estores e o objeto *ExternalInterface:Actuator* foi utilizado para fechar e abrir estores.

Além de poder receber informação de outros programas qualquer variável de output especificada em *Output:Variable* poderá ser lida por outros programas em co-simulação com o EP.

Depois do ficheiro idf estar preparado para fazer co-simulação com o Matlab é necessário configurar o MLE+. Este processo, passa por definir o ficheiro de idf a simular, o weather file da localização desejada, as variáveis de *input* e output que serão utilizadas pelo MLE+ e o ficheiro de controlo responsável pelo controlo dos estores e pela atribuição de valores das variáveis.

### 3.3.3. Modelo do gabinete

Antes de uma descrição pormenorizada do Modelo do EP serão apresentadas algumas considerações gerais, alguns detalhes da descrição do modelo foram colocado no Anexo G.

À exceção da parede exterior, todas as restantes superfícies (restantes paredes, teto e pavimento) foram consideradas adiabáticas, isto é, sem trocas de calor. A parede interior está em contato com o corredor, mas considerou-se que este era um espaço aquecido.

Admitiu-se também que o sistema AVAC mantém a temperatura interior acima dos 20°C no inverno e abaixo dos 25°C no verão, valores de acordo com (Portaria n.º 349-D/2013, 2013).

Para edifícios de habitação devem ser considerados ganhos internos médios de  $4 \text{ W/m}^2$  (Portaria n.º 349-B/2013, 2013) mas para edifícios de serviço não está definido no regulamento quais os ganhos internos a considerar. Por esta razão considerou-se um valor mais elevado de  $7 \text{ W/m}^2$  constantes, que era o valor indicado na anterior regulamentação térmica portuguesa RCCTE (Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações, 2006).

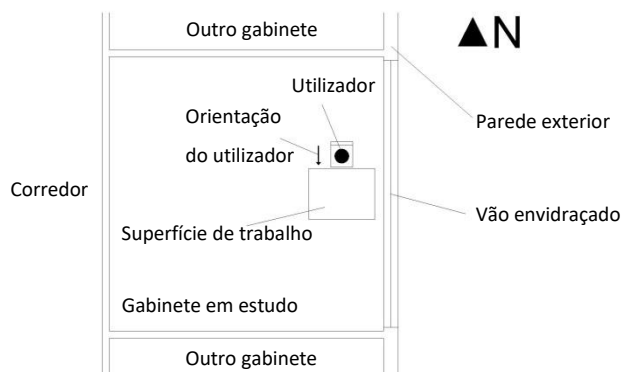
A renovação de ar natural segundo (Portaria n.º 349-B/2013, 2013) deve ser no mínimo 0,4 rph, embora no verão não deve ser considerada menos que 0,6 rph (Despacho n.º 15793-K/2013, 2013). Neste trabalho, considerou-se 1 rph no inverno e 1,5 rph no verão, valores de acordo com Faustino (2012).

No regulamento português (Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, 2013) a estação de arrefecimento são quatro meses: junho, julho, agosto e setembro. A estação de arrefecimento na zona da Grande Lisboa são 5,3 meses. Porém, neste trabalho as simulações foram realizadas para os estores de verão e inverno astronómicos. As simulações de verão foram feitas entre 21 de junho a 21 de setembro e as simulações de inverno foram feitas entre 21 de dezembro e 21 de março. Isto foi feito com vista a facilitar comparações com simulações efetuadas para outros países onde os regulamentos não preveem estações de aquecimento e arrefecimento iguais às de Portugal.

Considerou-se que o horário de ocupação do gabinete era, nos dias úteis (2ª-feira a 6ª-feira), entre as 8:00 e as 19:00. Por esta razão, equipamentos como AVAC e a luz elétrica só estão ativos durante esse período. Além disso foram previstas as mudanças de hora anuais. No modelo foi utilizado o fuso horário WET (UTC+0) no inverno e no verão o fuso horário WEST (UTC+1). Apesar de haver uma opção para mudar o fuso horário (ver 3.3.3.1) o ficheiro epw está feito apenas para o horário de inverno e não contempla a mudança de hora. Em alternativa considerou-se que nas simulações de verão se utilizaria um horário de ocupação do gabinete começando e acabando uma hora mais cedo entre as 7:00 e as 18:00. Em Portugal continental as mudanças de hora ocorrem no último domingo de outubro e no último domingo de março, como estas datas ocorrem foram dos períodos do ano simulados a mudança de hora está de acordo com a lei portuguesa (Ministério da Educação, 1996).

Definiu-se a superfície de trabalho com 0,8 m de altura, 90 cm de largura e 70 cm de profundidade. Além disso considerou-se que a mesa se encontrava afastada 12 cm da parede exterior para melhorar a uniformidade da iluminância (ver Anexo E).

Considerou-se que a iluminação elétrica funcionaria de modo automático, ligando-se sempre que a iluminação na superfície de trabalho fosse inferior a 500 lux e desligando-se caso contrário. Apesar do controlo contínuo dos níveis de iluminação elétrica permitir maiores poupanças energéticas (Jennings et al., 2000) optou-se por um controlo mais perto do real apenas com a opção de ligar ou desligar completamente a iluminação elétrica.



**Figura 15 – Planta de localização da superfície de trabalho e do utilizador no gabinete em estudo**

A medição do índice de encandeamento foi feita à altura de 1,2 m, que representa a altura de um utilizador sentado. Para o cálculo do DGI considerou-se que o utilizador estava orientado a 90º no sentido dos ponteiros do relógio da direção da janela (ver Figura 15), como referido anteriormente esta direção é recomendada como mais favorável (ver 2.3).

Devido à existência de estores de dupla orientação considerou-se o modelo que a janela seria dividida em duas janelas de modo a poder controlar dois estores independentemente. Ambas as janelas têm a largura da janela original mas a janela superior tem apenas um terço da altura e a janela inferior dois terços da altura.

No EP em termos da apresentação no editor de ficheiros idf existe uma hierarquia de organização. Existem vários grupos e dentro de cada grupo existem várias classes de objetos. Dentro de um grupo todas as classes de objetos estão relacionadas (e.g. *Schedules*) e apenas dentro de cada classe se pode criar um objeto específico com as respetivas definições (e.g. *Schedule:Day:Hourly*).

### **3.3.3.1. Location and Climate**

No objeto da classe *Site:Location* definem-se as informações necessárias à localização. Definiu-se a latitude decimal de 38,7 e longitude decimal de -9,1. No campo *Timezone*, cujo valor 0 corresponde ao UTC+0:00, foi utilizado o valor 0 constante no ficheiro original. Considerou-se que o edifício tinha uma altitude aproximada ao nível do piso do gabinete de 105 m (Casaca et al., 2004).

Na classe *SizingPeriod:DesignDay* foram definidos dois objetos, um para 21 de agosto e outro para 21 de janeiro. Nestes dois dias foram definidas temperaturas, velocidade e direção do vento, condições climáticas e outras informações relevantes à definição meteorológica desses dois dias.

No objeto da classe *RunPeriod* define-se o período anual a simular, bem como alguns detalhes sobre a utilização do *weather file* em algumas circunstâncias na simulação. Apesar destes valores optou-se por definir como períodos de simulação o verão astronómico, de 21 de junho a 21 de setembro, e o inverno astronómico, de 21 de dezembro a 21 de março.

No objeto da classe *SiteGroundTemperature:BuildingSurface* define-se a temperatura do solo para cada mês.

### **3.3.3.2. Surface Construction Elements**

Nos objetos da classe *Material* foram definidos todos os materiais descritos em 3.1.2.

Nos objetos da classe *Material:AirGap* foram definidas caixas-de-ar utilizadas em elementos construtivos.

No objeto da classe *WindowMaterial:Glazing* foi definido o material do envidraçado (ver 3.1.2).

No presente modelo utilizaram-se estores venezianos. Para o efeito, foram criados objetos da classe *WindowMaterial:Blind* e nesses objetos foram definidas as propriedades dos estores venezianos. Para acomodar um controlo independente das lamelas da janela superior e da janela inferior foram criados dois objetos nesta classe. No EP os estores venezianos são modelos com algumas simplificações: as lamelas são planas, aproximação razoável para geometrias de lamela comuns (Pfrommer et al., 1996; Yahoda & Wright, 2004); as lamelas são difusores perfeitos; entre outras.

As propriedades geométricas e a condutibilidade térmica das lamelas foram definidas tal como descritas em 3.1.2, tendo-se considerado 5 cm como distância entre o plano dos estores e a janela, foi definido como ângulo mínimo 0,4° (ângulo menor permitido pelo EP) e como ângulo máximo 180°. Como o material das lamelas é opaco considerou-se que a transmitância era zero e por simplicidade considerou-se uma refletância média de 0,58 quer para refletância solar, quer para refletância visual. A emissividade hemisférica de infravermelhos (*Slat Infrared Hemispherical Emissivity*) da lamela foi definida com o valor de 0,9, valor aproximado da maioria dos materiais. Os campos de *Opening Multiplier* foram preenchidos com o valor de 0,5.

Nos objetos da classe *Construction* foram definidos os elementos construtivos com base nos materiais definidos anteriormente (ver 3.1.2).

### **3.3.3.3. Thermal Zones and Surfaces**

No objeto da classe *GlobalGeometryRules* pode definir-se alguns detalhes sobre a maneira como inserir a informação dos vértices na definição de superfícies.

No objeto da classe *Zone* definiram-se várias informações sobre a zona térmica a simular. Neste objeto definiu-se a altura do pé-direito, a área do pavimento e o seu volume de acordo com o referido em 3.1.2. Definiu-se a posição do referencial da zona como coincidente com o referencial do edifício, isto é, com a mesma origem. O campo *Direction of Relative North* refere-se ao ângulo entre o norte do edifício e o norte da zona. No caso de ser igual a zero, os dois nortes estão alinhados mas este valor foi mudado de modo a fazer simulações com a fachada orientada a Este, Oeste, Norte e Sul.

Nos objetos da classe *BuildingSurface:Detailed* definiram-se as superfícies, às quais foram atribuídas os elementos construtivos definidos na classe *Construction*. Ou seja, definiram-se geometricamente as superfícies do pavimento, teto e paredes e atribuiu-se o respetivo material. Além disto, pode definir-se se a superfície tem exposição solar e ao vento bem como as condições de fronteira da superfície que, neste caso, se considerou serem todas as adiabáticas, exceto a parede exterior que estava naturalmente em contato com o exterior.



Nos objetos da classe *FenestrationSurface:Detailed* podem definir-se os vãos envidraçados. No modelo original de Faustino (2012) existia apenas um vão envidraçado exterior que representava a janela do gabinete real. No modelo atualizado, devido à existência de estores de dupla orientação foram modeladas dois vãos envidraçados no mesmo local e com a mesma área que o vão envidraçado original. Ambos os vãos envidraçados com a largura total do vão envidraçado original mas o vão envidraçado superior com apenas um terço da altura e o inferior com dois terços da altura, proporção de alturas semelhante aos estores de dupla orientação. Além da geometria definiu-se que estas sub-superfícies eram do tipo janela, que estavam inseridas na parede exterior, que o material do vidro era simples de 6 mm e o nome do objeto no EP que controla os estores.

Nos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* pode-se definir o tipo de sombreamento numa determinada janela. Neste caso foram considerados estores venezianos que podiam ser interiores ou exteriores dado que ambos os cenários foram simulados.

Em termos das estratégias utilizadas para o controlo da abertura dos estores e das lamelas, também definidos nestes objetos (ver 3.4.2). O tipo de controlo dos estores é definido no campo *Shading Control Type* enquanto o tipo de controlo das lamelas é definido em *Type of Slat Angle Control for Blinds*. Em algumas estratégias em que se recorreu à co-simulação definiu-se no campo *Slat Angle Schedule Name* o nome de um objeto da classe *ExternalInterface:Schedule* que fornece o valor do ângulo das lamelas a cada passo da co-simulação. O campo *Glare Control Is Active* é necessário no caso de se querer usar o valor do DGI como parâmetro de controlo. O campo *Setpoint* foi utilizado para definir o limite de radiação solar como parâmetro de controlo dos estores. No campo *Schedule Name* define-se o nome do horário no qual o controlo dos estores está ativo.

Além disto, especifica-se também o tipo de material dos estores, que foi definido em *WindowMaterial:Blind*.

Por se ter modelado estores e dupla orientação com duas janelas criaram-se dois objetos desta classe, um para cada janela. Algumas das estratégias de controlo utilizadas focaram-se no controlo independente das lamelas em estores de orientação dupla e, nesses casos, cada janela tinha um método de controlo diferente (ver 3.4.2).

#### **3.3.3.4. Internal Gains**

No modelo atualizado foi criado um objeto na classe *OtherEquipment* associado ao horário ON com ganhos de 96,4375 W, o que equivale a  $7 \text{ W/m}^2$  constantes 24 horas por dia.

No objeto da classe *Lights* definiu-se a potência da iluminação em 116 W, correspondente às duas lâmpadas de 58 W presentes no gabinete simulado (ver 3.1.2). Além disto, associou-se o objeto à zona do modelo e ao horário de funcionamento WORK. Considerou-se a que iluminação não libertava calor uma vez que os ganhos internos já estão considerados num objeto *OtherEquipment* descrito em baixo, pelo que se definiram os campos *Fraction Radiant* e *Fraction Visible* com o valor de zero. O campo *Fraction Replaceable* define se o objeto da classe *Daylighting:Controls* pode regular a intensidade da iluminação. Neste caso, definiu-se este campo com o valor 1 que permite que a iluminação seja regulada pelo objeto referido.

### 3.3.3.5. Daylighting

Neste grupo foram criados objetos em três tipos de classes de objetos no ficheiro atualizado: Daylighting:Controls; Output:IlluminanceMap; OutputControl:IlluminanceMap:Style.

O objeto da classe Daylighting:Controls permite criar no máximo dois pontos de referência por zona nos quais são calculadas grandezas relacionadas com iluminação, podendo também definir-se alguns parâmetros de controlo com essas grandezas calculadas. Neste caso particular, estes objetos foram criados para medir a iluminância e o DGI. Um dos campos neste objeto define o horário no qual estas medidas e controlos estão ativos, que neste caso era durante o horário de trabalho.

O primeiro ponto de referência (P1) foi criado no centro da superfície de trabalho à altura do olho de um utilizador sentado, 1,2 m (ver Figura 16). Este ponto foi utilizado para medir o DGI à altura do olho, valor utilizado para calcular métricas de conforto do utilizador e para estratégias de controlo dos estores (ver 3.2.1). No objeto em causa definiu-se como 22 o limite máximo do DGI, valor a partir do qual se fecha os estores no caso de ser essa a estratégia de controlo.

O segundo ponto de referência (P2) foi criado no centro da superfície de trabalho à altura da superfície de trabalho, 0,8 m (ver Figura 16). Este ponto foi utilizado para medir a iluminância na superfície de trabalho, valor utilizado para controlar o acionamento da iluminação elétrica e calcular métricas de controlo do utilizador (ver 3.2.2). No objeto em causa, definiu-se 500 lux como iluminância abaixo da qual a iluminação elétrica se ligava. Além disso, pode definir-se se a iluminação é de escurecimento contínuo ou controlo simples (ligar/desligar), neste caso foi utilizado o controlo simples.

A ordem pela qual os pontos foram definidos é particularmente importante quando o método de controlo dos estores é feito através do valor do DGI. Nesse caso específico o controlo é feito consoante o valor do DGI do primeiro ponto de referência. Por esta razão o primeiro ponto foi colocado à altura de 1,2 m.

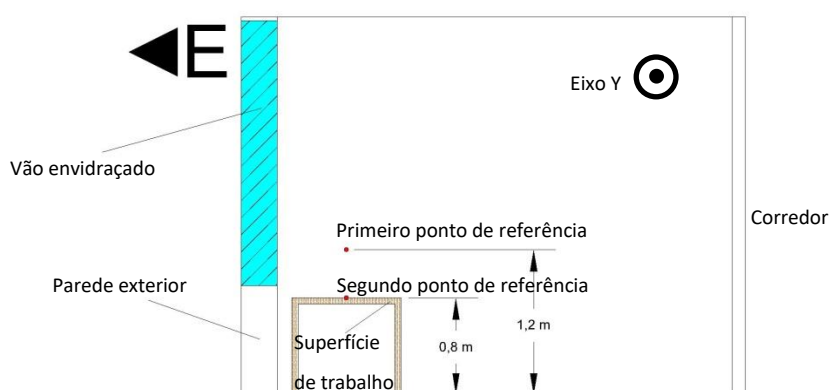
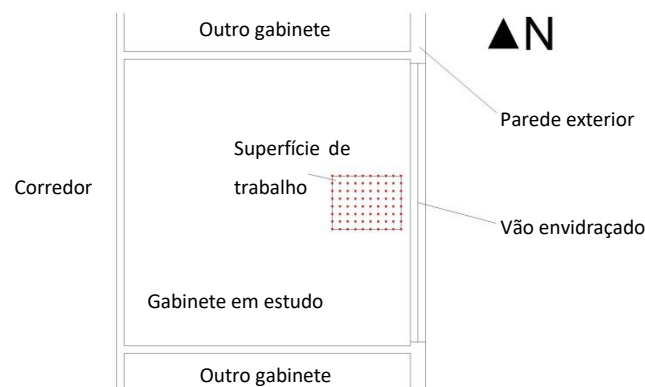


Figura 16 – Planta de localização dos pontos de referência em relação à superfície de trabalho

Um dos campos neste objeto refere-se ao ângulo entre a orientação do utilizador e o eixo Y da zona que é particularmente relevante para o cálculo do DGI. O campo *Glare Calculation Azimuth Angle of View Direction Clockwise from Zone y-Axis* tem um valor de modo a que a orientação do utilizador esteja a 90° no sentido dos

ponteiros do relógio da orientação da fachada (ver Figura 15). Este campo foi definido com valores diferentes consoante a orientação da fachada exterior de cada simulação, que variou entre Sul, Este, Oeste e Norte. Dado que a orientação do eixo Y da zona é diferente nas simulações para orientações da fachada diferente.

O objeto da classe *Output:IlluminanceMap* permite acrescentar uma grelha de até 2500 pontos de referência, mas estes medem apenas a iluminância natural a uma altura constante. Neste caso considerou-se uma grelha representando a superfície de trabalho espaçada de 10 cm na direção longitudinal da superfície de trabalho e espaçada de 10 cm na direção transversal à altura de 0,8 m (ver Figura 17). Os resultados dessas medidas são apresentados “nome do ficheiro”Map.tab (ver 3.3). Estes valores foram utilizados para calcular métricas de conforto e para definir a distância desejada entre a mesa e a parede exterior (ver Anexo E).



**Figura 17 – Planta de localização da grelha de pontos de referência (vermelho) no gabinete**

No objeto da classe *OutputControl:IlluminanceMap:Style* define-se o separador entre as colunas dos ficheiros da classe *Output:IlluminanceMap*. Neste caso utilizou-se o separador *tab*, deixando espaçamentos “*tab*” entre os valores das colunas.

No grupo *Zone Airflow* foi criado um objeto da classe de objetos *ZoneInfiltration:DesignFlowRate* no ficheiro original. Que na versão 1.2.0 tinha o nome *Infiltration*. Neste objeto definiram-se as renovações por hora ao longo do dia, com o horário de estar sempre ligado, com o valor de 1 rph nas simulações de inverno e 1,5 rph nas simulações de verão.

### **3.3.3.6. Zone HVAC Controls and Thermostats**

O objeto da classe *ZoneControl:Thermostat* é utilizado para controlar a temperatura de uma zona. Para o efeito, é necessário especificar a zona, o horário em que está ativo o tipo de controlo e o respetivo objeto. Especificou-se a única zona do modelo, utilizou-se um horário que nas horas de trabalho tinha o valor um ou dois consoante a altura do ano (N1 e N2, ver Anexo G) e o controlo de temperatura foi do tipo *ThermostatSetpoint:SingleHeating* no inverno e *ThermostatSetpoint:SingleCooling* no verão, feito através de um objeto de classe igual ao nome do tipo de controlo. O horário podia ter um valor diferente a cada hora entre zero a quatro consoante o tipo de controlo, como o controlo era “*single heating*” no inverno utilizou-se o valor um e no verão o controlo era “*single cooling*” e utilizou-se o valor de dois no horário.

No modelo atualizado utilizou-se o objeto da classe *ThermostatSetpoint:SingleHeating* no inverno e *ThermostatSetpoint:SingleHeating* no verão. Foram utilizados para garantir que a temperatura ficaria superior a 20°C no inverno e inferior a 25°C no verão, valores estão de acordo com (Portaria n.º 349-D/2013, 2013), já que no inverno considera-se que não existem necessidades de arrefecimento e que no verão não existem necessidades de aquecimento. Para o efeito selecionaram-se os horários para definir a temperatura mínima e máxima respetivamente (N20, N25).

### **3.3.3.7. Energy Management System**

O grupo *Energy Management System*, descrito em 3.3, foi criado no ficheiro atualizado e utilizado para controlar a operação automática dos estores em algumas estratégias (ver 3.4.2), para o cálculo de métricas de conforto (ver 3.4.1).

Neste grupo foram criados objetos em seis tipos classes de objetos no ficheiro atualizado:  
*EnergyManagementSystem:Sensor*; *EnergyManagementSystem:Actuator*;  
*EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager*; *EnergyManagementSystem:Program*;  
*EnergyManagementSystem:GlobalVariable*; *EnergyManagementSystem:OutputVariable*.

Os objetos das classes *EnergyManagementSystem:Sensor*, *EnergyManagementSystem:Actuator* e *EnergyManagementSystem:GlobalVariable* podem ser usados como variáveis nos programas desenvolvidos neste grupo e adicionalmente como variáveis de output do EP (ver3.3.1.1).

Os objetos da classe *EnergyManagementSystem:ProgramCallingManager* são utilizados para definir em que passo da simulação os programas do EMS são executados. Esses programas são construídos em objetos da classe *EnergyManagementSystem:Program*.

Nos objetos da classe *EnergyManagementSystem:OutputVariable* definem-se variáveis de output criadas no EMS, de modo a que estas possam ser representadas nos ficheiros de output. Para esse efeito é necessário defini-las também em objetos da classe *Output:Variable* como as restantes variáveis de output.

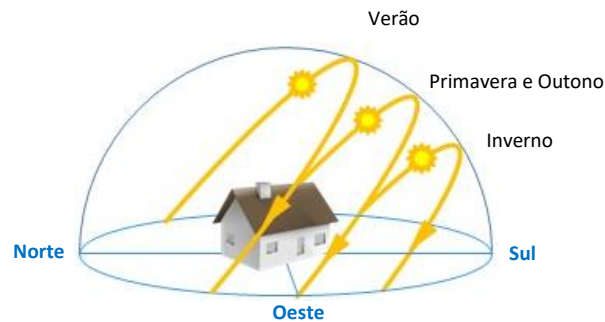
## **3.4. Métodos de simulação**

O modelo descrito foi simulado para diferentes estratégias de controlo dos estores e também para diferentes situações ambientais. Com isto pode-se averiguar o impacto de uma dada estratégia de controlo para condições de simulação específicas e comparar o desempenho com as restantes estratégias.

O gabinete real tinha a fachada exterior orientada para este, mas foram feitas simulações com a fachada orientada para Norte, Este, Sul e Oeste por cada orientação apresentar diferentes exigências.

As diferentes exigências devem-se ao movimento do sol no hemisfério norte (ver Figura 18). O sol nasce a Este e conseqüentemente de manhã com o sol mais baixo no céu os níveis de radiação são mais altos. Durante a tarde o sol move-se para sul onde apesar dos níveis de radiação não serem tão altos a fachada com esta orientação tem mais horas de exposição solar do que em outras orientações. Por fim na orientação Oeste,

onde o sol se põe, as condições são semelhantes à orientação Este mas em geral com temperaturas exteriores mais altas. Na orientação Norte não incide radiação direta e por essa razão é uma orientação menos exigente em termos de sombreamento.



**Figura 18 – Movimento do sol no hemisfério Norte (House Plans Helper, 2015)**

Apesar dos estores no gabinete estarem no exterior, em ambiente de simulação foram testados também como estores interiores. Com isto pode-se comparar o desempenho de várias estratégias de controlo com as diferentes posições dos estores. Além disto poder-se-á averiguar a importância que a posição dos estores tem no caso de a simulação ser no verão ou no inverno.

Como períodos de simulação foram considerados o inverno e o verão astronómicos. Apesar de muitos dos valores considerados nesta simulação considerarem o regulamento português no que toca aos períodos de simulação isso não acontece. Para facilitar a comparação de resultados de simulações em países diferentes considerou-se que a estação de aquecimento seria o inverno, de 21 de dezembro a 21 de março, e a estação de arrefecimento seria o verão, de 21 de junho a 21 de setembro.

Apesar dos estores do gabinete serem estores de dupla orientação foram feitas simulações com estratégias de controlo para estores venezianos simples e para estores de dupla orientação. Deste modo pode-se comparar o desempenho de estratégias com os dois tipos de estores.

Como referido anteriormente considerou-se que as lamelas tinham uma refletância visual e solar de 0,58.

### **3.4.1. Implementação das medidas de desempenho**

Para medir e comparar o desempenho das várias estratégias foram utilizadas métricas de conforto visual e medições de necessidades energéticas (ver Tabela 17). Para o cálculo de muitas destas métricas e medidas foi necessário recorrer a programas personalizados do EMS, todos estes cálculos foram aglomerados no mesmo programa (ver Anexo A).

Para medir a quantidade de luz natural foi calculado o UDI (ver 3.2.2). O UDI não é um output disponível no EP, para calcular este índice foi necessário criar um programa no EMS (ver Anexo A). Com um objeto sensor (ver 3.3.3.7) da iluminância natural num ponto de referência à altura da superfície de trabalho (ver 3.3.3.5) foi possível medir a iluminância na “superfície de trabalho”. Com esta informação calcularam-se, no período de ocupação do gabinete, cinco índices complementares: UDI<sub>100</sub>, para iluminâncias abaixo dos 100 lux; UDI<sub>100-500</sub>, para iluminâncias entre 100 lux e 500 lux; UDI<sub>500-2000</sub>, para iluminâncias entre os 500 lux e os 2000 lux; UDI<sub>100-</sub>

2000, para iluminâncias entre os 100 lux e os 2000 lux;  $UDI_{2000}$ , para iluminâncias acima dos 2000 lux. Sendo o  $UDI_{100-2000}$  o mais relevante, os índices  $UDI_{100-500}$  e  $UDI_{500-2000}$  foram calculados para diferenciar a parte da iluminância útil autónoma, isto é, que não necessita de iluminação elétrica.

**Tabela 17 - Métricas de conforto visual e respetivos métodos de simulação**

Métrica	Tipo de métrica	Método de cálculo	Descrição
$UDI_{100}$	Quantidade de luz	EMS	Rácio unitário do tempo em que a iluminância está abaixo dos 100 lux.
$UDI_{100-500}$			Rácio unitário do tempo em que a iluminância está entre os 100 lux e os 500 lux.
$UDI_{500-2000}$			Rácio unitário do tempo em que a iluminância está entre os 500 lux e os 2000 lux.
$UDI_{100-2000}$ (UDI)			Rácio unitário do tempo em que a iluminância está entre os 100 lux e os 2000 lux.
$UDI_{2000}$	Uniformidade da iluminação natural	VBA	Rácio unitário do tempo em que a iluminância está acima dos 2000 lux.
$\frac{U_{mín}}{U_{máx}}_{>0,5}$ (%)			Percentagem de tempo em que o rácio está abaixo dos 0,5.
$\frac{U_{mín}}{U_{máx}}_{>0,7}$ (%)			Percentagem de tempo em que o rácio está abaixo dos 0,7.
$\frac{U_{mín}}{U_{méd}}_{>0,7}$ (%)			Percentagem de tempo em que o rácio está abaixo dos 0,8.
$DGI_{<22}$ (%)	Encandeamento	EMS	Percentagem de tempo em que o DGI está abaixo dos 22.

Para medir a uniformidade da iluminação natural calcularam-se dois rácios de iluminância na superfície de trabalho:  $U_{mín}/U_{máx}$ ;  $U_{mín}/U_{méd}$ . Estes rácios não são outputs do EP, para obter estes valores foi necessário criar um programa em *Visual Basic for Applications* (ver Anexo B) que com a informação do ficheiro de *output* “<nome do ficheiro de *input* do modelo>Map.tab” (ver 3.3) calculou os índices para o período de ocupação do gabinete. No EP criou-se uma grelha de pontos que representam a superfície de trabalho (ver 3.3.3.5) e com esses valores foi possível o programa calcular os índices a cada iteração da simulação no horário de trabalho, apresentando como resultado final a fração unitária de tempo em que esses índices estavam acima de valores de referência (ver Tabela 22).

Para medir o nível de encandeamento calculou-se a percentagem de tempo em que o DGI estava abaixo de 22. Esta percentagem de tempo não é um output do EP, para se obter este valor foi necessário criar um programa no EMS (ver Anexo A). Com um objeto sensor do DGI num ponto de referência à altura do olho do utilizador sentado (ver 3.3.3.5) foi possível medir o DGI ao nível do olho do utilizador. Com esta informação calculou-se a percentagem de tempo em que o DGI estava abaixo dos 22,  $DGI_{<22}$  (%), no período de ocupação do gabinete.

Para todas as simulações foram calculadas três medidas de necessidades energéticas: necessidades de arrefecimento, necessidades de aquecimento, consumo de iluminação elétrica. Estas medidas são todas fornecidas nos outputs do EP, mas são fornecidas por cada iteração e não estão nas unidades desejadas. Para facilitar a consulta e manipulação dessas medidas foi criado um programa no EMS (ver Anexo A) para fornecer como output os valores totais do período da simulação em  $kWh/m^2$ . Para calcular estes consumos energéticos foram criados objetos sensor (ver 3.3.3.7) com as variáveis de *output*: *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Rate* (necessidades de arrefecimento); *Zone Ideal Loads Zone Total heating Rate* (necessidades de aquecimento); *Zone Lights Electric Energy* (consumo de iluminação elétrica). Estes objetos sensor foram utilizados como auxiliares no cálculo das medidas de desempenho energético.

### 3.4.2. Implementação das estratégias de controlo

Algumas das estratégias de controlo utilizadas foram implementadas através do EMS, no caso das co-simulações foram definidas no MLE+ e com objetos *ExternalInterface* (ver Anexo G), todas as restantes estratégias foram definidas no EP em objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* (ver Tabela 18). Devido ao grande volume de simulações a criação de ficheiros idf para simular e a simulação de alguns destes ficheiros foi automatizada através de um programa (ver Anexo D).

Tabela 18 - Estratégias de controlo e respetivos métodos de simulação

Estratégia	Tipo de estratégia	Tipo de estore	Método de simulação	Descrição
E1	Estática	Simples	EP	Estores abertos.
E2				Estores fechados.
E3				Lamelas a 90°.
E4				Lamelas a 45°.
E5	Regulamento		EMS	Estores fechados 60% do dia.
E6			EP	Estores fechados 60% da área.
E7	Dinâmica		Co-simulação	Estores fechados se a radiação solar for maior que 300 W/m <sup>2</sup> .
E8				Lamelas com ângulo de cut-off.
E9				Estores fechados se o DGI for maior que 22.
E10				Lamelas com ângulo que permita maior DGI abaixo dos 22.
E11				Lamelas com ângulo que permita a menor iluminância acima dos 500 lux.
E12	Estática	Dupla orientação	EP	Secção superior com lamelas a 90° e secção inferior com os estores fechados.
E13	Dinâmica			Secção superior com lamelas a 90° e secção inferior com as lamelas com ângulo de cut-off.
E14				Secção superior com lamelas a 90° e secção inferior com os estores fechados se o DGI for maior que 22.

As estratégias estáticas foram todas implementadas através de objetos e definições acessíveis no EP.

Para a E1 (estores abertos) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOff*, para manter os estores sempre abertos. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante.

Para a E2 (estores fechados) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn*, para manter os estores sempre fechados. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se, também para as duas janelas, no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 0,84, que é o valor mínimo possível do ângulo das lamelas, de modo a que as lamelas fiquem fechadas.

Para a E3 (lamelas a 90°) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn*, para manter os estores sempre fechados. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se,

também para as duas janelas, no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 90, de modo a que as lamelas fiquem horizontais.

Para a E4 (lamelas a 45°) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn*, para manter os estores sempre fechados. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se, também para as duas janelas, no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 45, de modo a que as lamelas fiquem a 45°.

Para a E12 (dupla orientação fechados) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn*, para manter os estores sempre fechados. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 90 para a janela de cima e o valor de 0,84 para a janela inferior, de modo a que as lamelas fiquem horizontais na secção superior e fechadas na secção inferior.

Para implementar a E5 (60% do dia) foram criados programas no EMS (ver Anexo C) que foram implementados apenas para simulações de verão e para todas as orientações consideradas com a exceção da orientação Norte. Neste caso as definições no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* não são relevantes porque o programa do EMS sobrepõe-se ao controlo especificado nestes objetos. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 0,84, que é o valor mínimo possível do ângulo das lamelas, de modo a que as lamelas fiquem fechadas. No programa do EMS, através da utilização de algumas variáveis pré-definidas no EP (ver Tabela 19) como *SunIsUp* e *CurrentTime*, foi possível em cada dia da simulação conhecer a hora do nascer do sol, do pôr-do-sol e consequentemente da duração do dia. Com isto, foi possível calcular 60% da duração do dia e a altura do dia em que os estores deveriam estar ativos de forma dinâmica ao longo da duração da simulação. Com essa informação utilizou-se um atuador para fechar completamente os estores com as lamelas fechadas durante a duração e altura desejada consoante a orientação.

**Tabela 19 – Variáveis pré-definidas**

<b>SunIsUp</b>	0 se for noite, 1 se for dia
<b>CurrentTime</b>	0.0 – 24.0, horas em formato decimal

Para implementar a E6 (60% da área) especificaram-se duas janelas no EP, a janela superior com 60% da altura e com a largura total da janela real e a janela inferior com 40% da altura e com a largura total da janela real. Definiu-se no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção



*AlwaysOn* para a janela superior e a opção *AlwaysOff* para a janela inferior. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se, também para as duas janelas, no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 0,84, que é o valor mínimo possível do ângulo das lamelas, de modo a que as lamelas fiquem fechadas. Deste modo a parte superior da janela (com 60% da altura da janela) encontra-se com os estores completamente fechados e com as lamelas fechadas, ao passo que a parte inferior da janela (com 40% da altura da janela) tem os estores completamente abertos.

Para a E7 (300 W/m<sup>2</sup>) considerou-se a medida da radiação solar a cada 10 minutos de simulação apesar de estar estipulado na norma EN ISO 13790 estar especificado que se deve utilizar o valor horário. Para esta estratégia definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *OnIfHighSolarOnWindow*, para que os estores se fechassem caso a radiação solar incidente na janela seja superior ao valor que se definir no campo *Setpoint*, neste caso 300, ou abrissem caso contrário. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto, definiu-se, também para as duas janelas, no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 0,84, que é o valor mínimo possível do ângulo das lamelas, de modo a que as lamelas fiquem fechadas.

Para a E8 (cut-off) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn*, para manter os estores sempre fechados. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *BlockBeamSolar*, de modo a manter o ângulo de *cut-off* nas lamelas. O campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* não é importante nesta estratégia porque durante a simulação o método de controlo das lamelas calcula o valor do ângulo ideal independentemente do valor neste campo. Para esta estratégia foi possível implementar através do EMS um método de controlo diferente fora do horário de trabalho (ver Anexo A). Neste período do dia os estores estariam completamente abertos no caso de ser inverno, de modo a maximizar os ganhos solares, ou completamente fechados no caso de ser verão, de modo a minimizar os ganhos solares, semelhante a outro método utilizado noutro estudo (Guillemin & Morel, 2001).

Para a E13 (dupla orientação cut-off) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn*, para manter os estores sempre fechados. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se a opção *FixedSlatAngle* para a janela superior e a opção *BlockBeamSolar* para a janela inferior. Além disto definiu-se no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 90 para a janela de cima e o valor de 0,84 para a janela inferior, de modo a que as lamelas fiquem horizontais na secção superior e fechadas na secção inferior. Deste modo a secção

superior tem os estores fechados e as lamelas horizontais e a secção inferior tem os estores fechados e as lamelas com o ângulo de *cut-off*.

Para a E9 (DGI) definiu-se para as duas janelas no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *OnIfHighGlare*. Para o tipo de controlo de estores *OnIfHighGlare* é necessário escolher a opção *yes* no campo *Glare control is active*. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se, também para as duas janelas, no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 0,84, que é o valor mínimo possível do ângulo das lamelas, de modo a que as lamelas fiquem fechadas.

Para a E14 (dupla orientação DGI) definiu-se no campo *Shading Control Type* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* a opção *AlwaysOn* para a janela superior e *OnIfHighGlare* para a janela inferior. Para o tipo de controlo de estores *OnIfHighGlare* é necessário escolher a opção *yes* no campo *Glare control is active*. No campo *Type of Slat Angle Control for Blinds* dos objetos da classe *WindowProperty:ShadingControl* definiu-se para as duas janelas a opção *FixedSlatAngle*, de modo a manter o ângulo das lamelas constante. Além disto definiu-se no campo *slat angle* dos objetos da classe *WindowMaterial:Blind* o valor de 90 para a janela de cima e o valor de 0,84 para a janela inferior, de modo a que as lamelas fiquem horizontais na secção superior e fechadas na secção inferior. Deste modo a secção superior tem os estores fechados e as lamelas horizontais e a secção inferior tem os estores fechados no caso de o DGI ser superior a 22 e as lamelas fechadas.

A E10 (lamelas DGI) representa um controlo do ângulo das lamelas tal que estas permitam a maior abertura possível sem que o DGI à altura do olho ultrapasse os 22. A E11 (lamelas iluminância) representa um controlo do ângulo das lamelas tal que estas permitam a menor abertura possível que mantenha a iluminância na superfície de trabalho acima dos 500 lux.

Controlar o ângulo da lamela até que um determinado parâmetro convirja num valor específico (e.g. DGI = 22) não é possível no EP, como tal as estratégias E10 e E11 foram implementadas através de co-simulação entre o EP e o *Matlab* utilizando a *toolbox* MLE+. Este tipo de controlo foi feito em duas fases: fase de preparação; fase de co-simulação. Na fase de preparação através de um pequeno programa desenvolvido em *Matlab* (ver Anexo D) simularam-se separadamente todos os ângulos entre o ângulo mínimo (fechado) e 90° de 5° em 5° e a situação em que os estores estão completamente abertos. Nestas simulações mantêm-se como variáveis de output apenas aquelas que representam o parâmetro a convergir, eliminando-se todas as outras, e guardam-se todos os valores numa matriz do *Matlab* que será utilizada na próxima fase. Na fase de simulação prepara-se a co-simulação entre o EP e o *Matlab* (ver 3.3.2), sendo que no ficheiro de controlo estão definidas as instruções da estratégia de controlo. No ficheiro de controlo em cada passo da simulação, o programa acede à matriz referida anteriormente e verifica qual o valor mais próximo das condições desejadas para essa estratégia. De seguida, verifica qual dos ângulos simulados corresponde a esse valor desejado e envia essa informação para o EP que ajusta o ângulo das lamelas para o valor apropriado.

## 4. Análise e discussão de resultados

Após a simulação dos cenários descritos em 3.4 recolheu-se informação de *output* das simulações e analisaram-se os resultados. Esta análise foi feita em duas fases. Foram comparados os resultados entre as simulações com estores interiores e simulações com estores exteriores. Por fim, compararam-se os desempenhos, quer do ponto de vista do conforto visual dos utilizadores, quer energético, das diferentes estratégias para estores exteriores.

### 4.1. Estores interiores Vs estores exteriores

A análise dos desempenhos de estores interiores e estores exteriores foi feita para as estações de inverno e verão para verificar o impacto que a posição dos estores relativamente à janela tem em diferentes alturas do ano. Além disso analisaram-se os resultados em separado das quatro orientações da fachada (Este, Oeste, Sul, Norte) em cada estação do ano simulada, de modo a que se possa perceber o impacto de uma posição de estores no desempenho de conforto visual e energético na estação do verão e inverno, para uma dada orientação da fachada.

#### 4.1.1. Impacto do posicionamento dos estores no Verão

Para simulações no verão verificou-se que para os vários tipos de estratégias (ver 3.2.1) os valores médios de cada uma das métricas de conforto visual são muito semelhantes quer para estores interiores quer para estores exteriores em todas as orientações. A título de exemplo apresentam-se na Figura 19, os resultados das métricas de conforto visual para a orientação Sul. Os resultados para as restantes orientações podem ser facultados pelo autor.

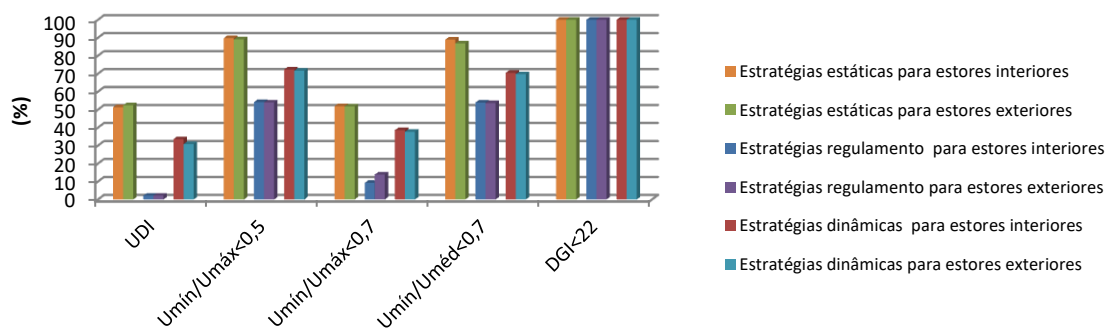
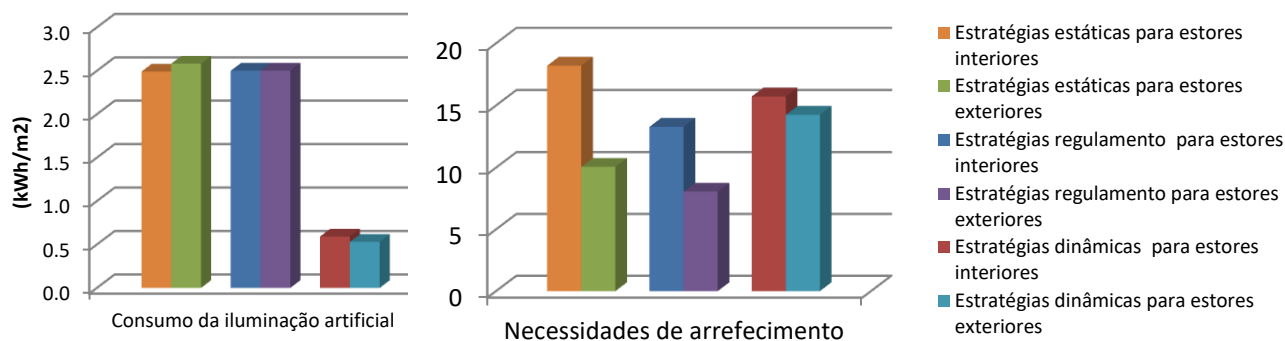


Figura 19 – Resultados da média das métricas de conforto visual para cada tipo de estratégias simuladas de verão para a orientação Sul

A Figura 20 apresenta os valores do consumo da iluminação elétrica para a orientação Sul para as restantes orientações os resultados podem ser facultados pelo autor. Verifica-se que à semelhança dos valores das métricas de conforto visual (ver Figura 19) o consumo da iluminação elétrica é muito semelhante quer para estores interiores quer para estores exteriores para todos os tipos de estratégias e para todas as orientações.



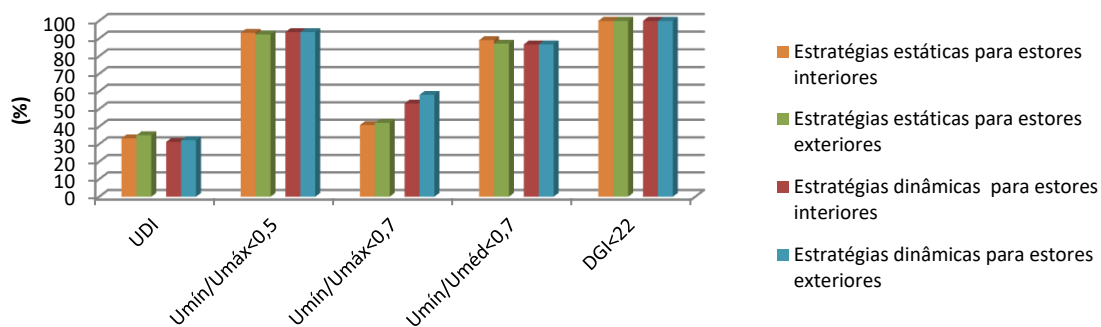
**Figura 20 – Resultados da média das necessidades de iluminação elétrica (esquerda) e das necessidades finais de energia (direita) para cada tipo de estratégias simuladas de verão para a orientação Sul**

As maiores diferenças registaram-se nas necessidades energéticas na estação de arrefecimento (ver Figura 20). No período do ano em questão para todos os tipos de estratégias as necessidades de arrefecimento são maiores para os estores interiores. Isto é expectável visto que no caso dos estores interiores a radiação solar é bloqueada dentro da divisão depois de passar pela janela, o que não acontece com os estores exteriores que bloqueiam essa mesma radiação antes de esta penetrar no vidro. De facto, as necessidades de arrefecimento para estores exteriores e para as orientações Este, Oeste, Sul e Norte são 65%, 69%, 71% e 66% respetivamente das necessidades de arrefecimento de estores interiores para todas as estratégias e 82%, 88%, 91% e 67% respetivamente para as estratégias dinâmicas. A título de exemplo apenas se mostra para a orientação sul na Figura 20 (resultados para restantes orientações podem ser facultados pelo autor), os valores para a orientação Sul, podendo-se verificar para todas as orientações as necessidades de arrefecimento são superiores para estores interiores.

Com a grande semelhança das métricas de conforto visual e dos consumos de luz elétrica conclui-se que no verão para qualquer posição dos estores em relação à janela (estores interiores ou estores exteriores) e para as estratégias apresentadas as condições de iluminação natural são muito parecidas. Com isto destaca-se que em termos de desempenho energético existe uma vantagem significativa em utilizar estores exteriores no verão. Para as estratégias apresentadas os estores exteriores têm necessidades de arrefecimento em média 67,9% das necessidades de arrefecimento com estores interiores, este número passa para 84,3% quando se consideram apenas estratégias dinâmicas.

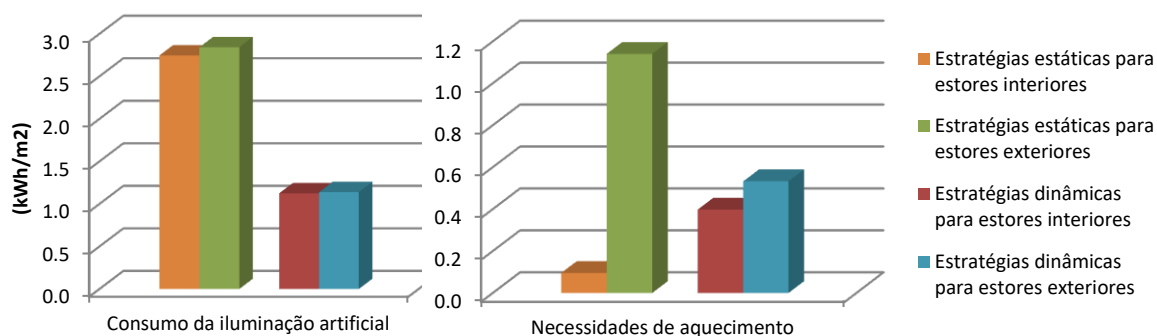
#### 4.1.2. Impacto do posicionamento dos estores no Inverno

Na Figura 21 encontram-se a título de exemplo os valores para a orientação Sul, podendo ser facultado pelo autor os resultados para as restantes orientações. Para simulações no inverno verificou-se que para os vários tipos de estratégias, exceto para estratégias regulamentares (ver 3.2.1), os valores médios de cada uma das métricas de conforto visual são muito semelhantes, quer para estores interiores quer para estores exteriores tal como se observa na Figura 21 para Sul. Esta semelhança entre os valores também se verificou para as restantes orientações (resultados podem ser facultados pelo autor).



**Figura 21 – Resultados das métricas de conforto visual para cada tipo de estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul**

Tal como se observa na Figura 22, referente ao consumo de energia elétrica, à semelhança das simulações de verão, o consumo da iluminação elétrica é muito semelhante, quer para estores interiores quer para estores exteriores, para todos os tipos de estratégias. O mesmo se verifica para as outras orientações (resultados podem ser facultados pelo autor).



**Figura 22 – Resultados das necessidades de iluminação elétrica (esquerda) e das necessidades finais de energia (direita) para cada tipo de estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul**

Como se pode observar na Figura 22, com os valores médios da energia final para aquecimento, para as diferentes estratégias de controlo de estores, o maior impacto do posicionamento dos estores veneziano (interior ou exterior) registaram-se nas necessidades térmicas.

Verifica-se na Figura 22 que para a orientação Sul novamente as necessidades de aquecimento são menores para os casos de simulação de estores interiores, neste caso representam 32% das necessidades de energia dos casos de simulação com estores interiores para todos os tipos de estratégia e passando para 75% quando se consideram apenas as estratégias dinâmicas.

Para as orientações Este e Oeste (resultados podem ser facultados pelo autor) as necessidades de aquecimento são menores para os casos de simulação de estores interiores, neste caso representam respetivamente 50% e 69% das necessidades de energia para casos de simulação com estores exteriores para todos os tipos de estratégia e estes números passam para 65% e 73% quando se consideram apenas as estratégias dinâmicas.

Para a orientação Norte (resultados podem ser facultados pelo autor) as necessidades de aquecimento são ligeiramente inferiores para a situação dos estores interiores, estas representam em média 89% das necessidades de aquecimento para estores exteriores para todas as estratégias e 88% para as estratégias dinâmicas.

À semelhança das simulações de verão a grande semelhança das métricas de conforto visual e dos consumos de luz elétrica conclui-se que no verão para qualquer posição dos estores em relação à janela (estores interiores ou estores exteriores) e para as estratégias apresentadas as condições de iluminação natural são muito parecidas. Em geral para as simulações de inverno são dominadas pelas necessidades de aquecimento. De modo mais geral para as estratégias apresentadas e para todas as orientações simuladas as necessidades de aquecimento para estores exteriores representam 71,3% das necessidades energéticas para os casos de estores interiores e este número passa para 78,4% quando consideramos apenas as estratégias dinâmicas. Apesar de nas simulações de inverno a diferença entre o desempenho energético não ser tão acentuada entre estores interiores e estores exteriores conclui-se que os estores exteriores são em geral mais indicados durante esta estação do ano.

### **4.1.3. Impacto anual do posicionamento dos estores**

Após a análise dos resultados das simulações de inverno e de verão para estores interiores e estores exteriores conclui-se que seria mais vantajoso como dispositivo de utilização durante o ano inteiro os estores exteriores.

Como explicado anteriormente (ver 4.1.1 e 4.1.2), quer para as simulações de inverno quer para as simulações de verão, as condições de iluminação são bastante semelhantes, isto observa-se nos valores das métricas e do consumo da iluminação elétrica são muito semelhantes para as simulações dos estores interiores e exteriores.

Como tal, o impacto do posicionamento do estore (interior ou exterior) é notório sobretudo nas necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento. Para os casos do verão como discutido em 4.1.1 para todas as orientações os estores exteriores eram mais vantajosos do ponto de vista do desempenho energético, inversamente para os casos de inverno verificou-se que para todas as orientações os estores interiores eram mais vantajosos do ponto de vista do desempenho energético.

Apesar de cada período do ano ter melhor desempenho energético com os estores em diferentes posições (exteriores ou interiores) concluiu-se que os estores exteriores eram mais favoráveis num panorama anual. Calculou-se o consumo médio de verão e inverno para estores interiores e exteriores e observou-se (ver Tabela 20) que este era menor para os estores exteriores quer para todas as estratégias, quer apenas para as estratégias dinâmicas. Com isto em mente utilizaram-se estores exteriores para as restantes simulações.

**Tabela 20 – Consumos médios (apenas climatização) por estratégia (entre todas as estratégias consideradas) dos estores interiores e exteriores por estação e total**

Necessidades energéticas finais médias (kWh/m <sup>2</sup> )		
	Estores interiores	Estores exteriores
Verão	15,40	10,45
Inverno	1,75	2,46
<b>Total (verão + inverno)</b>	<b>17,15</b>	<b>12,91</b>

## 4.2. Simulações de estores exteriores em Portugal no verão

Neste subcapítulo será feita uma análise mais detalhada das medidas de desempenho de conforto visual e de desempenho energético para as estratégias de cada orientação simulada. As simulações aqui analisadas foram feitas para o período de verão, para estores exteriores, por fazer sentido este posicionamento de estores que se revelou, mais benéfico para o clima de Portugal. Esta análise é feita separadamente (ver 4.1). A análise será mais focada na orientação Sul pelo que nas outras orientações os resultados serão apresentados mais resumidamente.

### 4.2.1. Sul

Nas Figura 23, Figura 24 e Figura 43 (Anexo F) encontram-se os valores das métricas de conforto visual e os consumos energéticos respetivamente para todas as estratégias simuladas para o verão com a orientação para Sul.

Como se pode ver na Figura 24 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) as estratégias E1 e E2 são as menos favoráveis em conforto visual. Mas enquanto a E1 é a menos favorável em desempenho energético entre todas as estratégias simuladas, a E2 é a sexta mais favorável entre todas as estratégias simuladas. Em desempenho global a E1 é a menos favorável entre todas as estratégias e a E2 é a oitava mais favorável.

Entre as estratégias E3 e E4 esta última é a segunda mais favorável entre as estratégias simuladas enquanto a E3 é terceira mais favorável. Nesta orientação, a E4 tem desempenhos melhores que a E3 que de conforto visual quer a nível energético. Relativamente ao desempenho de conforto visual as estratégias E3 e E4 são a mais favorável e quarta mais favorável respetivamente entre as estratégias simuladas e a segunda e quinta mais favoráveis no desempenho energético. Este resultado indica que a E4 é adequada como solução de proteção exterior fixa. Existindo apenas uma estratégia mais favorável, que é a E11 (lamelas iluminância).

As estratégias regulamentares (E5 (60% do dia), E6 (60% da área) e E7 (300 W/m<sup>2</sup>)) em termos de conforto visual, necessidades de arrefecimento e consumo de iluminação elétrica não são equivalentes entre si. Para a métrica UDI a E6 tem o valor de 3,23%, o melhor valor entre as estratégias regulamentares e até mais favorável que algumas estratégias dinâmicas (E9 (DGI), E10 (lamelas DGI) e E14 (dupla orientação DGI)). Para as estratégias E5 e E7 apesar de terem valores semelhantes do UDI, 1,51% e 1,58% respetivamente, consegue-se

ver através das métricas  $UDI_{2000}$  (23,61% e 50,27% respetivamente) e  $UDI_{100}$  (74,88% e 48,15% respetivamente) que as condições de iluminação naturais são diferentes (resultados podem ser facultados pelo autor).

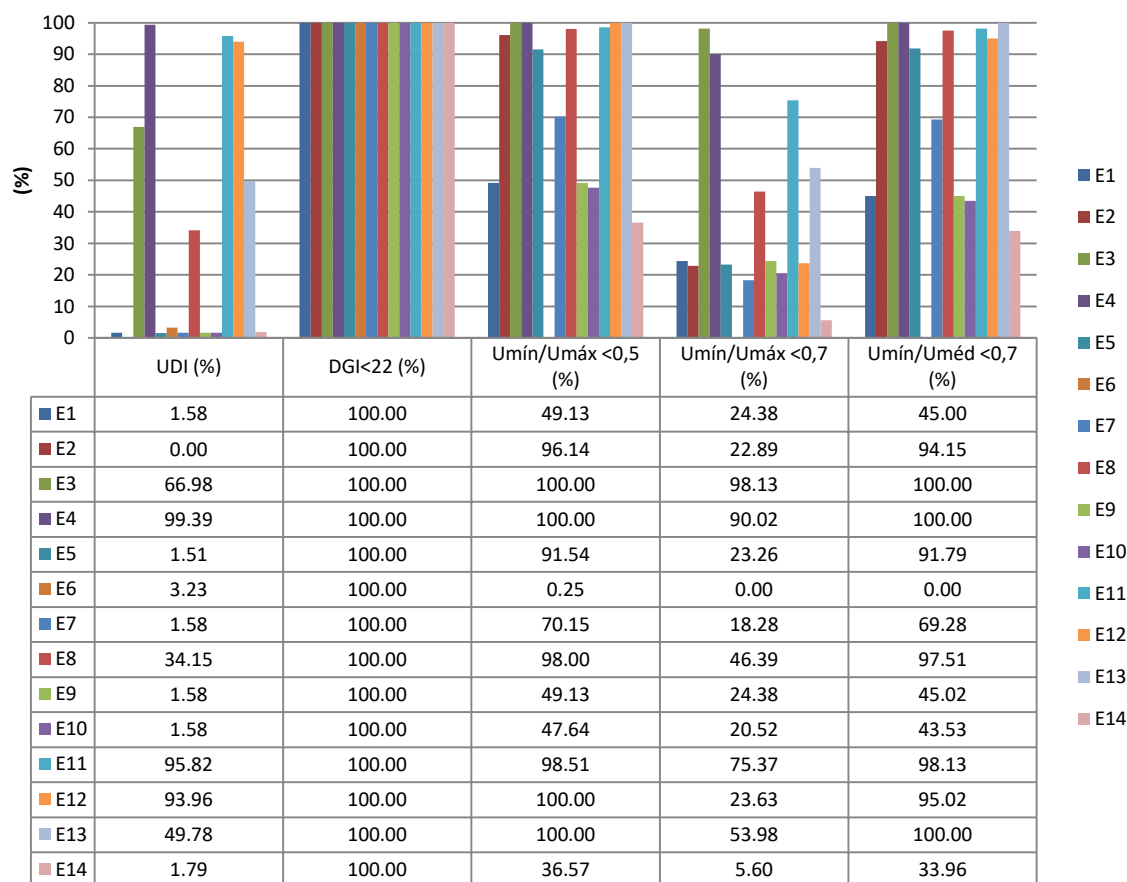


Figura 23 – Resultados das métricas de conforto visual para as estratégias simuladas de verão para a orientação Sul

Para a métrica  $DGI_{<22}$  (%) as estratégias E5, E6 e E7 têm o valor de 100%.

Para a métrica  $\frac{U_{mín}}{U_{máx>0,5}}$  (%) a estratégia 5 tem o valor de 91,54%, para a estratégia 7 tem um valor de 70,15% que é consideravelmente mais baixo e para a estratégia 6 tem um valor de 0,25% que é o valor mais baixo registado para esta orientação. Para a métrica  $\frac{U_{mín}}{U_{máx>0,7}}$  (%) as estratégias E5 e E7 têm valores semelhantes (23,26% e 18,28%) e para a estratégia 6 tem um valor de 0% que é o menor valor registado para esta orientação. Para a métrica  $\frac{U_{mín}}{U_{méd>0,7}}$  (%) a estratégia 5 tem o valor de 91,79%, para a estratégia 7 tem um valor de 69,28% que é consideravelmente mais baixo e para a estratégia 6 tem um valor de 0% que é o valor mais baixo registado para esta orientação.

Para a E5 as necessidades de arrefecimento são 5,52 kWh/m<sup>2</sup>, para a E7 são 8,30 kWh/m<sup>2</sup> e para a E6 são 10,34 kWh/m<sup>2</sup>.

Pela Figura 24 verifica-se também que o consumo da iluminação elétrica da E6 é o mais baixo (0,01 kWh/m<sup>2</sup>) nas estratégias regulamentares e igual ao menor valor registado para esta orientação (0,01 kWh/m<sup>2</sup> para E1), o



que pode ser explicado por nesta estratégia estar sempre uma parte da janela não coberta pelos estores e isto reflete-se também no valor da métrica  $UDI_{2000}$  (95,77%). Para a E7 o consumo é de 2,93 kWh/m<sup>2</sup> e para a E5 é de 4,56 kWh/m<sup>2</sup>.

Conclui-se assim que as estratégias regulamentares não são equivalentes do ponto de vista do conforto visual e consequentemente também não o são do ponto de vista do consumo da iluminação elétrica.

Em semelhança das outras orientações a E6 é a menos favorável para o conforto visual mas tem um bom desempenho energético sendo a quarta estratégia mais favorável entre todas as estratégias simuladas. Mas para as estratégias E5 e E7 apresenta desempenhos de conforto visuais mais vantajosos sendo estas a sétima e a nona estratégias mais favoráveis entre as estratégias simuladas. Já para o desempenho energético a E5 é a terceira mais favorável enquanto a E7 e a sétima mais favorável fazendo com que no desempenho global estas estratégias sejam a sétima e a nona mais favoráveis respetivamente.

Entre as estratégias dinâmicas (E8 (cut-off), E9, E10, E11, E13 (dupla orientação cut-off), E14) os valores do UDI variam consideravelmente, mas existem apenas duas estratégias com o UDI acima dos 49% sendo que a E11 apresenta o UDI mais favorável com o valor de 98,51%.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores da métrica  $DGI_{<22}$  (%) não variam entre si, para todas as estratégias esta métrica tem o valor de 100%.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores da métrica  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,5}}$  (%) variam bastante entre os 36% e os 100%, indicando que o critério mínimo do rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\max}}$  foi cumprido durante menos de metade do dia para algumas estratégias e durante a maior parte do dia para outras. Para esta métrica, várias estratégias apresentam valores acima dos 98% (E8, E11 e E13), porém os piores resultados são de estratégias que utilizam o DGI como parâmetro de controlo automático dos estores (E9, E10 e E14). A E14 apresenta 36,57%, o mais baixo entre as estratégias dinâmicas, enquanto as estratégias E10 e E14 apresentam valores perto dos 48%. Estes resultados sugerem que o controlo de estores através do DGI poderá não ser favorável à uniformidade da iluminância na superfície de trabalho.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14), os valores da métrica  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,7}}$  (%), que representa o rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\max}}$  mas com um valor mínimo diferente (valor recomendado), variam consideravelmente entre os 5% e os 76%. Destacam-se o valor da E11 de 75,37%, o mais alto das estratégias dinâmicas. Os piores resultados são de estratégias que utilizam o DGI como parâmetro de controlo automático dos estores (E9, E10 e E14). A E14 apresenta 5,6%, o mais baixo entre as estratégias dinâmicas, enquanto as estratégias E10 e E14 apresentam valores perto dos 22%. Estes resultados também sugerem que o controlo de estores através do DGI poderá não ser favorável à uniformidade da iluminância na superfície de trabalho.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores da métrica  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}} > 0,7}$  (%) variam bastante entre os 33% e os 100%, indicando que em geral o critério mínimo do rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}}}$  foi cumprido durante menos de metade do dia para algumas estratégias e durante a maior parte do dia para outras. Para esta métrica várias estratégias apresentam valores acima dos 97% (E8, E11 e E13), porém à semelhança dos resultados das métricas  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{máx}} > 0,5}$  (%) e  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{máx}} > 0,7}$  (%) os piores resultados são de estratégias que utilizam o DGI como parâmetro de controlo automático dos estores (E9, E10 e E14). As estratégias E9 e E10 apresentam valores perto dos 42% enquanto a E14 apresenta um valor consideravelmente menos favorável de 33,96%. Estes resultados também sugerem que o controlo de estores através do DGI poderá não ser favorável à uniformidade da iluminância na superfície de trabalho.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores das necessidades de arrefecimento variam bastante, dentro do intervalo 4-22 kWh/m<sup>2</sup>. Destaca-se a E11 na qual as necessidades de arrefecimento foram de 4,53 kWh/m<sup>2</sup>, a mais baixa entre as estratégias dinâmicas e perto do menor valor registado para esta orientação (4,74 kWh/m<sup>2</sup> para a E2). Apesar de existir bastante variabilidade nos valores medidos é de notar que os valores das necessidades de arrefecimento mais altas pertencem às estratégias que utilizam o DGI como parâmetro de controlo automático dos estores (E9, E10 e E14).

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores dos consumos da energia elétrica variam bastante, dentro do intervalo 0,01-1,61 kWh/m<sup>2</sup>. Para a E8, o consumo da iluminação elétrica foi de 1,61 kWh/m<sup>2</sup>, o valor mais alto registado para as estratégias dinâmicas. Para as estratégias E9, E10 e E14 o consumo da iluminação elétrica foi de 0,01 kWh/m<sup>2</sup>, a menor entre as estratégias dinâmicas e igual ao menor consumo registado para esta orientação (E1). Para a E11 o consumo da iluminação elétrica foi de 0,04 kWh/m<sup>2</sup>, segundo valor mais baixo e perto do mínimo registado para esta orientação. Apesar de existir alguma variabilidade nos valores medidos esta variabilidade perde alguma expressão quando comparada com o valor numérico das necessidades de arrefecimento.

Como se pode ver na Figura 24, a E11 é a estratégia mais favorável não só a nível global como a nível energético e de conforto visual entre todas as estratégias dinâmicas. Seguidas pelas estratégias E13 e E8, nas quais o método de controlo envolve o ângulo de *cut-off* nas lamelas.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 e E14) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 e E9 respetivamente) verifica-se que as estratégias de dupla orientação são globalmente mais favoráveis que as estratégias estáticas equivalentes. A E13 é globalmente melhor que E8 sendo mais favorável quer em conforto visual, quer em desempenho energético. O mesmo não se verifica para as restantes estratégias de orientação dupla sendo que no caso da E12 o desempenho do conforto visual é mais favorável do que o da E2 mas o desempenho energético é inferior e para as estratégias E14 e E9 acontece o inverso, sendo neste caso a E14 mais favorável energeticamente e menos favorável para conforto visual.

É de notar que para a métrica  $DGI_{<22}$  (%) é de 100% para todas as estratégias o que indica que pode não ser adequada para diferenciar o seu desempenho.

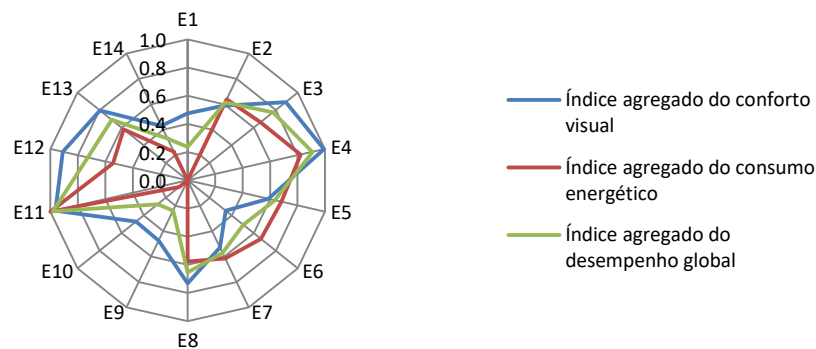


Figura 24 – Índices agregados das estratégias simuladas de verão para a orientação Sul

#### 4.2.2. Este, Oeste e Norte

Para as orientações de Este e Oeste verifica-se que as estratégias regulamentares (E5 (60% do dia), E6 (60% da área) e E7 (300 W/m<sup>2</sup>)) não são equivalentes do ponto de vista do conforto visual e consequentemente também não o são do ponto de vista do consumo da iluminação elétrica. Mais relevante e ao contrário do que seria de esperar também não são equivalentes do ponto de vista das necessidades energéticas, havendo assim vários métodos de calcular o impacto dos dispositivos de sombreamento e podendo resultar em diferentes resultados (ver Figura 25).

Para a orientação Este, comparando-se as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) chega-se à conclusão que as primeiras têm um desempenho de conforto visual e desempenho global superiores apesar de terem um desempenho energético inferior. Exceção a esta regra é a E14 que apresenta um desempenho de conforto visual e um desempenho energético superiores aos da estratégia simples equivalente E9.

Para a orientação Oeste, comparando-se as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) conclui-se que as de dupla orientação têm um desempenho de conforto visual e desempenho global superiores apesar de terem um desempenho energético inferior. Exceção a esta regra é a E14 que apresenta um desempenho de conforto visual e um desempenho energético superiores aos da estratégia simples equivalente E9.

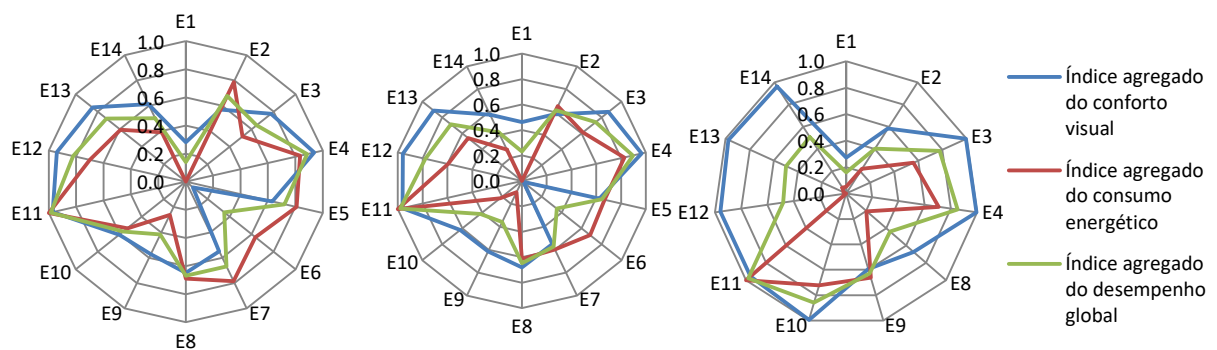
Para a orientação Este as necessidades de arrefecimento e o consumo devido à iluminação elétrica foram, em geral, maiores do que para a orientação Sul resultando em consumos de energia maiores para a orientação Este. Tal como para a orientação sul a estratégia globalmente menos favorável foi a E1 e a estratégia globalmente mais favorável foi a E11, não só a nível global como a nível energético e de conforto visual. A E1

apresentou necessidades térmicas de 33,23 kWh/m<sup>2</sup> e o consumo de iluminação elétrica de 0,02 kWh/m<sup>2</sup> (21,42 kWh/m<sup>2</sup> e 0,00 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para a E1 da orientação Sul) e a E11 apresentou necessidades térmicas de 5,4 kWh/m<sup>2</sup> e o consumo de iluminação elétrica de 0,09 kWh/m<sup>2</sup> (4,67 kWh/m<sup>2</sup> e 0,09 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para a E11 da orientação Sul).

Para a orientação Norte, comparando-se as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respectivamente) chega-se à conclusão que as estratégias E12 e E13 têm um desempenho de conforto visual e desempenho global superiores apesar de terem um desempenho energético inferior. A E14 apresenta um desempenho de conforto visual mais favorável do que a E9 e um desempenho energético menor favorável, sendo que no desempenho global a E9 é mais favorável.

Para a orientação Sul as necessidades de arrefecimento e o consumo devido à iluminação elétrica foram, em geral, semelhantes às da orientação Sul. Para a orientação Oeste as estratégias menos favoráveis foram a E1 e a E9, ambas com o mesmo consumo energético total. A E1 e a E9 apresentaram necessidades térmicas de 21,87 kWh/m<sup>2</sup> e o consumo de iluminação elétrica de 0,01 kWh/m<sup>2</sup> (21,42 kWh/m<sup>2</sup> e 0,00 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para a E1 da orientação Sul). Tal como para a orientação Sul a estratégia mais favorável foi a E11, que apresentou necessidades térmicas de 4,53 kWh/m<sup>2</sup> e o consumo de iluminação elétrica de 0,04 kWh/m<sup>2</sup> (4,67 kWh/m<sup>2</sup> e 0,09 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para a E11 orientação Sul).

Para a orientação Norte as necessidades de arrefecimento foram bastante menores do que para a orientação Sul e as mais baixas entre todas as orientações. Para o consumo da iluminação elétrica verificou-se o oposto sendo, em geral, um pouco maior do que para a orientação Sul, exceto para a E11. Para a orientação Norte a estratégia globalmente menos favorável foi a E1. A E1 apresentou necessidades térmicas de 10,63 kWh/m<sup>2</sup> e o consumo de iluminação elétrica de 0,01 kWh/m<sup>2</sup> (21,42 kWh/m<sup>2</sup> e 0,00 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para a E1 da orientação Sul). Tal como para a orientação sul a estratégia globalmente mais favorável foi a E11, que apresentou necessidades térmicas de 5,53 kWh/m<sup>2</sup> e o consumo de iluminação elétrica de 0,07 kWh/m<sup>2</sup> (4,67 kWh/m<sup>2</sup> e 0,09 kWh/m<sup>2</sup> respectivamente para a E11 da orientação Sul).



**Figura 25 – Índices agregados das estratégias simuladas de verão para as orientações Este (esquerda), Oeste (centro) e Norte (direita)**

### 4.3. Simulações de estores exteriores em Portugal no inverno

Neste subcapítulo será feita uma análise mais detalhada das medidas de desempenho de conforto visual e de desempenho energético para as estratégias de cada orientação simulada. As simulações aqui analisadas foram feitas para o período de inverno, para estores exteriores, por fazer sentido este posicionamento de estores que se revelou, mais benéfico para o clima de Portugal. Esta análise é feita separadamente (ver 4.1). É de notar que por no inverno as estratégias E5, E6 e E7 não foram simuladas, visto que o regulamento português especifica que na estação de aquecimento considera-se que os estores estão sempre abertos (como na estratégia E1). A análise será mais focada na orientação Sul pelo que nas outras orientações os resultados serão apresentados mais resumidamente.

#### 4.3.1. Sul

Nas Figura 26, Figura 27 e Figura 44 (Anexo F) encontram-se os valores das métricas de conforto visual e os consumos energéticos respetivamente para todas as estratégias simuladas para o inverno com a fachada orientada para Sul.

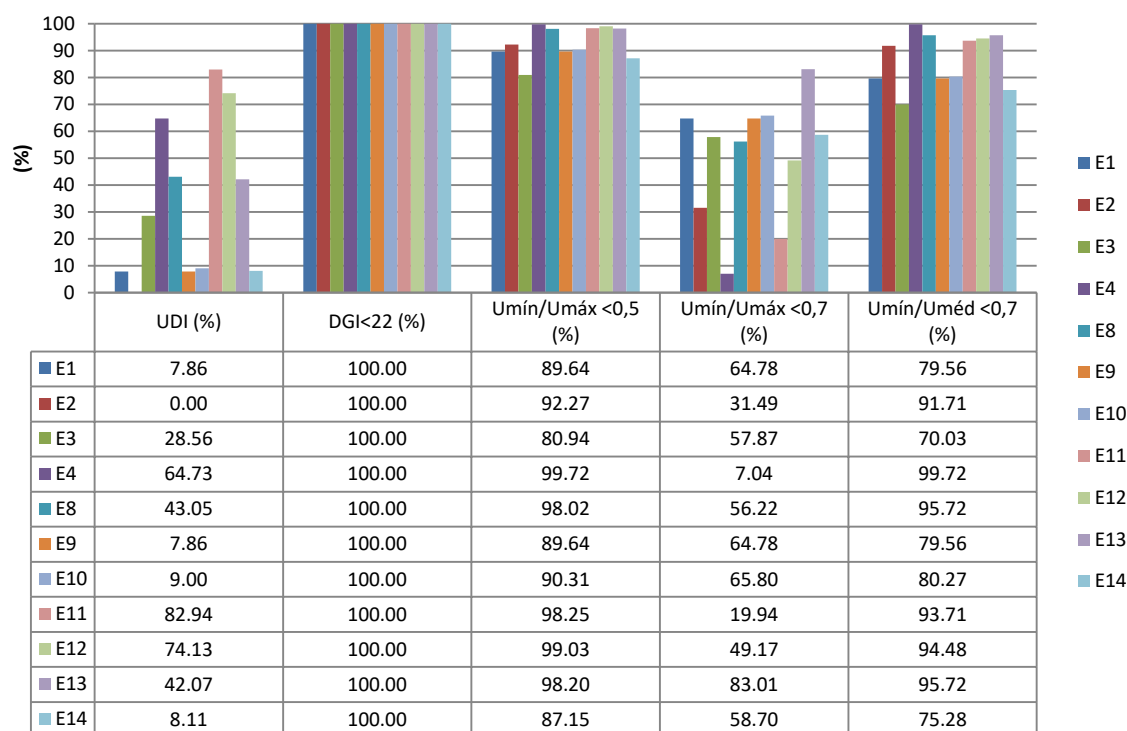


Figura 26 – Resultados das métricas de conforto visual para as estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul

Como se pode ver na Figura 27 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) as estratégias E1 e E2 são a oitava e sexta mais favoráveis em conforto visual. Mas enquanto a E2 é a menos favorável em desempenho energético a E1 é a segunda mais favorável entre todas as estratégias simuladas. Em desempenho global a E1 é a quinta mais favorável entre todas as estratégias e a E2 é a menos favorável.

Entre as estratégias E3 e E4 esta última é a oitava mais favorável entre as estratégias simuladas enquanto a E3 é nona mais favorável. Nesta orientação, a E4 tem desempenhos melhores que a E3 em conforto visual mas a nível energético é o inverso. Relativamente ao desempenho de conforto visual as estratégias E3 e E4 são a décima e a terceira mais favoráveis entre as estratégias simuladas e a quinta e nona mais favoráveis no desempenho energético. Indicando este resultado nesta orientação estas soluções de proteção exterior fixa não são indicadas.

Entre as estratégias dinâmicas (E8 (cut-off), E9 (DGI), E10 (lamelas DGI), E11 (lamelas iluminância), E13 (dupla orientação cut-off), E14 (dupla orientação DGI)) os valores do UDI variam consideravelmente, mas existem apenas 3 estratégias com o UDI acima dos 42% sendo que a E11 apresenta o UDI mais favorável com o valor de 82,94% (resultados podem ser facultados pelo autor).

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores da métrica  $DGI_{<22}$  (%) não variam entre si, para todas as estratégias esta métrica tem o valor de 100%.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores da métrica  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,5}}$  (%) variam entre os 87% e os 100%, indicando que o critério mínimo do rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\max}}$  foi cumprido durante a maior parte do dia. Para esta métrica, várias estratégias apresentam valores acima dos 98% (E8, E11 e E13), porém os piores resultados são de estratégias que utilizam o DGI como parâmetro de controlo automático dos estores (E9, E10 e E14). A E14 apresenta 87,15 %, o mais baixo entre as estratégias dinâmicas, enquanto as estratégias E10 e E14 apresentam valores perto dos 89%. Estes resultados sugerem que o controlo de estores através do DGI poderá não ser favorável à uniformidade da iluminância na superfície de trabalho.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14), os valores da métrica  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,7}}$  (%), que representa o rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\max}}$  mas com um valor mínimo diferente (valor recomendado), variam consideravelmente entre os 19% e os 84%. Destacam-se o valor da E13 de 83,01%, o mais alto das estratégias dinâmicas. O pior resultado verificou-se para a E11 com 19,94%. As restantes estratégias tiveram valores entre os 56% e os 66%.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores da métrica  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}>0,7}}$  (%) variam bastante entre os 75% e os 96%, indicando que em geral o critério mínimo do rácio  $\frac{U_{\min}}{U_{\text{méd}}}$  foi cumprido durante a maior parte do dia. Para esta métrica várias estratégias apresentam valores acima dos 93% (E8, E11 e E13), porém à semelhança dos resultados das métricas  $\frac{U_{\min}}{U_{\max>0,5}}$  (%) os piores resultados são de estratégias que utilizam o DGI como parâmetro de controlo automático dos estores (E9, E10 e E14). As estratégias E9 e E10 apresentam valores perto dos 80% enquanto a E14 apresenta um valor menos favorável de 75,28%. Estes resultados também sugerem que o controlo de estores através do DGI poderá não ser favorável à uniformidade da iluminância na superfície de trabalho.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores das necessidades de arrefecimento variam bastante, dentro do intervalo 0,01-1,74 kWh/m<sup>2</sup>. Destaca-se a E10 na qual as necessidades de arrefecimento foram de 0,01 kWh/m<sup>2</sup>, a mais baixa entre as estratégias dinâmicas e o valor mais baixo registado para esta orientação. Para a E11 o valor foi de 1,74 kWh/m<sup>2</sup>, a mais alta entre as estratégias dinâmicas.

Entre as estratégias dinâmicas (E8, E9, E10, E11, E13, E14) os valores dos consumos da energia elétrica variam bastante, dentro do intervalo 0,01-1,62 kWh/m<sup>2</sup>. Para as estratégias E9, E10 e E14 o consumo da iluminação elétrica foi de 0,91 kWh/m<sup>2</sup>, a menor entre as estratégias dinâmicas e igual ao menor consumo registado para esta orientação (E1). Para a E11 o consumo da iluminação elétrica foi de 0,92 kWh/m<sup>2</sup>, segundo valor mais baixo e perto do mínimo registado para esta orientação. Para a E8, o consumo da iluminação elétrica foi de 1,62 kWh/m<sup>2</sup>, o valor mais alto registado para as estratégias dinâmicas.

Como se pode ver na Figura 27 as estratégias E11 e E13 são as estratégias mais favoráveis a nível global entre todas as estratégias. A E11 é a oitava mais favorável a nível energético e a segunda a nível de conforto visual. Enquanto a E13 é a sexta mais favorável a nível energético e a quarta a nível de conforto visual.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 e E14) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 e E9 respetivamente) verifica-se as estratégias E12 e E13 têm melhor desempenho de conforto visual, energético e global que as que as estratégias estáticas equivalentes (E2 e E8), enquanto a E14 apesar de ter um desempenho energética igual à sua estratégia estática equivalente (E9) tem um desempenho de conforto visual e um desempenho global menos favoráveis que a E9.

É de notar que para a métrica  $DGI_{<22}$  (%) é mais uma vez de 100% para todas as estratégias, não sendo possível com esta métrica diferenciar o desempenho das diferentes estratégias.

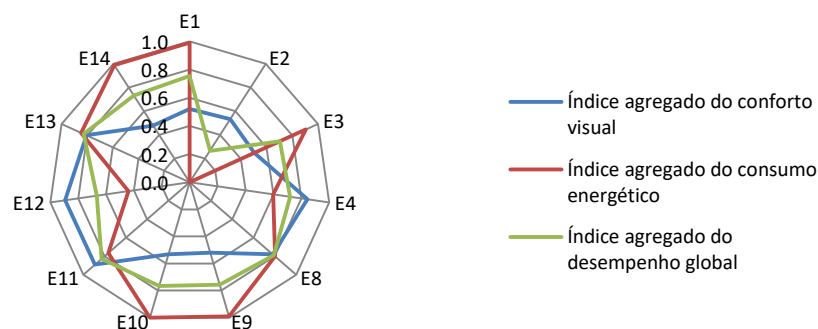


Figura 27 – Índices agregados das estratégias simuladas de inverno para a orientação Sul

### 4.3.2. Este, Oeste e Norte

Para a orientação Este, comparando-se as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) chega-se à conclusão que as primeiras têm um desempenho de conforto visual, energético e desempenho global superiores.

Para a orientação Oeste, comparando-se as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) chega-se à conclusão que as primeiras têm um desempenho de conforto visual, desempenho energético e desempenho global superiores. Exceção a esta regra é a E14 que apresenta um desempenho de conforto visual, desempenho energético e desempenho global inferiores aos da estratégia simples equivalente E9.

Para a orientação Norte, comparando-se as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) chega-se à conclusão que as primeiras têm um desempenho de conforto visual, energético e global superior.

Para a orientação Este as necessidades de aquecimento foram, em geral, ligeiramente menores que para a orientação Sul, enquanto o consumo da iluminação elétrica variou mais consoante a estratégia sendo em média semelhante. Tal como para a orientação sul a estratégia globalmente menos favorável foi a E2, enquanto para a estratégia globalmente mais favorável foi a E11 (para Sul foi a E11 e E13). A E2 apresentou necessidades térmicas de  $3,43 \text{ kWh/m}^2$  e o consumo de iluminação elétrica de  $5,90 \text{ kWh/m}^2$  ( $3,88 \text{ kWh/m}^2$  e  $5,90 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E2 orientação Sul) e a E11 apresentou necessidades térmicas de  $2,17 \text{ kWh/m}^2$  e o consumo de iluminação elétrica de  $1,17 \text{ kWh/m}^2$  ( $3,04 \text{ kWh/m}^2$  e  $0,95 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E11 e  $2,76 \text{ kWh/m}^2$  e  $3,86 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E13 da orientação Sul).

Para a orientação Oeste as necessidades de aquecimento e o consumo da iluminação elétrica foram para todas as estratégias consideravelmente mais baixas que para a orientação Sul. Tal como para a orientação sul a estratégia globalmente menos favorável foi a E2, enquanto para a estratégia globalmente mais favorável foi a E11 (para Sul foi a E11 e E13). A E2 apresentou necessidades térmicas de  $2,43 \text{ kWh/m}^2$  e o consumo de iluminação elétrica de  $5,90 \text{ kWh/m}^2$  ( $3,88 \text{ kWh/m}^2$  e  $5,90 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E2 orientação Sul) e a E11 apresentou necessidades térmicas de  $1,74 \text{ kWh/m}^2$  e o consumo de iluminação elétrica de  $0,92 \text{ kWh/m}^2$  ( $3,04 \text{ kWh/m}^2$  e  $0,95 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E11 e  $2,76 \text{ kWh/m}^2$  e  $3,86 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E13 da orientação Sul).

Para a orientação Norte as necessidades de aquecimento e o consumo da iluminação elétrica foram, em geral, consideravelmente maiores que para a orientação Sul. Tal como para a orientação sul a estratégia globalmente menos favorável foi a E2, enquanto para a estratégia globalmente mais favorável foi a E11 (para Sul foi a E11 e E13). A E2 apresentou necessidades térmicas de  $4,45 \text{ kWh/m}^2$  e o consumo de iluminação elétrica de  $5,90 \text{ kWh/m}^2$  ( $3,88 \text{ kWh/m}^2$  e  $5,90 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E2 orientação Sul) e a E11 apresentou necessidades térmicas de  $4,35 \text{ kWh/m}^2$  e o consumo de iluminação elétrica de  $1,26 \text{ kWh/m}^2$  ( $3,04 \text{ kWh/m}^2$  e  $0,95 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E11 e  $2,76 \text{ kWh/m}^2$  e  $3,86 \text{ kWh/m}^2$  respetivamente para a E13 da orientação Sul).



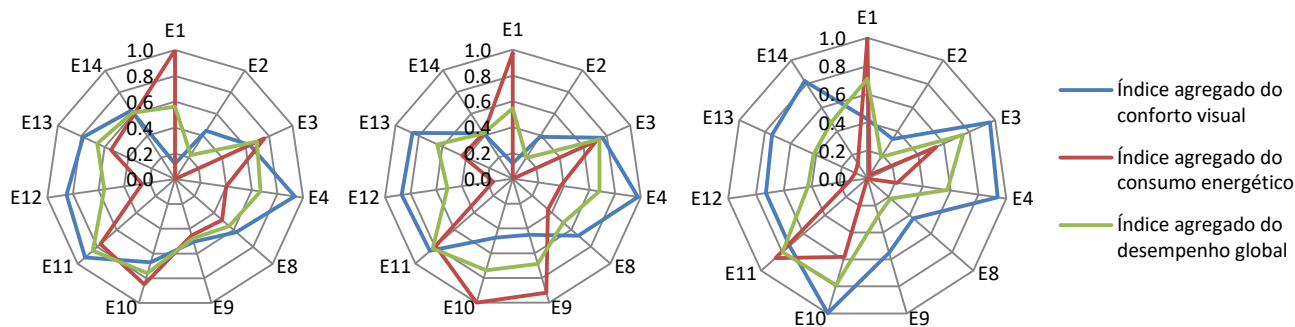


Figura 28 – Índices agregados das estratégias simuladas de inverno para as orientações Este (esquerda), Oeste (centro) e Norte (direita)

#### 4.4. Simulações de estores exteriores noutros países europeus

Além das simulações feitas para Lisboa fizeram-se também simulações para Berlim, Alemanha, Sofia, Bulgária e Copenhaga, Dinamarca. Berlim e Copenhaga estão numa latitude muito superior e com isso existe uma diferença considerável no número de horas de exposição solar bem como da altura solar. Além disso as temperaturas são em geral mais baixas sendo que em princípio as necessidades de aquecimento são mais relevantes que em Portugal.

Consideraram-se estas simulações apenas para a orientação sul por ser a com maior tempo de exposição ao sol neste hemisfério (ver 3.4).

É de referir que os resultados destas simulações são condicionados pela modelação do caso original, muitas das condições nas quais este caso foi simulado para Portugal foram mantidas para facilitar a comparação entre valores. O caso foi modelado para um gabinete construído em Portugal, os materiais desse gabinete são para edifícios com o clima português pelo que poderão não ser os mais adequados em países de clima diferente, além disso algumas considerações dos regulamentos portugueses foram mantidos para efeito de comparação (como temperaturas dos termostatos, renovações por hora, equipamentos de climatização de referência, etc, ver 3.2.2 e 3.3.3). Do mesmo modo foi considerado um horário de trabalho que não reflete necessariamente o de outros países. A distância recomendada entre a parede e a superfície de trabalho (ver Anexo E) neste caso foi calculada de tal modo que seria diferente para localizações geográficas diferentes, pelo que a distância de 12 cm poderá não ser a mais adequada. A altitude considerada no caso das simulações localizadas em Lisboa foi mantida nestas simulações apesar de tal altitude ser em geral diferente. Todas estas considerações influenciam os resultados finais das simulações e foram mantidas apenas para comparar resultados de simulações efetuadas em condições semelhantes.

Por outro lado vários aspetos foram modificados para que estas simulações fossem efetuadas. As coordenadas do local da simulação (definidas em 3.3.3.1) foram modificadas para as coordenadas das cidades a simular (ver Tabela 21).

**Tabela 21 – Coordenadas de cidades estrangeiras simuladas (notação decimal)**

	Latitude (°)	Longitude (°)
<b>Berlim</b>	53,31 N	13,24 E
<b>Copenhaga</b>	55,40 N	12,33 E
<b>Sofia</b>	42,41 N	23,19 E

Além disso foram utilizados diferentes *weather files* (provenientes de IVEC), um diferente por cada cidade. Foram também alteradas as *time zone* (ver 3.3.3.1) de cada localização: UTC + 1 (Berlim e Copenhaga), UTC + 2 (Sofia). Por último apagaram-se os objetos da classe *SizingPeriod:DesignDay* por terem sido ajustados para o clima português.

Coincidentemente a mudança de horário (horário de verão e inverno) nos quatro países é na mesma data pelo que esta consideração não foi afetada por simulações noutros países.

Para estas simulações não devem ser comparados os índices de desempenho global para a mesma estratégia em sítios geográficos diferentes. Estes índices são normalizados com os resultados das simulações da mesma localização, isto quer dizer que mesmo que os resultados das métricas fossem os mesmos para a mesma estratégia em dois locais diferentes os valores normalizados seriam em geral diferentes.

#### **4.4.1. Impacto das estratégias de controlo de estores na estação de Verão**

Para esta estação dividiu-se a análise de resultados por localização da simulação e uma análise global de seguida. Mais resultados destas simulações podem ser facultados pelo autor.

##### **4.4.1.1. Berlim, Alemanha**

Como se pode ver na Figura 29 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) a E1 é a menos favorável entre todas as estratégias e a E2 é a oitava mais favorável.

Entre as estratégias regulamentares (E5 (60% do dia), E6 (60% da área) e E7 (300 W/m<sup>2</sup>)) a E7 é a mais favorável sendo a sétima estratégia mais favorável entre todas as estratégias simuladas enquanto a E6 é a menos favorável sendo a nona mais favorável.

Como se pode ver na Figura 29 a E4 é a estratégia mais favorável não só a nível global como a nível energético e de conforto visual entre todas as estratégias. Seguida de perto pela E11 (lamelas iluminância), segunda mais favorável em conforto visual e necessidades energéticas.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) verifica-se as estratégias de dupla orientação são globalmente mais favoráveis que as estratégias estáticas equivalentes. As estratégias E12 e E13 são globalmente melhores que as estratégias E2 e E8 respetivamente sendo mais favoráveis quer em conforto visual, quer em desempenho energético. O mesmo não se verifica para a E14 em

que o desempenho do conforto visual é menos favorável do que o da E9 mas o desempenho energético é maior.

#### **4.4.1.2. Sofia, Bulgária**

Como se pode ver na Figura 29 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) a E1 é a menos favorável entre todas as estratégias e a E2 é a nona mais favorável.

Entre as estratégias regulamentares (E5 (60% do dia), E6 (60% da área) e E7 (300 W/m<sup>2</sup>)) a E5 é a mais favorável sendo a sétima mais favorável entre todas as estratégias simuladas enquanto a E6 é a menos favorável sendo a décima mais favorável.

Como se pode ver na Figura 29 a E4 é a estratégia mais favorável não só a nível global como a nível energético e de conforto visual entre todas as estratégias. Seguida de perto pela E11 (lamelas iluminância), segunda mais favorável em conforto visual e necessidades energéticas.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) verifica-se as estratégias de dupla orientação são globalmente mais favoráveis que as estratégias estáticas equivalentes. As estratégias E13 e E14 são globalmente melhores que as estratégias E8 e E9 respetivamente sendo mais favoráveis quer em conforto visual, quer em desempenho energético. O mesmo não se verifica para a E12 em que o desempenho do conforto visual é mais favorável do que o da E2 mas o desempenho energético é inferior.

#### **4.4.1.3. Copenhaga, Dinamarca**

Como se pode ver na Figura 29 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) a E1 é a menos favorável entre todas as estratégias e a E2 é a décima mais favorável.

Entre as estratégias regulamentares (E5 (60% do dia), E6 (60% da área) e E7 (300 W/m<sup>2</sup>)) a E7 é a mais favorável, sendo a sétima mais favorável entre todas as estratégias simuladas, enquanto a E5 é a menos favorável, sendo a nona menos favorável.

Como se pode ver na Figura 29 a E4 é a estratégia mais favorável não só a nível global como a nível energético e de conforto visual entre todas as estratégias. Seguida de perto pelas estratégias E11 e E3, a E11 (lamelas iluminância) é a segunda mais favorável em conforto visual e a quarta mais favorável em necessidades energéticas, já a E3 é a terceira mais favorável em ambos os campos.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) verifica-se as estratégias de dupla orientação são globalmente mais favoráveis que as estáticas equivalentes. As estratégias E12 e E13 são globalmente melhores que as estratégias E2 e E8 respetivamente, sendo mais

favoráveis quer em conforto visual, quer em desempenho energético. Para a E14 em que o desempenho do conforto visual é menos favorável do que o da E9 mas o desempenho energético é superior.

#### 4.4.1.4. Análise comparativa entre os diferentes países europeus

Para todas as localizações estrangeiras simuladas a E4 apresentou-se como estratégias mais favorável seguida de perto pela E11 e em Copenhaga a E3 teve também um desempenho global muito bom. Na Figura 29 estão gráficos que mostram o desempenho de cada estratégia para todas as localizações quer em conforto visual quer em consumo energético. Estes resultados destoam um pouco das simulações para Lisboa em que para a mesma orientação a E11 é mais favorável seguida com alguma distância pela E4. Ainda assim as duas estratégias mais favoráveis a serem as mesmas entre as quatro localizações.

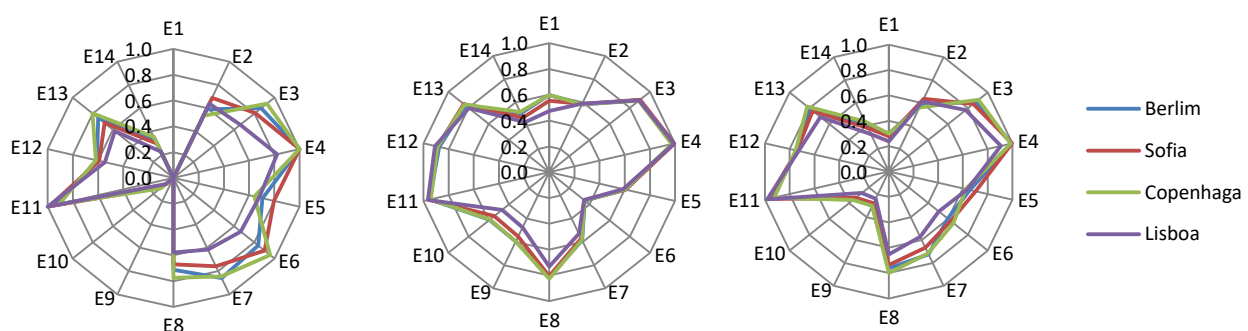


Figura 29 – Índices agregados de conforto visual (esquerda), do consumo energético (centro) e de desempenho global (direita) para as simulações em todas as cidades simuladas para a orientação sul no verão

### 4.4.2. Impacto das estratégias de controlo de estores na estação de Inverno

Para esta estação dividiu-se a análise de resultados por localização da simulação e uma análise global de seguida. Mais resultados destas simulações podem ser facultados pelo autor.

#### 4.4.2.1. Berlim, Alemanha

Como se pode ver na Figura 30 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) a E2 é a menos favorável entre todas as estratégias e a E1 é a mais favorável.

Como se pode ver na Figura 30 as estratégias E1, E9 e E10 são as estratégias mais favoráveis a nível global, tendo entre si os mesmos desempenhos de conforto visual, energético e global o que indica que para as estratégias E9 e E10 os estores estiveram sempre abertos.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) verifica-se as estratégias de dupla orientação 12 e 13 são globalmente mais favoráveis que as estratégias estáticas equivalentes, sendo mais favoráveis quer em conforto visual, quer em desempenho energético. O mesmo não

se verifica para a E14 em que o desempenho global e do conforto visual são menos favoráveis do que o da E9 mas o desempenho energético é superior.

#### **4.4.2.2. Sofia, Bulgária**

Entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) a E2 é a menos favorável entre todas as estratégias (Figura 30).

Como se pode ver na Figura 30 a E10 (lamelas DGI) é a estratégia mais favorável tanto a nível global como a nível energético, sendo a sétima mais favorável em conforto visual. Seguida de muito perto pelas estratégias E1 e E9, sendo as mais favoráveis em desempenho energético e as oitavas em desempenho do conforto visual.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 (DGI) respetivamente) verifica-se as estratégias de dupla orientação 12 e 13 são globalmente mais favoráveis que as estratégias estáticas equivalentes, sendo mais favoráveis quer em conforto visual, quer em desempenho energético. Para a E14 em que o desempenho global, do conforto visual e energético são menos favoráveis do que os da E9.

#### **4.4.2.3. Copenhaga, Dinamarca**

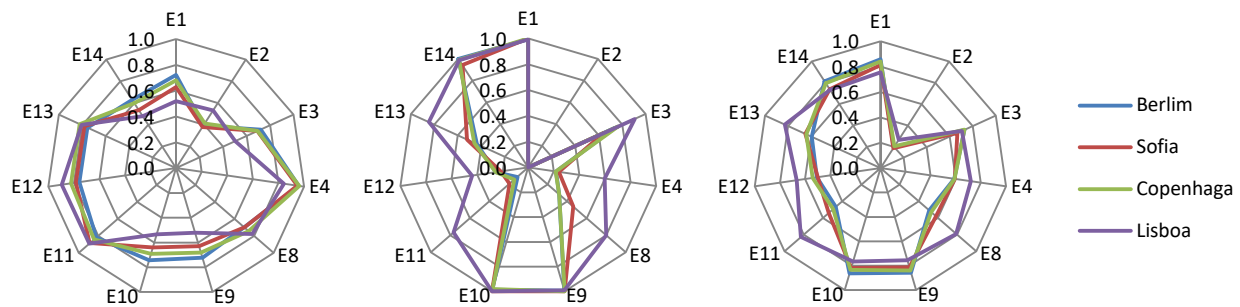
Como se pode ver na Figura 30 entre as estratégias estáticas (E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados)) a E2 é a menos favorável entre todas as estratégias e a E1 é a mais favorável.

As estratégias E1, E9 e E10 são as estratégias mais favoráveis a nível global (Figura 30). A E9 e E10 tendo entre si os mesmos desempenhos de conforto visual, sendo o oitavo mais favorável, energético, sendo o mais favorável, e global o que indica que para a E9 (DGI) os estores estiveram sempre abertos. A E10 (DGI-dupla orientação) é a sexta mais favorável em conforto visual e a quarta mais favorável em desempenho energético.

Comparando as estratégias de estores de dupla orientação (E12, E13 (dupla orientação cut-off) e E14 (dupla orientação DGI)) com as estratégias equivalentes simples (E2, E8 (cut-off) e E9 respetivamente) verifica-se as estratégias de dupla orientação 12 e 13 são globalmente mais favoráveis que as estratégias estáticas equivalentes, sendo mais favoráveis quer em conforto visual, quer em desempenho energético. Para a E14 em que o desempenho global, do conforto visual e energético são menos favoráveis do que os da E9.

#### **4.4.2.4. Análise comparativa entre os diferentes países europeus**

Para todas as localizações estrangeiras simuladas as estratégias E1, E9 e E10 foram em geral as mais favoráveis frequentemente com desempenhos globais iguais. Na Figura 30 estão gráficos que mostram o desempenho de cada estratégia para todas as localizações quer em conforto visual quer em consumo energético. Com isto conclui-se que a estratégia mais favorável seria deixar os estores sempre abertos sem qualquer tipo de controlo. Estes resultados destoam um pouco das simulações para Lisboa em que para a mesma orientação as estratégias E11 e E13 eram as mais favoráveis seguida a alguma distância das estratégias E8, E1, E9 e E10.



**Figura 30 – Índices agregados de conforto visual (esquerda), do consumo energético (centro) e de desempenho global (direita) para as simulações em todas as cidades simuladas para a orientação sul no inverno**

## 5. Conclusões

Esta dissertação consistiu num estudo sobre os impactos da utilização de estratégias de controlo automático de estores venezianos com base em simulações térmicas de um gabinete situado no campus da alameda do IST. Foram criadas 14 estratégias de modo a cobrir as várias opções encontradas na literatura de configuração da altura do estore e do ângulo das lamelas.

Foram realizadas simulações para as diferentes estratégias de controlo automático de estores, considerando o modelo de um gabinete do pavilhão do DECivil no IST. Este gabinete possui um vão envidraçado orientado para Este, tendo sido estudadas adicionalmente as orientações Norte, Sul e Oeste. Realizou-se um conjunto alargado de simulações para diferentes condições (ver 3.2.1): (1) quatro orientações da fachada; (2) duas posições dos estores em relação à janela; (3) dois períodos do ano; (4) dois tipos de estores; e (5) quatro condições climáticas.

De acordo com a bibliografia estudada, foram definidas seis métricas para o conforto visual, separadas em três categorias (ver 3.2.2): quantidade de luz; uniformidade da iluminação; encandeamento. Para além do conforto visual, foram ainda consideradas o consumo energético para o sistema AVAC e para a iluminação elétrica.

De modo a facilitar a comparação das estratégias, as seis métricas de conforto visual foram agregadas num índice de conforto visual, tal como as duas necessidades energéticas foram também agregadas num índice de consumo energético. Finalmente, estes dois índices foram agregados num índice de desempenho global. Assim, aplicando os índices agregados de conforto visual, consumo energético e desempenho global a cada estratégia simulada, as várias estratégias puderam ser analisadas e comparadas. Como resultado, foram extraídas várias conclusões que se referem de seguida.

No que respeita a comparação entre estores interiores e exteriores, verificou-se que em termos de conforto visual o desempenho era idêntico, porém no verão os estores exteriores apresentavam melhor desempenho térmico enquanto no inverno os estores interiores apresentavam melhor desempenho térmico. Calculando consumos médios totais (verão + inverno) para estores interiores e exteriores concluiu-se que os estores exteriores eram mais aconselhados para utilizar durante o ano inteiro em Lisboa.

As estratégias de controlo de estores foram separadas em (1) fixas, (2) regulamentares e (3) dinâmicas. Entre as fixas – E1 (estores abertos), E2 (estores fechados), E3 (lamelas a 90°), E4 (lamelas a 45°), E12 (dupla orientação fechados) –, verificou-se que a E4 é a mais indicada no verão, considerando qualquer orientação. No inverno, verificou-se que a E3 é a mais indicada, exceto a orientação sul, para a qual nenhuma das estratégias fixas se adequa. Adicionalmente verificou-se que a E1 é a estratégia menos favorável no verão e a E2 a menos favorável no inverno, para qualquer orientação.

Nas estratégias regulamentares (E5 (60% do dia), E6 (60% da área) e E7 (300 W/m<sup>2</sup>)), verificou-se que estas em geral não eram equivalentes entre si, para todas as orientações, quer do ponto de vista do conforto visual mas mais importante do ponto de vista térmica, havendo assim vários métodos de calcular o impacto dos

dispositivos de sombreamento e podendo resultar em diferentes resultados. Estas estratégias não tiveram bons desempenhos globais com a exceção da E5 (60% do dia) que foi a quarta estratégia mais favorável para a orientação Este.

Verificou-se que as estratégias que utilizaram o DGI (E9 (DGI), E10 (lamelas DGI) e E14 (dupla orientação DGI)) como parâmetro de controlo atingiram em geral valores mais baixos para as métricas de uniformidade de iluminância na superfície de trabalho entre as estratégias dinâmicas. Este efeito tem maior expressão nos casos simulados para o verão do que nos casos de inverno.

Entre as estratégias dinâmicas (E8 (cut-off), E9, E10, E11 (lamelas iluminância) a E11 foi em todos os casos (todas as orientações quer no verão, quer no inverno) a estratégias com melhor desempenho global, tendo em vários casos o melhor desempenho de conforto visual e por vezes o melhor desempenho energético. Apenas no inverno existiram duas orientações onde outras estratégias se aproximaram deste patamar. Para a orientação sul a E11 e a E13 (dupla orientação cut-off) tiveram o mesmo índice de desempenho global e para a orientação norte a E10 (lamelas DGI) teve um valor de desempenho global bastante próximo da E11.

Além disto Para a orientação Este quer no inverno, quer no verão a E9 foi a estratégia menos favorável enquanto para a orientação norte a E8 foi a menos favorável em ambas as estações. Para a orientação Sul no verão as estratégia menos favorável foi a E9, com o mesmo desempenho global que a E1, e para o inverno a menos favorável foi a E12. Para a orientação Oeste no verão a estratégia menos favorável foi a E9 enquanto para o inverno a menos favorável foi a E14.

Entre todas as estratégias simuladas a mais favorável foi uma estratégia dinâmica, a E11 foi a mais favorável. A estratégia menos favorável foi a E1 para simulações no verão e a E2 para simulações no inverno.

Comparando as estratégias com estores de dupla orientação (E12, E13 e E14) com as suas estratégias equivalentes em estores venezianos simples (E2, E8 e E9 respetivamente), verifica-se que as primeiras são em geral mais favoráveis globalmente e também em termos de conforto energético embora nos consumos energéticos só em alguns casos também são mais favoráveis.

Complementarmente foram realizadas simulações para outras cidades europeias: Berlim na Alemanha, Copenhaga na Dinamarca e Sofia na Bulgária. Estas simulações foram executadas apenas com o vão envidraçado orientado a Sul e as suas conclusões são apresentadas a baixo.

Entre as estratégias com estores de orientação dupla (E12, E13 e E14) e as estratégias equivalentes em estores venezianos simples (E2, E8 e E9 respetivamente) verifica-se que as primeiras são em geral globalmente melhores com a exceção da E14 (dupla orientação DGI). Sendo as estratégias E12 e E13 mais favoráveis quer em conforto visual quer em desempenho energético, com a exceção da simulação de verão em Sofia, Bulgária onde esta análise se aplica apenas às estratégias E13 e E14. Este resultado vai ao encontro do que foi verificado para Lisboa em que as estratégias de dupla orientação também foram em geral melhores que as suas estratégias simples equivalentes.



Para o verão em geral a E4 destacou-se como estratégia globalmente mais favorável seguida de perto pela E11. Para o inverno verificou-se que a melhor abordagem é manter os estores sempre abertos pois nas estratégias mais favoráveis são a 1, 9 e 10. A E11 é a segunda mais favorável nesta situação. É de destacar que para as simulações no estrangeiro em qualquer uma das orientações as estratégias mais favoráveis foram estratégias estáticas. Isto difere com os resultados para Lisboa em que a E11 foi a mais favorável para todas as orientações quer de inverno, quer de verão.

Para todas as localizações e orientações simuladas a métrica  $DGI_{<22}$  (%) teve valores sempre muito parecidos e por vezes iguais para todas as estratégias, apesar dos valores terem sido apresentados apenas para simulações para a orientação Sul em Lisboa. Com isto conclui-se que esta métrica não é adequada para diferenciar o desempenho do conforto visual quanto ao encandeamento, pelo que em estudos futuros se deve equacionar a utilização de outro índice de encandeamento como por exemplo o DGP como sugerido por Wienold & Christoffersen (2005).

## **5.1. Desenvolvimentos futuros**

No seguimento deste trabalho existem várias possibilidades de desenvolvimentos futuros.

Na dissertação foram utilizadas várias estratégias de controlo automático de estores, porém ficaram por testar muitas outras estratégias. Uma das possibilidades de desenvolvimento futuro seria simular para o mesmo caso outras estratégias de controlo dinâmico ou até combinações de diferentes estratégias de modo a melhorar o entendimento dos seus efeitos no conforto visual e no desempenho energético.

Este trabalho foi essencialmente numérico e de simulação do modelo do gabinete. Para validar os resultados obtidos dessas simulações, seria importante complementar com trabalho experimental no gabinete real. Pelo que uma proposta de desenvolvimento futuro é realizar medições reais do controlo com as estratégias propostas no gabinete, confrontando os resultados obtidos experimental e numérico.

Neste trabalho as estratégias foram implementadas durante todo o horário de trabalho, mas para otimizar o desempenho energético a estratégia de controlo deve adaptar-se à ocupação do espaço. Neste contexto propõe-se um desenvolvimento futuro através de uma campanha experimental, com a modelação da ocupação do gabinete, e a monitorização de um caso real, utilizando sensores de ocupação, analisando e quantificando deste modo o impacto que a ocupação do gabinete terá no consumo energético do gabinete para as diferentes estratégias de controlo automático de estores.

Ainda na vertente da aplicação real, seria interessante, o desenvolvimento futuro a implementação de um sistema de controlo automático de estores inteligente. Com a recolha de informação proveniente de sensores e um controlo automático com opção de sobreposição manual, isto é, controlo automático no qual o utilizador pode corrigir manualmente a posição dos estores definida pelo sistema de controlo automático, há a possibilidade de serem analisadas as preferências do utilizador e adaptar o sistema de controlo automático a cada utilizador. Deste modo poder-se-ia mitigar ou ultrapassar uma das dificuldades de implementação destes sistemas, que é a grande variabilidade das preferências pessoais.



## Referências bibliográficas

- Aprile, I., Ferrarin, M., Padua, L., Di Sipio, E., Simbolotti, C., Petroni, S., ... Dickmann, A. (2014). Walking strategies in subjects with congenital or early onset strabismus. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(484). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00484>
- Aries, M. (2005, September 6). *Human Lighting Demands*. Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- Aste, N., Compostella, J., & Mazzon, M. (2012). Comparative energy and economic performance analysis of an electrochromic window and automated external venetian blind. *Energy Procedia*, 30(0), 404–413. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.048>
- Athienitis, A. K., & Tzempelikos, A. (2002). A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device. *Solar Energy*, 72(4), 271–281. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00016-6](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00016-6)
- Bauer, M., Geiginger, J., Hegetschweiler, W., Morel, N., Sejkora, G., & Wurmsdobler, P. (1996). *DELTA : A blind controller using fuzzy logic*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Bellia, L., Cesarano, A., Iuliano, G. F., & Spada, G. (2008). Daylight Glare: A Review of Discomfort Indexes. Presented at the Visual quality and energy efficiency in indoor lighting: today for tomorrow, Rome: Ente per le Nuove Tecnologie, L'Energia e L'Ambiente, ENEA.
- Bellia, L., Pedace, A., & Fragliasso, F. (2015). Dynamic daylight simulations: Impact of weather file's choice. *Solar Energy*, 117, 224–235. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.002>
- Bernal, W., Mangharam, R., Behl, M., & Nghiem, T. X. (2012). MLE+: A Tool for Integrated Design and Deployment of Energy Efficient Building Controls. *4th ACM Workshop On Embedded Sensing Systems For Energy-Efficiency In Buildings, (BuildSys '12), Toronto, Canada*. Retrieved from [http://repository.upenn.edu/mlab\\_papers/51/](http://repository.upenn.edu/mlab_papers/51/)
- Boyce, P., Hunter, C., & Howlett, O. (2003). *The Benefits of Daylight through Windows*. Rensselaer Polytechnic Institute.
- Boyce, P. R., Veitch, J. A., Newsham, G. R., Jones, C. C., Heerwagen, J., Myer, M., & Hunter, C. M. (2006). Occupant use of switching and dimming controls in offices. *Lighting Research & Technology*, 38(4), 358–378.
- Bülow-Hübe, H. (2008). *Daylight in glazed office buildings* (No. EBD-R--08/17). Lund University, Faculty of Engineering.
- Cantin, F., & Dubois, M. (2011). Daylighting metrics based on illuminance, distribution, glare and directivity. *Lighting Res. Technol.*, pp. 291–307.
- Carmody, J., & Haglund, K. (2006). *External Shading Devices in Commercial Buildings*. Air Movement and Control Association International, University of Minnesota.
- Casaca, J., Matos, J., & Baio, M. (2004). *Topografia Geral*. Lidel.
- Chaiwiwatworakul, P., & Chirarattananon, S. (2013). A double-pane window with enclosed horizontal slats for daylighting in buildings in the tropics. *Energy and Buildings*, 62, 27–36. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.027>
- Chaiwiwatworakul, P., Chirarattananon, S., & Rakkwamsuk, P. (2009). Application of automated blind for daylighting in tropical region. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 2927–2943. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.07.008>
- Chan, Y.-C., Tzempelikos, A., & Konstantzos, I. (2015). A systematic method for selecting roller shade properties for glare protection. *Energy and Buildings*, 92, 81–94. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.057>
- Chartered Institution of Building Services Engineers. (2008). *CIBSE Concise Handbook*. Chartered Institution of Building Services Engineers.
- Chauvel, P., Collins, J. B., Dogniaux, R., & Longmore, J. (1982). Glare from windows: current views of the problem. *Lighting Research and Technology*, 14(1), 31–46.
- CIBSE. (2012). Energy efficiency in buildings, CIBSE Guide F. The Chartered Institution of Building Services Engineers.

- da Silva, P. C., Leal, V., & Andersen, M. (2012). Influence of shading control patterns on the energy assessment of office spaces. *Energy and Buildings*, 50(0), 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.019>
- David, M., Donn, M., Garde, F., & Lenoir, A. (2011). Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. *Building and Environment*, 46(7), 1489–1496. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.022>
- Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013. (2013, December 3). Diário da República, 2.ª série — N.º 234.
- Despacho n.º 15793-K/2013. (2013, December 3). Diário da República, 2.ª série — N.º 234.
- DiBartolomeo, D. L., Lee, E. S., Rubinstein, F. M., & Selkowitz, S. E. (1996). Developing a Dynamic Envelope/Lighting Control System with Field Measurements. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 26(1), 146–164.
- Díaz-Balteiro, L., & Romero, C. (2004). In search of a natural systems sustainability index. *Ecological Economics*, 49(3), 401–405.
- Dubois, M. (2001a). *Impact of Shading Devices on Daylight Quality in Offices* (No. TABK--01/3062). Department of Construction and Architecture, Division of Energy and Building.
- Dubois, M. (2001b). *Impact of Solar Shading Devices on Daylight Quality* (No. TABK--01/3061). Department of Construction and Architecture, Division of Energy and Building.
- Dubois, M. (2003). Shading devices and daylight quality: an evaluation based on simple performance indicators. *Lighting Research and Technology*, 35(1), 61–74.
- EN ISO 13790. (2006). Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling.
- Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013a, April 1). ApplicationGuide for EMS.
- Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013b, April 1). EnergyPlus Engineering Reference.
- Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013c, April 1). External Interface(s) ApplicationGuide.
- Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013d, April 1). OutputDetails and Examples.
- Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013e, April 3). Getting Started with EnergyPlus.
- Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013f, April 3). Input Output Reference.
- Faustino, C. R. (2012, Outubro). *Influência dos Vãos Envidraçados no Desempenho Energético de Edifícios*. Universidade técnica de Lisboa, Lisboa.
- Fernandes, L. L., Lee, E. S., & Ward, G. (2013). Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort. *Energy and Buildings*, 61(0), 8–20. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.057>
- Foster, M., & Oreszczyn, T. (2001). Occupant control of passive systems: the use of Venetian blinds. *Building and Environment*, 36(2), 149–155. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00074-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00074-8)
- Franzetti, C., Fraise, G., & Achard, G. (2004). Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings. *Energy and Buildings*, 36(2), 117–126. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.005>
- Galasiu, A. D., & Veitch, J. A. (2006). Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review. *Special Issue on Daylighting Buildings*, 38(7), 728–742. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.001>
- Gery, S., & Koeffler, H. P. (2010). Circadian rhythms and cancer. *Cell Cycle*, 9(6), 1097–1103.
- Gilani, S., O'Brien, W., Gunay, H. B., & Carrizo, J. S. (2015). Use of dynamic occupant behavior models in the building design and code compliance processes. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.044>
- Golombek, D. A., Casiraghi, L. P., Agostino, P. V., Paladino, N., Duhart, J. M., Plano, S. A., & Chiesa, J. J. (2013). The times they're a-changing: Effects of circadian desynchronization on physiology and disease. *Special Issue on Time Perception*, 107(4), 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2013.03.007>
- Gomes, M. G., Santos, A. J., & Rodrigues, A. M. (2014). Solar and visible optical properties of glazing systems with venetian blinds: Numerical, experimental and blind control study. *Building and Environment*, 71(0), 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.003>

- Guillemin, A., & Morel, N. (2001). An innovative lighting controller integrated in a self-adaptive building control system. *Special Issue: Proceedings of the International Conference on*, 33(5), 477–487. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00100-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00100-6)
- Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. (2014). Design of Curtain Wall Facades for Improved Solar Potential and Daylight Distribution. *Energy Procedia*, 57, 1815–1824. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.045>
- Hadwan, M. K., & Carter, D. J. (2006). Light loss in complex heavily obstructed interiors: influence of obstruction density, obstruction height and luminaire type (Vol. 38, pp. 53–71). Presented at the Lighting Research and Technology.
- Heschong Mahone Group. (1999a). *Daylighting in Schools*.
- Heschong Mahone Group. (1999b). *Skylighting and Retail Sales*.
- House Plans Helper. (2015). Floor Plans For A House. [www.houseplanshelper.com](http://www.houseplanshelper.com).
- <http://energyplus.helpserve.com/Knowledgebase/List/Index/47>. (n.d.).
- <https://energyplus.net/weather>. (n.d.).
- Hu, J., & Olbina, S. (2011). Illuminance-based slat angle selection model for automated control of split blinds. *Building and Environment*, 46(3), 786–796. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.013>
- IESNA. (2000). *The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application* (9th ed.). Illuminating Engineering Society of North America.
- Jennings, J. D., Rubinstein, F. M., DiBartolomeo, D., & Blanc, S. L. (2000). Comparison of Control Options in Private Offices in an Advanced Lighting Controls Testbed. *Illuminating Engineering Society*, 29(2), 39–60.
- Johnson, T. (2015, September 7). What are survey-accurate visual simulations? [www.buildmedia.com](http://www.buildmedia.com).
- Kaida, K., Takahashi, M., & Otsuka, Y. (2006). A Short Nap and Natural Bright Light Exposure Improve Positive Mood Status. *Industrial Health* 2007, 45, 301–308.
- Kelly, K., & O'Connell, K. (1997). *Interior Lighting Design - A Student's Guide*. Chartered Institution of Building Services Engineers.
- Kim, J.-H., Park, Y.-J., Yeo, M.-S., & Kim, K.-W. (2009a). An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer. *Building and Environment*, 44(7), 1517–1527. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.006>
- Kim, J.-H., Park, Y.-J., Yeo, M.-S., & Kim, K.-W. (2009b). An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer. *The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007), Sendai, Japan, 28-31 October, 2007*, 44(7), 1517–1527. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.08.006>
- Konis, K., & Lee, E. S. (2015). Measured daylighting potential of a static optical louver system under real sun and sky conditions. *Building and Environment*, 92, 347–359. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.024>
- Kosuke, K., Masaya, T., Takashi, H., Yasumasa, O., & Kenji, F. (2006). Indoor Exposure to Natural Bright Light Prevents Afternoon Sleepiness. *SLEEP*, 29(4).
- Krarti, M., Erickson, P. M., & Hillman, T. C. (2005). A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. *Building and Environment*, 40(6), 747–754. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.007>
- Lee, E. S., & Selkowitz, S. E. (1994). The design and evaluation of integrated envelope and lighting control strategies for commercial buildings. Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10107748>
- Lee, E. S., Selkowitz, S. E., DiBartolomeo, D. L., Klems, J. H., Clear, R. D., Konis, K. S., ... Konstantoglou, M. (2009). High Performance Building Facade Solutions: PIER Final Project Report.
- Lindelöf, D. (2007, November 15). *Bayesian optimization of visual confort*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- Manav, B. (2007). An experimental study on the appraisal of the visual environment at offices in relation to colour temperature and illuminance. *Building and Environment*, 42(2), 979–983. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.022>
- Manzan, M. (2014). Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy and Buildings*, 72, 431–440. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.007>
- Mardaljevic, J. (2006). Examples of Climate-Based Daylight Modelling. Presented at the CIBSE National Conference 2006: Engineering the Future, London, UK.
- Mardaljevic, J., Andersen, M., Roy, N., & Christoffersen, J. (2012). Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability? Presented at the First Building Simulation and Optimization Conference, Loughborough, UK.
- Mardaljevic, J., & Nabil, A. (2005). Useful daylight illuminance: A new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*.
- Ministério da Educação. (1996). Decreto-Lei n.o 17/96. Diário da República —I Série-A.
- Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. (2006, February 6). Decreto Lei 40/90. Diário da República - 1.ª Série, N.º 31, de 06.02.1990, Pág. 490.
- Moeseke, G. van, Bruyère, I., & Herde, A. D. (2007). Impact of control rules on the efficiency of shading devices and free cooling for office buildings. *Building and Environment*, 42(2), 784–793. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.015>
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905–913. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.013>
- National House Building Council. (2008). Lighting for buildings – Part 2: Code of practice for daylighting. British Standard.
- Nazzal, A. A. (2001). A new daylight glare evaluation method: Introduction of the monitoring protocol and calculation method. *Energy and Buildings*, 33(3), 257–265. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00090-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00090-6)
- Nazzal, A. A. (2005). A new evaluation method for daylight discomfort glare. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4), 295–306. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2004.08.010>
- Newsham, G. R. (1994). Manual control of window blinds and electric lighting: implications for comfort and energy consumption. *Indoor Environment*, 3(3), 135–144.
- Newsham, G. R., & Veitch, J. A. (2000). A New method of deriving illuminance recommendations for VDT offices (pp. 211–217). Presented at the IESNA Conference Proceedings.
- OCDE, & IEA. (2015). World Energy Outlook 2015. IEA Publications.
- Oh, M. H., Lee, K. H., & Yoon, J. H. (2012). Automated control strategies of inside slat-type blind considering visual comfort and building energy performance. *Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World*, 55(0), 728–737. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.019>
- Oh, M. H., Lee, K. H., & Yoon, J. H. (2013). Automated slat angle control of venetian blind considering energy and visual confort. Presented at the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France.
- Olbina, S., & Hu, J. (2012). Daylighting and thermal performance of automated split-controlled blinds. *Building and Environment*, 56(0), 127–138. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.002>
- Osterhaus, W. K. E. (2005). Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *CISBAT '03: Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems*, 79(2), 140–158. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.11.011>
- Osterhaus, W. K. E., & Bailey, I. L. (1992). Large Area Glare Sources and Their Effect on Discomfort and Visual Performance at Computer Workstations. In *1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*.
- Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. (2010, June 18). Diretiva 2010/31/UE. Jornal Oficial da União Europeia.
- Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. (2012, October 25). Diretiva 2012/27/UE. Jornal Oficial da União Europeia.

- Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia. (2014, July 23). Communication from the commission to the european parliament and the council.
- World Energy Council. (2013). *World Energy Scenarios - Composing energy futures to 2050*. Switzerland.
- Pauley, S. M. (2004). Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that lighting has become a public health issue. *Medical Hypotheses*, 63(4), 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2004.03.020>
- Pfrommer, P., Lomas, K. J., & Kupke, C. (1996). Solar radiation transport through slat-type blinds: A new model and its application for thermal simulation of buildings. *Solar Energy*, 57(2), 77–91. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00063-1](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00063-1)
- Pigg, S., Eilers, M., & Reed, J. (1996). Behavioral Aspects of Lighting and Occupancy Sensors in Private Offices: A Case Study of a University Office Building (Vol. 8, pp. 161–170). Presented at the 1996 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings.
- Portaria n.º 349-B/2013. (2013, November 29). Diário da República, 1.ª série — N.º 232.
- Portaria n.º 349-D/2013. (2013, December 2). Diário da República, 1.ª série — N.º 233.
- Ramos, G., & Ghisi, E. (2010). Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1948–1958. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.040>
- Rea, M. S. (1984). Window blind occlusion: a pilot study. *Building and Environment*, 19(2), 133–137. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(84\)90038-6](https://doi.org/10.1016/0360-1323(84)90038-6)
- Reinhart, C. F. (2004). Lightswitch-2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds. *Solar Energy*, 77(1), 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.003>
- Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *LEUKOS*, 3(1), 7–31.
- Reinhart, C. F., & Weissman, D. A. (2012). The daylit area – Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics. *Building and Environment*, 50, 155–164. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.024>
- Reinhart, & Voss, K. (2003). Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *International Journal Lighting Research & Technology*, 243–260.
- Rubin, A. I., Collins, B. L., & Tibbott, R. L. (1978, May). Window Blinds as a Potential Energy Saver-A Case Study. U.S. Department of Commerce.
- Ruck, N., Aschehoug, Ø., Aydinli, S., Christoffersen, J., Courret, G., Edmonds, I., ... Selkowitz, S. E. (2001). *Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components*. International Energy Agency. Retrieved from <http://gaia.lbl.gov/iea21/>
- Santos, A. J. C. dos. (2011, September). *Desenvolvimento de um método para a caracterização dinâmica da iluminação natural nos edifícios aplicável a climas mediterrânicos*. Universidade de Lisboa.
- Saunders, J. E. (1969). The role of the level and diversity of horizontal illumination in an appraisal of a simple office task, 1(1), 37–46.
- Shen, H., & Tzempelikos, A. (2012). Daylighting and energy analysis of private offices with automated interior roller shades. *Solar Energy*, 86(2), 681–704. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.11.016>
- Shen, H., & Tzempelikos, A. (2013). Sensitivity analysis on daylighting and energy performance of perimeter offices with automated shading. *Building and Environment*, 59, 303–314. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.028>
- Shin, J. Y., Yun, G. Y., & Kim, J. T. (2012). View types and luminance effects on discomfort glare assessment from windows. *Energy and Buildings*, 46, 139–145. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.036>
- Slater, A. I., & Boyce, P. R. (1990). Illuminance uniformity on desks: Where is the limit? *Lighting Research and Technology*, 22(4), 165–174.

- Smolders, K. C. H. J., de Kort, Y. A. W., & Cluitmans, P. J. M. (2012). A higher illuminance induces alertness even during office hours: Findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Tufts University Special Section*, *107*(1), 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2012.04.028>
- Suk, J. Y., Schiler, M., & Kensek, K. (2013). Development of new daylight glare analysis methodology using absolute glare factor and relative glare factor. *Energy and Buildings*, *64*, 113–122. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.020>
- Sutter, Y., Dumortier, D., & Fontoynt, M. (2006). The use of shading systems in VDU task offices: A pilot study. *Special Issue on Daylighting Buildings*, *38*(7), 780–789. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.010>
- Technical Committee CEN/TC 169. (2002). EN 12464-1. CEN.
- Tzempelikos, A., & Athienitis, A. K. (2007). The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, *81*(3), 369–382. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.015>
- Tzempelikos, A., & Shen, H. (2013). Comparative control strategies for roller shades with respect to daylighting and energy performance. *Building and Environment*, *67*, 179–192. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.016>
- U.S. Green Building Council. (2013). LEED v4 for building design and construction. U.S. Green Building Council.
- van Bommel, W. J. M. (2006). Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. *Special Issue: Meeting Diversity in Ergonomics*, *37*(4), 461–466. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.04.009>
- Vartiainen, E. (2001). Electricity benefits of daylighting and photovoltaics for various solar facade layouts in office buildings. *Energy and Buildings*, *33*(2), 113–120. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00073-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00073-6)
- Velds, M. (2000). *Assessment of lighting quality in office rooms with daylighting systems*. Delft University of Technology.
- Vine, E., Lee, E., Clear, R., DiBartolomeo, D., & Selkowitz, S. (1998). Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system: a pilot study. *Energy and Buildings*, *28*(2), 205–218. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00023-1](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00023-1)
- Wagdy, A., & Fathy, F. (2015). A parametric approach for achieving optimum daylighting performance through solar screens in desert climates. *Journal of Building Engineering*, *3*, 155–170. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.07.007>
- WAREMA. (2015, February). WAREMA EVBs (Integrated in Built in Housing).
- Wienold, J. (2007). Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis. In *Building Simulation* (pp. 1197–1204).
- Wienold, J., & Christoffersen, J. (2005). Towards a new daylight glare rating. *Lux Europa, Berlin*, 157–161.
- Wienold, J., & Christoffersen, J. (2006). Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Special Issue on Daylighting Buildings*, *38*(7), 743–757. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.017>
- Winterbottom, M., & Wilkins, A. (2009). Lighting and discomfort in the classroom. *Journal of Environmental Psychology*, *29*(1), 63–75. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2008.11.007>
- Wittkopf, S. K., Yuniarti, E., & Soon, L. K. (2006). Prediction of energy savings with anidolic integrated ceiling across different daylight climates. *Energy and Buildings*, *38*(9), 1120–1129. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.01.005>
- Wymelenberg, K. V. D., & Inanici, M. (2009). A Study of Luminance Distribution Patterns and Occupant Preference in Daylit Offices. Presented at the 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada.
- Yahoda, D. S., & Wright, J. L. (2004). Methods for Calculating the Effective Longwave Radiative Properties of a Venetian Blind Layer. *ASHRAE Transactions*, *110*(1), 463–473.



- Yao, J. (2014). An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements. *Building and Environment*, 71(0), 24–32.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.011>
- Zelenay, K. (2011, September 1). *Impact of Fixed Exterior Shading on Daylighting: A Case Study of the David Brower Center*. University of California, Berkeley.
- Zhang, Y., & Barrett, P. (2012). Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building. *Building and Environment*, 54(0), 137–147.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.016>



## Anexo A – Programa do EMS para o cálculo de métricas de conforto visual e medidas de desempenho

Como descrito em 3.4.1 as medidas de desempenho das simulações foram calculadas através de programas personalizados definidos no EMS. Para o efeito foram criados dois programas, um programa para calcular as métricas de conforto visual e os consumos energéticos (Figura 31) e outro programa para inicializar as variáveis dessas mesmas medidas de desempenho e definir o tipo de horário (Figura 32).

```
EnergyManagementSystem:Program,      !programa para calcular os consumos
energéticos(HVAC, iluminação) e 2 métricas de conforto (UDI, DGI%<22)
  calcular_total,      !nome do programa
  set cooling_kwh = cooling_kwh + cooling/(1000*14.06*6*3),      !calcular as
necessidades de arrefecimento em kwh/m2
  set heating_kwh = heating_kwh + heating/(1000*14.06*6*3.4),      !calcular
as necessidades de aquecimento em kwh/m2
  set lights_kwh = lights_kwh + lights/(1000*14.06*3600),      !calcular o
consumo da luz elétrica
  if DayOfWeek <> 1 && DayOfWeek <> 7,      !quando não for fim de semana
  if Hour >= hora_inicio && (Hour < hora_fim || (Hour == hora_fim &&
Minute < 1)),      !quando a hora for no horário de trabalho
  set N = N +1,      !contar o numero de passos da simulação no horário de
trabalho
  Set shade_status1=7,      !Fechar os estores
  Set shade_status2=7,
  if ill < 100,      !contar o numero de vezes que a iluminância na
superfície de trabalho esta em cada intervalo de calculo do UDI
  set u1 = u1 + 1,
  elseif ill >= 100 && ill < 500,
  set u2 = u2 + 1,
  set u23 = u23 + 1,
  elseif ill >= 500 && ill <= 2000,
  set u3 = u3 + 1,
  set u23 = u23 + 1,
  elseif ill > 2000,
  set u4 = u4 + 1,
  endif,
  if dgi < 22,      !contar o numero de vezes que o DGI esta abaixo de 22
  set dgi_per = dgi_per + 1,
  endif,
  else,      !no caso de estar numa hora fora do horário de trabalho manter
estores fechados no verão e abrir no inverno
  if Month == 12 || Month == 1 || Month == 2 || Month == 3,
  Set shade_status1=0,
  Set shade_status2=0,
  elseif Month == 6 || Month == 7 || Month == 8 || Month == 9,
  Set shade_status1=7,
  Set shade_status2=7,
  endif,
  endif,
  endif,
  set UDI1 = 100*u1/N,      !calcular vários valores para UDI
  set UDI2 = 100*u2/N,
  set UDI3 = 100*u3/N,
  set UDI4 = 100*u4/N,
  set UDI23 = 100*u23/N,
  set DGIndex_per = 100*dgi_per/N;      !calcular a percentagem de tempo que
o DGI esta abaixo dos 22%
```

Figura 31 – Programa do SEM para calcular métricas de conforto e consumos energéticos

A parte do código a verde foi utilizada na estratégia 8 de modo a que fora do horário de trabalho os estores se abrissem ou fechassem consoante fosse termicamente favorável. No inverno abrem-se aumentando os ganhos solares e no verão fecham de modo a diminuir os ganhos solares.

A necessidade de existir um programa de inicialização prende-se com o método de cálculo das medidas de desempenho. O programa de cálculo das medidas de desempenho (Figura 32) é executado no *calling point* *BeginTimestepBeforePredictor* que é um dos *Timestep calling points* (Figura 13). Executar o programa neste *calling point* permite fazer os cálculos em cada iteração do programa, mas este *calling point* é executado em várias fases da simulação, pelo que os cálculos para as medidas de desempenho são efetuadas em fases do programa que não interessam. Como consequência os valores das medidas de desempenho têm valores acima de zero quando a fase da simulação que interessa (a seguir da fase de “aquecimento”) tem início. Para resolver este problema inicializam-se as variáveis que representam as medidas de desempenho noutra programa (Figura 32) que corre no *calling point* *AfterNewEnvironmentWarmUpsComplete*. Além disto este programa define também se na simulação vai ser utilizado o horário de inverno ou de verão conforme descrito em 3.3.3, esta definição foi feita neste programa apenas por ser mais eficiente definir o tipo de horário num programa que só corre uma vez no processo completo da simulação.

```
EnergyManagementSystem:Program,      !programa para inicializar várias
variáveis necessárias para o calculo dos consumos energéticos e de 2
métricas de conforto visual
    inicializar, !nome do programa
    set cooling_kwh = 0, !estas variáveis foram inicializadas de modo a
que comecem a ser calculadas apenas apos o período de "aquecimento" da
simulação
    set heating_kwh = 0,
    set lights_kwh = 0,
    set N = 0,
    set UDI1 = 0,
    set UDI2 = 0,
    set UDI3 = 0,
    set UDI4 = 0,
    set UDI23 = 0,
    set u1 = 0,
    set u2 = 0,
    set u3 = 0,
    set u4 = 0,
    set u23 = 0,
    set DGindex_per = 0,
    set dgi_per = 0,
    if Month == 6,      !definir as horas de inicio e fim do horário de
trabalho conforme o período de simulação (verão ou inverno)
    set hora_inicio = 7,
    set hora_fim = 18,
    elseif Month ==12,
    set hora_inicio = 8,
    set hora_fim = 19,
    endif;
```

**Figura 32 – Programa do EMS para inicializar medidas de desempenho e definir mudança de horário**

## Anexo B – Programa em VBA para o cálculo das métricas de uniformidade de iluminação natural na superfície de trabalho

Como descrito em 3.4.1 as métricas de uniformidade de iluminância na superfície de trabalho ( $U_{\min}/U_{\max}$  e  $U_{\min}/U_{\text{méd}}$ ) foram calculadas através de um programa em VBA. Além disto foi utilizada uma versão modificada desse programa para definir a distância horizontal desejada entre a parede exterior (janela) e o tampo na mesa (ver Anexo E).

Este programa é executado sobre um ficheiro de Excel que contem uma grelha de valores de iluminância correspondente à superfície de trabalho para cada iteração do EP no horário de trabalho. Para cada grelha (cada iteração) são identificadas as iluminâncias máxima, mínima e média e calculadas as métricas de uniformidade de iluminância  $U_{\min}/U_{\max}$  e  $U_{\min}/U_{\text{méd}}$ . Durante este processo são contadas o número de vezes que estas métricas estão acima dos valores de referência (ver 3.2.2). Após este cálculo ter sido feito para todas as iterações calculam-se os valores totais das percentagens de tempo no qual as métricas estavam acima dos valores de referência.

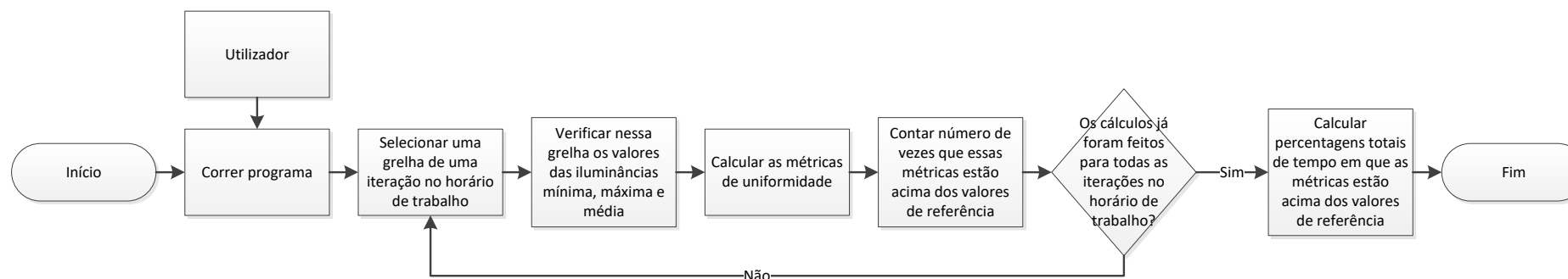


Figura 33 - Esquema de funcionamento do programa VBA para o cálculo das métricas uniformidade

## Anexo C – Programas para a implementação da estratégia 5 consoante as diferentes orientações da fachada

Como descrito em 3.4.2 a estratégia 5 foi implementada através de programas personalizados definidos no EMS. Em baixo encontram-se os programas para a implementação desta estratégia para as orientações Este (Figura 34), Oeste (Figura 36) e Sul (Figura 35).

Para cada orientação foram criados dois programas, um para implementar a estratégia referida (*Set\_Shade\_Control\_State*) e outro para inicializar algumas das variáveis utilizadas no primeiro programa (Inicializar1). Os princípios de funcionamento da estratégia de controlo estão explicados em 3.2.1 e aplicados no programa de nome *Set\_Shade\_Control\_State*. O programa de nome Inicializar1 tem como objetivo inicializar dois variáveis, uma delas representa o número de horas de exposição solar que apesar de ser atualizado diariamente nas iterações do programa é inicializado com o valor de oito horas apenas por simplicidade como valor inicial.

```
EnergyManagementSystem:Program,    !programa da estratégia de controlo 5
(Este)
    Set_Shade_Control_State,    !nome do programa
    If SunIsUp && A == 0,    !quando o sol nasce
        Set A = 1,
        Set SR = CurrentTime,    !atualizar a hora do nascer do sol (muda ao
longo da simulação)
        Set shade_status1=7,    !fechar os estores
        Set shade_status2=7,
        Elseif SunIsUp == 0 && A == 1,    !quando o sol se põe
            Set SS = CurrentTime,    !atualizar a hora do por do sol (muda ao longo
da simulação)
            Set A = 0,
            Set dT = SS-SR,    !atualizar o numero de horas de luz solar
            Elseif CurrentTime >= SR+0.6*dT && A == 1,    !quando já passou 60% do
tempo de luz solar nesse dia a partir do nascer do sol
                Set shade_status1=0,    !abrir os estores
                Set shade_status2=0,
            Endif;

EnergyManagementSystem:Program,    !programa para inicializar variáveis
Inicializar1,    !nome do programa
    Set A = 0,    !esta variável tem o valor de 1 se o sol já nasceu e 0 se
já se pôs
    Set dT = 8;    !esta variável representa o numero de horas de luz solar
```

**Figura 34 – Programas do EMS para a implementação da estratégia 5 para a orientação Este**

```

EnergyManagementSystem:Program, !programa da estratégia de controlo 5
(Oeste)
  Set_Shade_Control_State, !nome do programa
  If SunIsUp && A == 0, !quando o sol nasce
  Set A = 1,
  Set SR = CurrentTime, !atualizar a hora do nascer do sol (muda ao
longo da simulação)
  Elseif SunIsUp == 0 && A == 1, !quando o sol se põe
  Set shade_status1=0, !abrir os estores
  Set shade_status2=0,
  Set SS = CurrentTime, !atualizar a hora do por do sol (muda ao longo
da simulação)
  Set A = 0,
  Set dT = SS-SR, !atualizar o numero de horas de luz solar
  Elseif CurrentTime >= SS-0.6*dT && A == 1, !quando já passou 40% do
tempo de luz solar nesse dia a partir do nascer do sol
  Set shade_status1=7, !fechar os estores
  Set shade_status2=7,
  Endif;

```

```

EnergyManagementSystem:Program, !programa para inicializar variáveis
Inicializar1, !nome do programa
  Set A = 0, !esta variável tem o valor de 1 se o sol já nasceu e 0 se
já se pôs
  Set dT = 8; !esta variável representa o numero de horas de luz solar

```

**Figura 36 – Programas do EMS para a implementação da estratégia 5 para a orientação Oeste**

```

EnergyManagementSystem:Program, !programa da estratégia de controlo 5
(Sul)
  Set_Shade_Control_State, !nome do programa
  If SunIsUp && A == 0, !quando o sol nasce
  Set A = 1,
  Set SR = CurrentTime, !atualizar a hora do nascer do sol (muda ao
longo da simulação)
  Set shade_status1=0, !abrir os estores
  Set shade_status2=0,
  Elseif SunIsUp == 0 && A == 1, !quando o sol se põe
  Set SS = CurrentTime, !atualizar a hora do por do sol (muda ao longo
da simulação)
  Set A = 0,
  Set dT = SS-SR, !atualizar o numero de horas de luz solar
  Elseif CurrentTime >= SS-0.2*dT && A == 1, !quando já passou 80% do
tempo de luz solar nesse dia a partir do nascer do sol
  Set shade_status1=0, !abrir os estores
  Set shade_status2=0,
  Elseif CurrentTime >= SR+0.2*dT && A == 1, !quando já passou 20% do
tempo de luz solar nesse dia a partir do nascer do sol
  Set shade_status1=7, !fechar os estores
  Set shade_status2=7,
  Endif;

```

```

EnergyManagementSystem:Program, !programa para inicializar variáveis
Inicializar1, !nome do programa
  Set A = 0, !esta variável tem o valor de 1 se o sol já nasceu e 0 se
já se pôs
  Set dT = 8; !esta variável representa o numero de horas de luz solar

```

**Figura 35 - Programas do EMS para a implementação da estratégia 5 para a orientação Sul**

## Anexo D – Metodologia de simulação e respetivos programas

As estratégias de controlo neste trabalho foram simuladas de diferentes modos. A maioria das simulações foram feitas no EP mas algumas simulações necessitaram de recorrer a co-simulação do EP com o Matlab através do MLE+. No Figura 37 está um esquema simples dos passos necessários à obtenção da informação dos *outputs* das diferentes simulações.

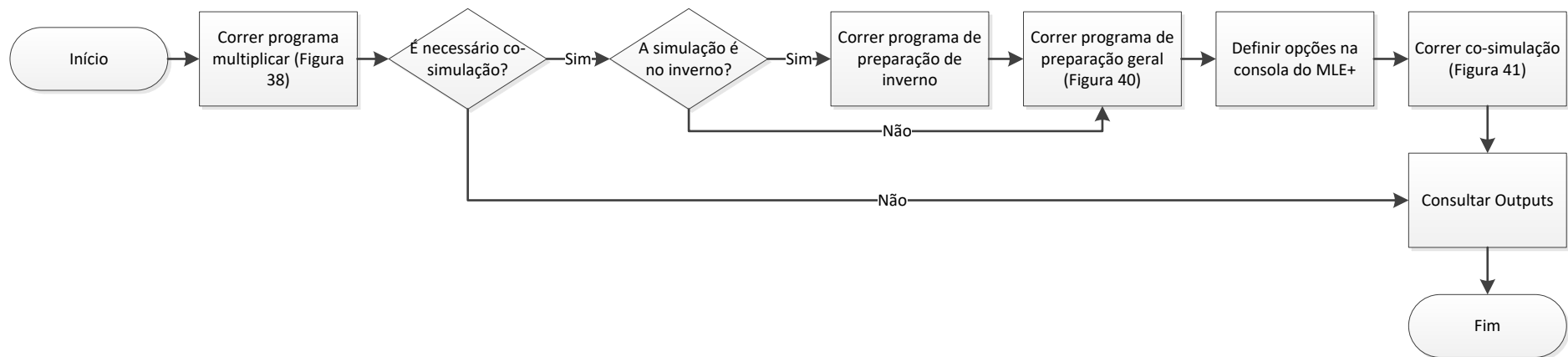


Figura 37 – Esquema geral do processo de simulação das estratégias de controlo



Devido ao volume de simulações realizadas optou-se por automatizar quando possível a criação e simulação de ficheiros do EP para diferentes condições ambientais e diferentes estratégias de controlo de estores. A criação automática de ficheiros prontos a simular é particularmente relevante no caso de ser necessário modificar algum detalhe no modelo sendo que nesse caso é apenas necessário modificar o ficheiro original e este programa pode criar os restantes ficheiros já modificados, além disso como dito anteriormente pelo volume de simulações realizadas a produção manual desses ficheiros seria um processo moroso. Sendo a simulação automática o tempo gasto nesse processo também se torna mais reduzido apesar da simulação automática não ser possível nas estratégias E10 e E11, estratégias que precisam de recorrer ao MLE+ e em que são necessários mais passos para fazer a simulação.

Este programa, de nome multiplicar (ver Figura 38), copia e cria vários tipos de ficheiro para cada combinação de estratégias de controlo e condições ambientais de simulação como descrito em 3.4.2. O processo é feito para diretorias diferentes, cada simulação tem na sua pasta um ficheiro idf e um ficheiro bat. Para as estratégias que recorrem a co-simulação através do MLE+ (estratégias E10 e E11) além dos dois ficheiros referidos anteriormente existem mais dois/três ficheiros na pasta: o ficheiro de controlo; o ficheiro de preparação geral; o ficheiro de preparação de inverno.

Os ficheiros originais devem estar localizados na mesma diretoria que o ficheiro do programa em questão. Para o correto funcionamento do programa são necessários cinco ficheiros na mesma diretoria do programa: o ficheiro idf do modelo a simular; o ficheiro bat para executar EP; o ficheiro de controlo para co-simulações através do MLE+; o ficheiro de preparação geral para permitir as co-simulações através do MLE+; o ficheiro de preparação para casos em que a co-simulação através do MLE+ acontece no inverno. Além disto é necessário o *weather file* para correr as simulações do EP, neste programa o ficheiro epw não é copiado serve apenas para executar as simulações.

O ficheiro de controlo referido anteriormente está preparado para a estratégia 11, mas como este ficheiro é também é necessário para a estratégia 10 existe o ficheiro de texto cujos conteúdos substituem parte do ficheiro de controlo de modo a que este possa ser utilizado na estratégia 10.

O ficheiro bat pode ser encontrado na diretoria do executável do EP, porém neste caso copiou-se esse ficheiro para a diretoria do programa com o objetivo de criar uma cópia modificada para cada simulação. Isto foi feito para que em cada simulação se pudesse modificar o caminho dos outputs da simulação do EP para uma pasta chamada Outputs na mesma diretoria que o ficheiro idf e o ficheiro bat.

Apesar do processo estar na sua maioria automatizado o utilizador precisa de definir alguns parâmetros no programa introduzindo no próprio código o conteúdo de algumas variáveis. O programa pode copiar e criar ficheiros sem os simular, isto é possível através da definição da variável simular. Além disto o valor do ângulo mínimo das lamelas permitido pelo EP também precisa de estar definido. Por fim o ficheiro de idf original, o *weather file* (ver 3.3) e o ficheiro bat original devem ter os seus nomes definidos no código para que o programa os reconheça.

Para a estratégia 5 existem três ficheiros de texto auxiliares (um para a orientação Este, outro para a orientação Oeste e outro para a orientação Sul) na mesma diretoria do programa, e nestes ficheiros estão definidos objetos do EMS (ver Anexo C) que são acrescentados ao ficheiro idf original de modo a permitir a execução estratégia de controlo em questão. Para estratégias que recorram a co-simulação através do MLE+ (ver 3.4.2) existe um ficheiro de texto na mesma diretoria do programa com objetos definidos que são acrescentados ao ficheiro original de modo a que o ficheiro criado para essas simulações esteja preparado para executar co-simulações. Para a estratégia 8 (ver 3.4.2) que controla o ângulo das lamelas, existe um ficheiro de texto na mesma diretoria do programa com objetos do EMS que são acrescentados ao ficheiro original e que permite que fora do horário de trabalho os estores abram ou fechem conforme seja desejável do ponto de vista térmico (ver Anexo A).

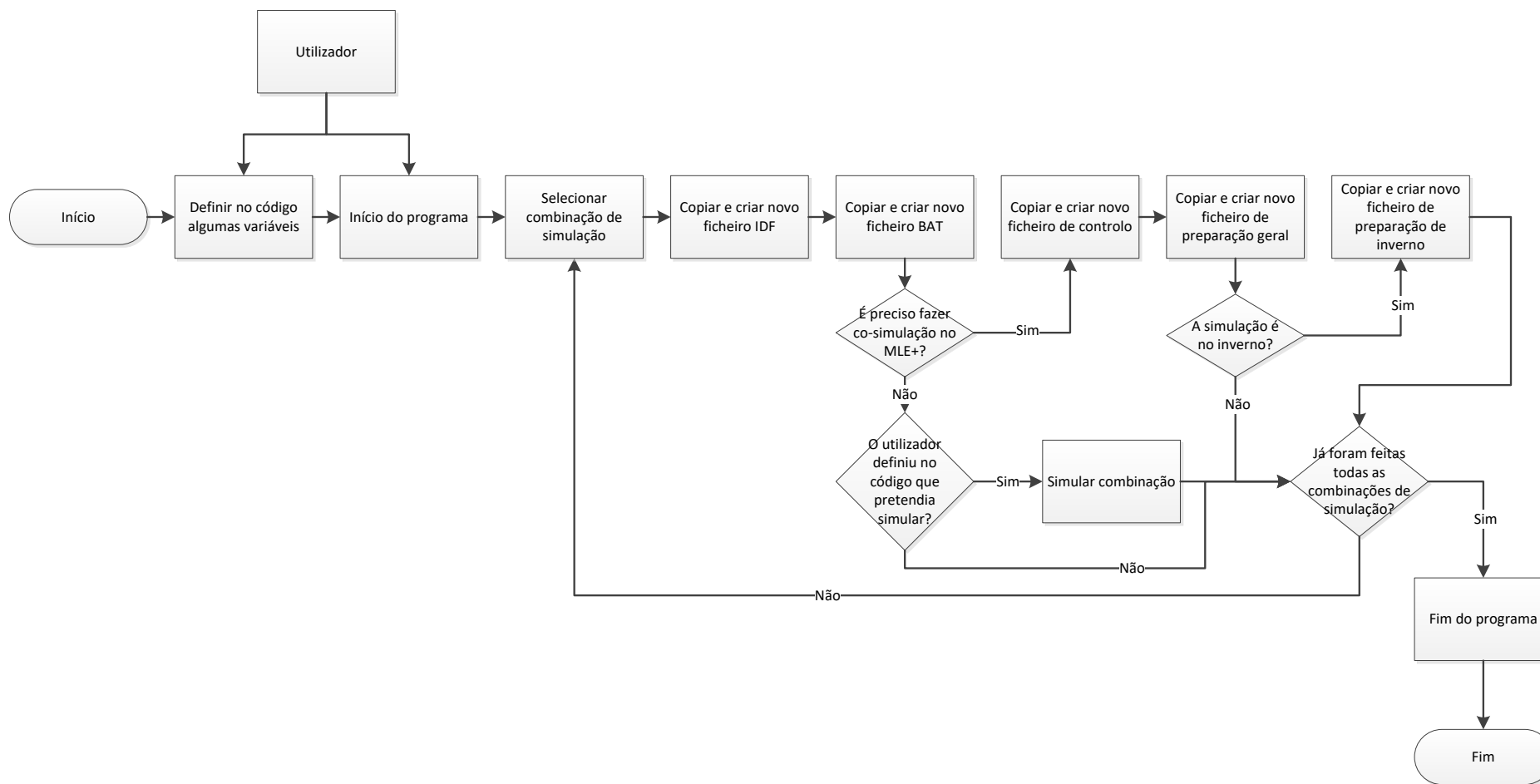
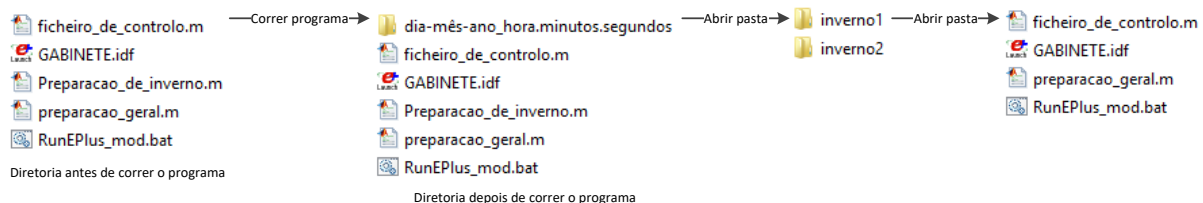


Figura 38 – Esquema de funcionamento do programa multiplicar

O programa preparação de inverno é apenas utilizado nos casos em que as simulações são feitas no período de inverno. O período de inverno começa a 21 de dezembro acaba a 21 de março portanto a simulação começa no 12º mês e acaba no 3º mês do ano, mas o MLE+ não permite simulações em que o número do mês do início da simulação é maior que o número do mês do fim da simulação. Para resolver este problema criou-se um programa para separar o ficheiro idf e criar dois ficheiros diferentes, cada um para uma pasta diferente, sendo que um tinha período de simulação definido entre dia 21 de dezembro até 31 de dezembro e o outro ficheiro tinha definido o período de simulação entre um de janeiro e 21 de março. Deste modo é possível correr a co-simulação e depois compatibilizar os resultados dos dois ficheiros de modo a ter os resultados equivalentes da simulação no período de inverno. De modo semelhante, os restantes ficheiros na mesma diretoria que o ficheiro idf (ficheiro de preparação geral, ficheiro de controlo, ficheiro bat) são copiados para duas pastas diferentes onde os ficheiros de idf separados são colocados (ver Figura 39).

Neste programa é necessário que o utilizador introduzir no código o nome do ficheiro bat, o nome do ficheiro idf e o nome do ficheiro de controlo.



**Figura 39 – Imagens de alterações da diretoria devido ao programa preparação de inverno**

O programa preparação geral realiza simulações de modo a recolher informação necessária ao controlo de estores das estratégias E10 e E11 por co-simulações através do MLE+ (ver Figura 41). O programa copia e cria ficheiros idf de modo a que haja um ficheiro idf para cada ângulo entre o ângulo mínimo das lamelas e 90° em intervalos definidos pelo utilizador (variável de nome intervalo\_ângulo, e.g. de 5° em 5°). Estes ficheiros são depois simulados e têm como output apenas a variável de interesse cujo valor será utilizado no MLE+, esses valores são automaticamente guardados numa matriz que será utilizada no programa do ficheiro de controlo durante a co-simulação (matriz é uma variável de nome matriz\_dados).

Neste programa o utilizador tem de introduzir no código o nome do ficheiro bat, o nome do ficheiro idf e o nome do *weather file*. Além disto tem de introduzir o valor do ângulo mínimo permitido nas lamelas pelo EP, o valor da variável intervalo\_ângulo e o nome da variável de output de interesse.

As variáveis intervalo\_ângulo e matriz\_dados são variáveis globais para que possam ser utilizadas no programa do ficheiro de controlo durante a co-simulação.

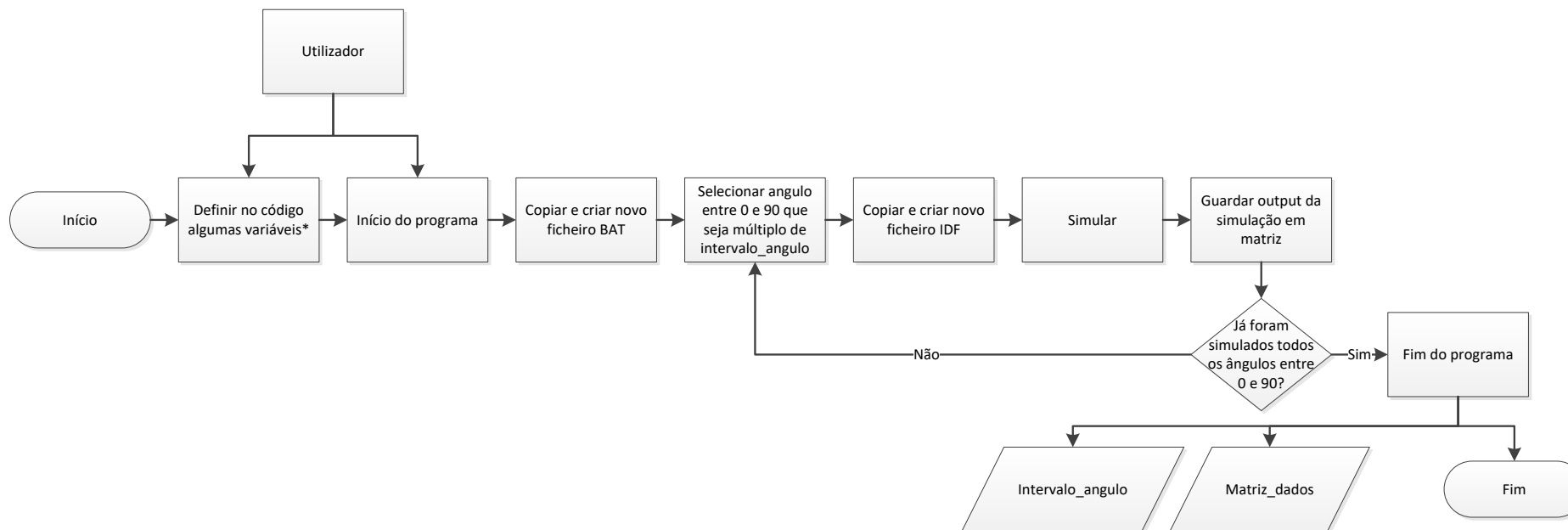


Figura 40 – Esquema de funcionamento do programa preparação geral

Depois de inserir as definições na consola do MLE+ corre-se a co-simulação. Durante este processo o controlo dos estores é feito através do programa no ficheiro de controlo. O programa do ficheiro de controlo é uma função criada pelo MLE+ com o intuito de personalizar o controlo dos estores. O ficheiro de controlo é criado ou carregado quando se configuram as definições do MLE+.

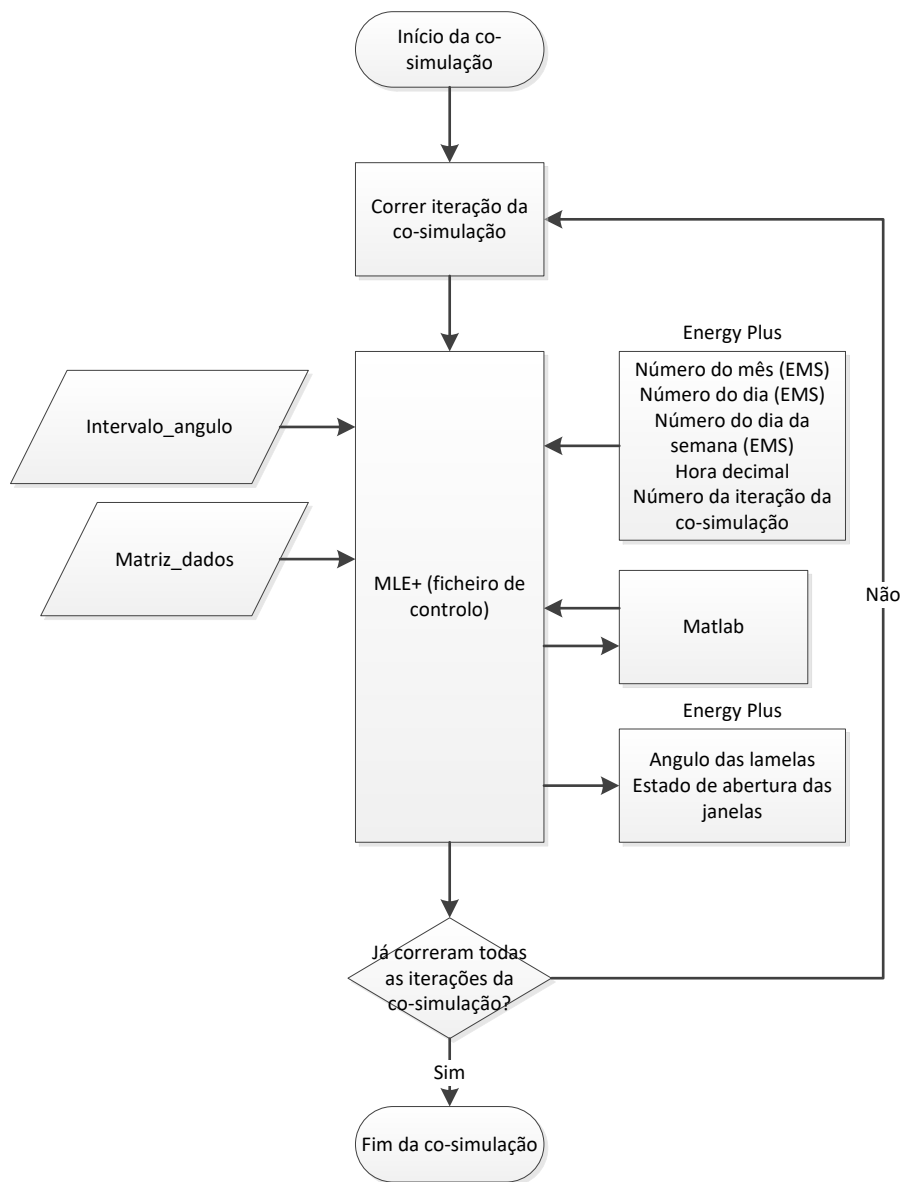
Neste programa e para este caso são utilizadas duas variáveis criadas no programa de preparação geral: *intervalo\_ângulo* e *matriz\_dados*. Além disso a função recebe várias variáveis do EP em cada iteração. Podem definir-se variáveis do EP a receber pelo MLE+ na sua consola. Para este caso definiram-se três variáveis a receber do EP: dia, mês e dia da semana. Estas variáveis foram definidas no EMS por não serem variáveis de *output* normalmente disponíveis. Além destas variáveis a função recebe automaticamente outras duas variáveis do EP: a variável *time*, que representa as horas desde início da co-simulação (em formato decimal) da iteração em questão, e a variável *stepNumber*, que representa o número da iteração em questão.

Para comunicar com o EP a função também envia valores de variáveis para o EP, estas também têm de ser definidas na consola do MLE+. Para este caso as variáveis enviadas para o EP foram o ângulo das lamelas e o estado de aberturas dos estores das duas janelas (completamente aberto ou completamente fechado).

Com as variáveis recebidas do EP é possível sincronizar a data e hora da co-simulação com as informações na variável *matriz\_dados*, isto é, saber que linha da matriz tem a informação da iteração da co-simulação em questão. O valor do *intervalo\_ângulo* é utilizado para auxiliar o cálculo do ângulo da lamela a atribuir, pois cada coluna da matriz corresponde a valores de um determinado ângulo (ou posição no caso dos estores totalmente abertos). Esta função é também utilizada para definir a estratégia de controlo dos estores (ver Figura 41) e é diferente consoante seja utilizada para a estratégia 10 ou a estratégia 11.

Para a estratégia 10 para cada iteração da co-simulação no horário de trabalho é selecionado o valor do DGI na *matriz\_dados* que for o mais alto abaixo dos 22, de seguida é identificado o ângulo correspondente (ou se os estores estão completamente abertos para esse valor) e colocam-se as lamelas neste ângulo (ou abrem-se totalmente os estores). Fora do horário de trabalho o ângulo atribuído às lamelas é o ângulo mínimo possível no verão e no inverno os estores são completamente abertos.

Para a estratégia 11 para cada iteração da co-simulação no horário de trabalho é selecionado o valor da iluminância na *matriz\_dados* que for o mais baixo acima dos 500 lux, de seguida é identificado o ângulo correspondente (ou se os estores estão completamente abertos para esse valor) e colocam-se as lamelas neste ângulo (ou abrem-se totalmente os estores). Fora do horário de trabalho o ângulo atribuído às lamelas é o ângulo mínimo possível no verão e no inverno os estores são completamente abertos.

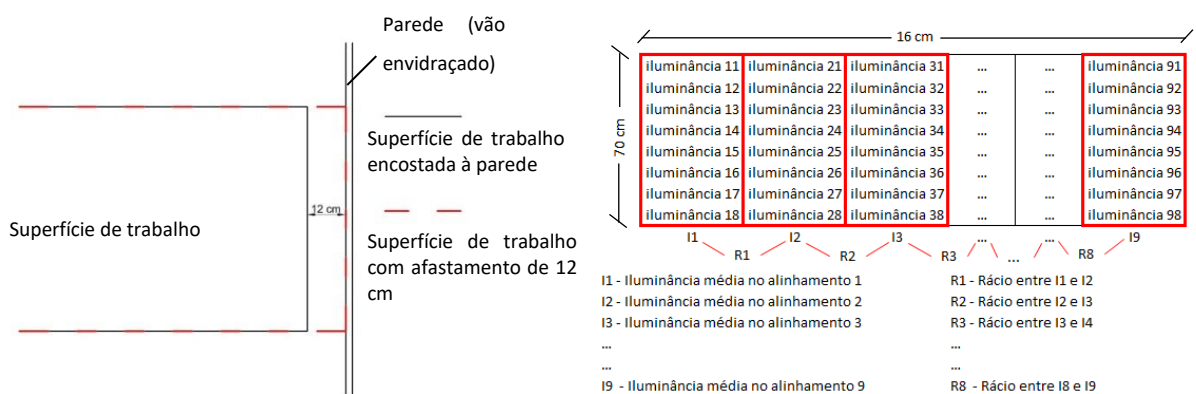


**Figura 41 – Esquema simplificado de funcionamento de co-simulação e interação com variáveis do EP e do programa de preparação geral**

## Anexo E - Ajuste da posição da superfície de trabalho

Inicialmente considerou-se a superfície de trabalho encostada à parede (ver Figura 42 (esquerda)). Com a informação do ficheiro “nome do ficheiro”Map.tab e considerando os estores sempre abertos calcularam-se rácios de iluminância na superfície de trabalho (ver 3.4.1). Definiu-se a superfície de trabalho com 80 cm de altura, 90 cm de largura e 70 cm de profundidade, que correspondem a valores obtidos na medição de uma mesa tipo dos gabinetes no Pavilhão de Civil do IST. Além disto, a altura de 0,8 m é comum em superfícies de trabalho (Athienitis & Tzempelikos, 2002; Hachem et al., 2014; Nabil & Mardaljevic, 2006; Ruck et al., 2001; Shen & Tzempelikos, 2012; Tzempelikos & Shen, 2013) bem como outras alturas da superfície de trabalho semelhantes (Aste et al., 2012; Chaiwiwatworakul & Chirattananon, 2013; Chaiwiwatworakul et al., 2009; E.S. Lee & Selkowitz, 1994; Manzan, 2014).

Verificou-se que, com a superfície de trabalho encostada à parede estes rácios tinham valores muito baixos e após uma análise mais aprofundada concluiu-se que isto se devia a iluminâncias desproporcionalmente baixas perto da parede. Com essas iluminâncias muito baixas o contraste entre iluminâncias é muito alto contribuindo para um valor mais baixo dos rácios de iluminância.



**Figura 42 – Posição da superfície de trabalho em relação à parede exterior (esquerda), diagrama exemplificativo do cálculo de iluminâncias médias e rácios entre estas (direita)**

Para resolver este problema, foi necessário afastar a superfície de trabalho da parede. Para o efeito, foi necessário quantificar essa distância de maneira metódica para as diferentes condições de simulação. Para o efeito, simulou-se o modelo com os estores sempre abertos para diferentes alturas do ano e com diferentes orientações de fachada por serem os fatores que afetam esta distância. Consoante a altura do ano a altura do sol é diferente, no verão o sol está mais alto e no inverno o sol está mais baixo. Para as orientações de fachada consideraram-se apenas Este, Sul e Oeste por serem as mais relevantes no movimento do sol (ver 3.4).

Para quantificar de maneira mais precisa a distância de afastamento desejada utilizou-se uma grelha do objeto da classe *Output:IlluminanceMap* com um espaçamento menor na direção longitudinal da superfície de trabalho, por ser a direção na qual se queria definir a distância, de 2 cm. Com a informação recolhida criou-se um programa em VBA (ver Anexo B) que, além de calcular as métricas de rácios de iluminância, quantificava a distância desejada para as várias condições de simulação, utilizando-se como distância desejada a maior e mais limitante das distâncias calculadas.



O programa calcula a iluminância média de cada grupo de pontos na superfície de trabalho à mesma distância da parede apenas até 16 cm de distância da parede. Seguidamente compara essas iluminâncias médias com outras iluminâncias médias de grupos adjacentes calculando rácios entre a iluminância média máxima e mínima adjacentes (ver Figura 42 (direita), equação (19)).

$$R1 \begin{cases} \frac{I1}{I2}, se I1 > I2 \\ \frac{I2}{I1}, se I2 > I1 \end{cases} \quad (19)$$

Para o rácio maior acima de 2 considerou-se que corresponde à distância desejada nessa hora, pois se em 2 cm a iluminância é em média o dobro ou mais essa zona é indesejada do ponto de vista do conforto visual, a zona onde a maior diferença ocorre deverá ser excluída. Como se pode ver na equação (20) o cálculo da distância de afastamento da superfície de trabalho da parede desejada para a simulação toda é calculada uma distância que corresponde a uma média ponderada das distâncias calculadas para cada passo da simulação com o valor do rácio respetivo, contrastes de iluminância maiores revelam maior desconforto visual, e com a iluminância média maior correspondente ao rácio em questão, o cálculo das métricas de rácios de iluminância é limitado sobretudo pelas iluminâncias mínimas por essa razão deu-se mais importância a iluminâncias maiores.

$$d (cm) = \frac{\sum d_i \times R_i \times I_{i,máx}}{\sum R_i \times I_{i,máx}} \quad (20)$$

$d_i$  – distância do alinhamento com  $R_i$  maior à parede no *timestep*  $i$

$R_i$  – rácio máximo de iluminâncias entre alinhamentos adjacentes

$I_{i,máx}$  – Iluminância máxima no  $R_i$  máximo

Este cálculo foi feito apenas para as horas de ocupação do gabinete e resultou num afastamento da superfície de trabalho da parede mínima de 12 cm. Após os cálculos efetuados para todos os casos arredondaram-se os valores por excesso, apresentados na Tabela 22, e o maior foi selecionado como valor a utilizar em todas as simulações por ser o mais condicionante.

**Tabela 22 – Valor das distâncias arredondadas por defeito.**

Estação do ano	Orientação da fachada	Distância (cm)
Verão	Este	6
	Sul	6
	Oeste	6
Inverno	Este	6
	Sul	12
	Oeste	6

## Anexo F - Gráficos do consumo energético das simulações para Lisboa

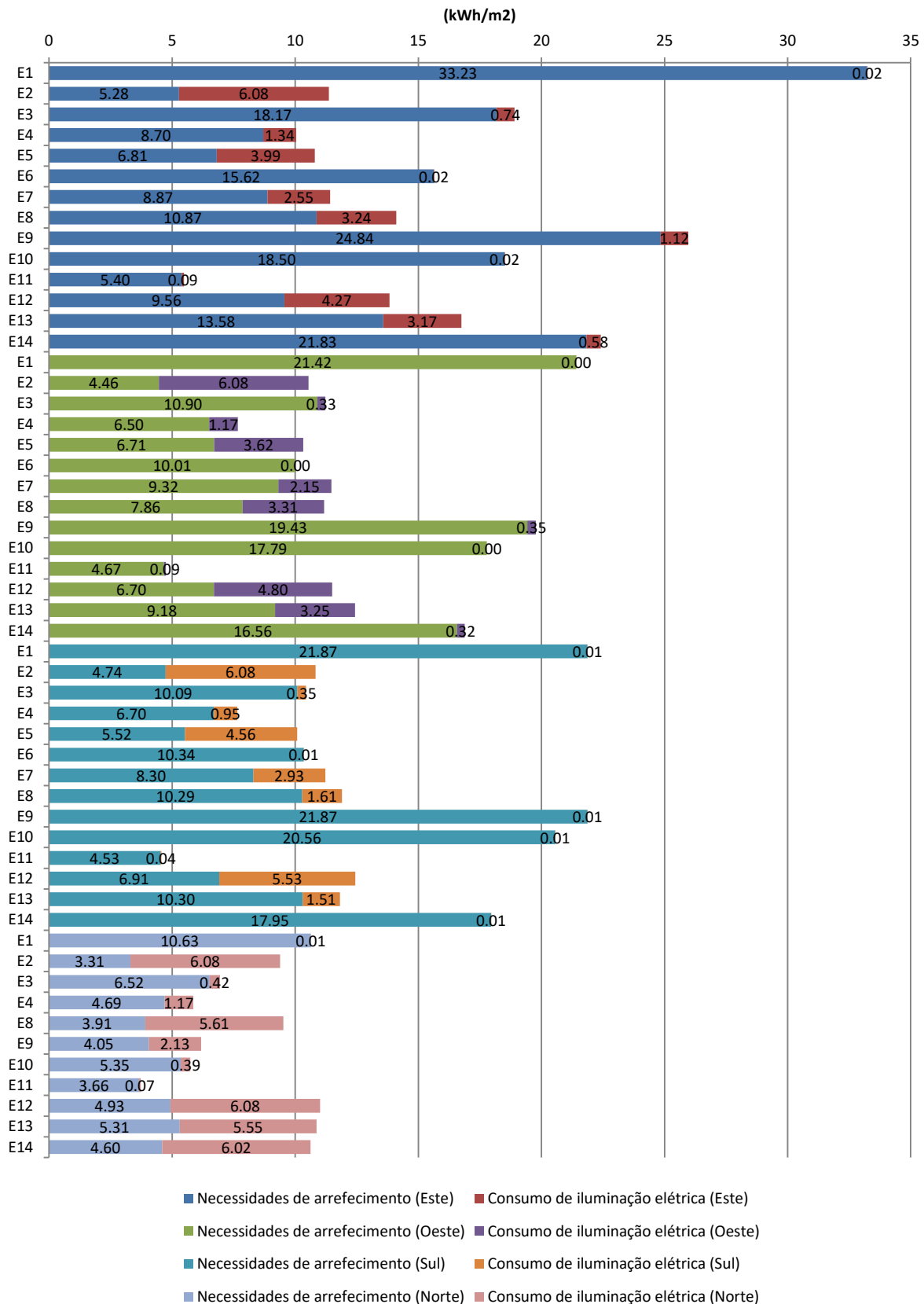


Figura 43 - Necessidades energéticas das simulações de verão para todas as orientações

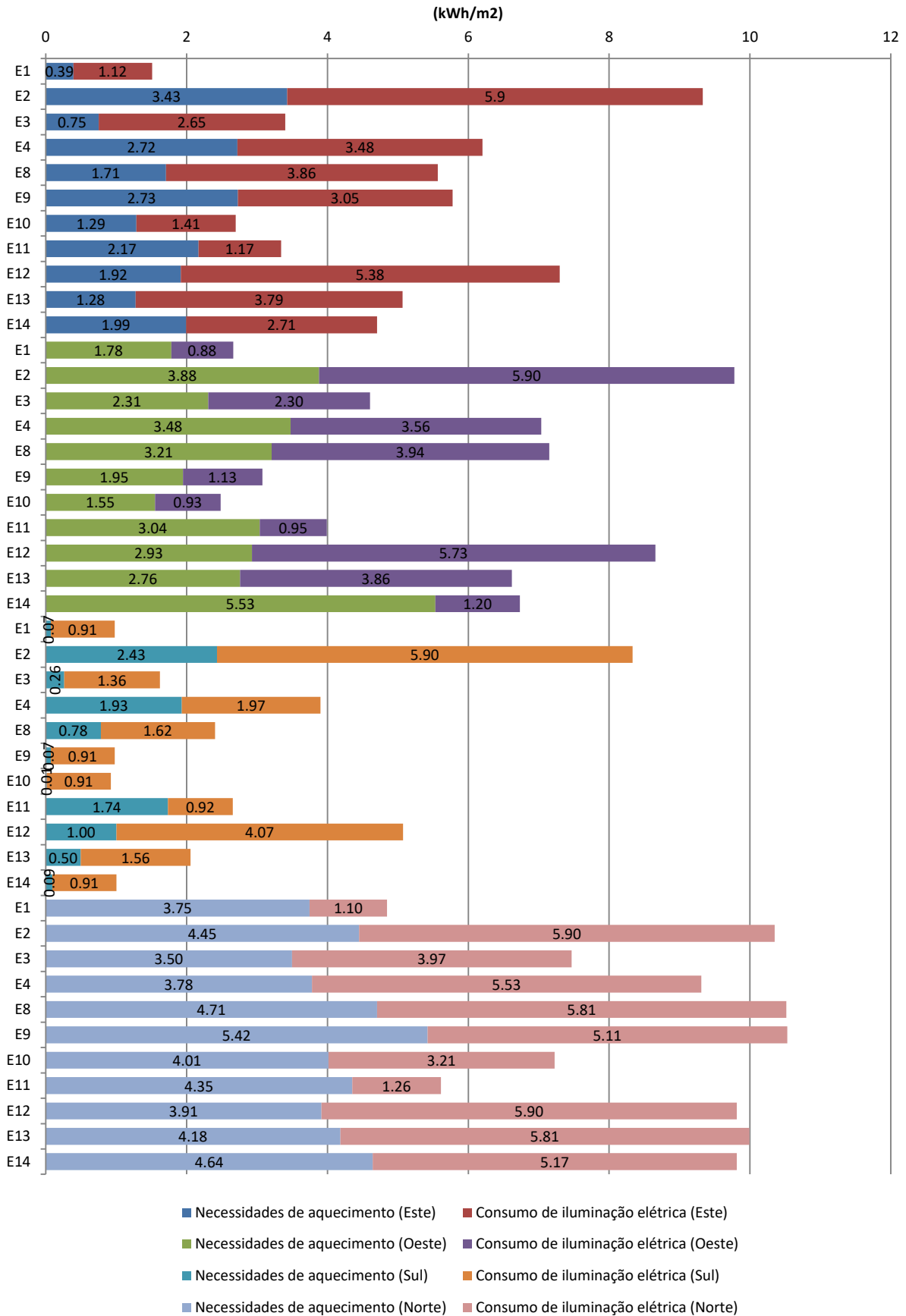


Figura 44 - Necessidades energéticas das simulações de inverno para todas as orientações

## Anexo G – Restante descrição do modelo

### *Simulation Parameters*

O objeto da classe *Version* serve para identificar a versão do programa. Como tal no ficheiro original este objeto identificava a versão 1.2.0 que na versão atualizada identifica a versão 8.0.

O objeto da classe *SimulationControl* permite especificar que tipos de cálculos serão efetuados na simulação. Apenas o campo “*Run Simulation for Weather File Run Periods*” foi selecionado para o cálculo.

O objeto da classe *Building* permite definir alguns detalhes importante sobre o edifício. O nome do edifício definiu-se como sendo “IST”, pode definir-se a orientação do eixo norte do edifício em relação ao norte real, que neste caso se considerou que estavam alinhadas. Neste objeto também se pode definir o tipo de terreno em que está o edifício, o que afeta os cálculos do vento e como este interage com o edifício, que neste caso foi definido como *City* (cidade). Definiu-se também como valores que permitem a convergência de cargas 0,04 W, e a convergência de temperaturas 0,4°C. A distribuição dos raios solares no edifício foi definida como *FullInteriorAndExterior*. Por fim, o número de dias máximo e mínimo para os cálculos de “*Warmup*” ficaram definidos com os valores por defeito 25 e seis respetivamente.

O objeto da classe *ShadowCalculation* tem influência em alguns detalhes dos modelos solar, sombreamento e luz solar. Neste objeto definiu-se no modelo original como método de cálculo no modelo original *AverageOverDaysInFrequency* que é o método de cálculo mais rápido. Além disso foi definida a frequência do cálculo para 20 dias, que é o valor por defeito do EP, em que se considera que houve mudanças significativas da posição solar.

Nos objetos das classes *SurfaceConvectionAlgorithm:Inside* e *SurfaceConvectionAlgorithm:Outside* definiu-se o modelo utilizado para convecção junto a superfícies, o modelo escolhido foi o TARP. Este modelo combina condições de convecção naturais e devido ao vento.

No objeto da classe *HeatBalanceAlgorithm* o tipo de algoritmo utilizado nos cálculos de transferência de calor e de humidade. O algoritmo utilizado foi o *ConductionTransferFunction* que, apesar de ter em conta as transferências térmicas, não considera a acumulação ou difusão de humidade nos elementos construtivos.

O objeto da classe *ZoneCapacitanceMultiplier:ResearchSpecial* pode ser usado para controlar a capacidade efetiva da zona consoante os campos definidos. Neste caso, todos os campos foram preenchidos com o valor de 1, valor por defeito.

No objeto da classe *Timestep* é o intervalo de tempo entre cálculos no *Energy Plus*. Enquanto no modelo original de Faustino (2012) este intervalo estava definido para uma hora, no modelo atualizado optou-se por definir para 10 minutos para obter resultados mais precisos.

### *Schedules*

Nos objetos da classe *ScheduleTypeLimits* definiu-se o tipo e intervalo de valores que pode estar num horário.

Nos objetos da classe *Schedule:Day:Hourly* definiram-se os tipos de dia utilizados nos restantes horários, definindo valores para cada hora diária.

Nos objetos da classe *Schedule:Week:Daily* definiram-se os tipos de semana utilizados noutros horários selecionando os tipos de dia disponíveis para cada dia da semana, podendo fazer exceções para feriados.

Nos objetos da classe *Schedule:Year* definiram-se os tipos de horário ao longo dos períodos do ano desejados. Definindo a data de início e de fim do horário e o tipo de semana presente nesse horário.

No total foram criados sete tipos de horário diferente, em baixo explicam-se estes horários.

O horário ON está ligado todos os dias 24 horas por dia, enquanto o horário OFF está desligado 24 horas por dia e foi utilizado em fins-de-semana.

O horário *WORK* representa o horário de trabalho e está ligado de segunda-feira a sexta-feira das 8:00 às 19:00. Os horários N1, N2, N20 e N25 são variações deste horário.

Os horários N1 e N2 tem as mesmas horas que o horário *WORK* mas tem os valores de um e dois respetivamente associados a cada hora de funcionamento. Este horário foi utilizado para definir o tipo de controlo no objeto *ZoneControl:Thermostat* como *ThermostatSetpoint:SingleHeating* e *ThermostatSetpoint:SingleCooling* (ver 3.3.3.6).

Os horários N20 e N25 funcionam durante as mesmas horas que o horário *WORK* mas têm os valores de 20 e 25 respetivamente a cada hora de funcionamento. Este horário foi utilizado para definir a temperatura máxima e mínima permitida pelos objetos *ThermostatSetpoint:SingleHeating* e *ThermostatSetpoint:SingleCooling* respetivamente (ver 3.3.3.6).

### ***Zone HVAC Forced Air Units***

O objeto da classe *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem* permite modelar simplificadaamente um equipamento de ar condicionado. O campo *Zone Supply Air Node Name* foi associado ao nó declarado na classe *NodeList*.

O campo *Maximum Heating Supply Air Temperature* está definido com o valor por defeito 50. O campo *Minimum Cooling Supply Air Temperature* está definido com o valor por defeito 13. O campo *Maximum Heating Supply Air Humidity* está definido com o valor por defeito 0,0156. O campo *Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio* está definido com o valor por defeito 0,0077.

O campo *Dehumidification Control Type* foi definido com a opção por defeito *ConstantSensibleHeatRatio*. Isto significa que o objeto será controlado de modo a respeitar necessidades de arrefecimento sensível e a taxa de arrefecimento latente será calculada utilizando um rácio constante de calor sensível. Este rácio é definido no campo *Cooling Sensible Heat Ratio* e considerou-se o valor por defeito de 0,7.

O campo *Humidification Control Type* foi preenchido com a opção por defeito *None*. Esta opção define que não existe humificação.

### ***Zone HVAC Equipment Connections***

A classe de objetos *ZoneHVAC:EquipmentList* representa uma lista de todos os equipamentos de ar condicionado no modelo, neste caso existe apenas um. O objeto foi definido como sendo do tipo *ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem* e associado ao equipamento AVAC mencionado anteriormente (ver Anexo G).

No objeto da classe *ZoneHVAC:EquipmentConnections* definem-se alguns pormenores do sistema de ar condicionado. De referir que além de se associar ao objeto da classe *ZoneHVAC:EquipmentList* tem de se inserir o nome dos nós relacionados com a circulação de ar.

### ***Node-Branch Management***

O objeto da classe *NodeList* é uma lista dos nós do modelo. Esta lista não é obrigatória em muitos casos mas foi neste modelo utilizada para identificar o nó de entrada de ar no sistema.

### ***External Interface***

O grupo *External Interface*, descrito em 3.3, foi criado no ficheiro atualizado e utilizado para controlar a operação automática dos estores em algumas estratégias em co-simulação com o *Matlab* (ver 3.4.2).

Neste grupo foram criados objetos em três tipos classes de objetos no ficheiro atualizado: *ExternalInterface*; *ExternalInterface:Schedule*; *ExternalInterface:Actuator*.

O objeto da classe *ExternalInterface* tem como objetivo ativar a funcionalidade que permite a co-simulação do EP com outros programas e, com isso em mente, selecionou-se a opção *PtolemyServer*.

Os objetos das classes *ExternalInterface:Schedule* e *ExternalInterface:Actuator* serviram para receber informação com o *Matlab* durante a co-simulação.

### ***Reports***

O objeto da classe *Output:VariableDictionary* tem como propósito produzir dois ficheiros de output: “.rdd”; “.mdd”. O primeiro foi utilizado neste trabalho e está descrito em maior detalhe em 3.3.

O objeto da classe *Output:Surfaces:Drawing* tem como propósito produzir o ficheiro de output “.dxf”. Este ficheiro está descrito em maior detalhe em 3.3.

Na classe de objetos *Output:Variable* cada objeto é uma variável de output cujos valores estarão no ficheiro de output “.csv”. Cada um destes objetos tem quatro campos a preencher, mas apenas três são obrigatórios.

O campo *Key Value* é utilizado para especificar a zona ou a superfície da variável desejada, isto é particularmente útil em variáveis do mesmo nome mas que podem estar em várias superfície ou zonas. Se este campo for preenchido com “\*” o ficheiro de output apresentará todas as variáveis do nome especificado de todas as superfícies ou zonas.

O campo *Variable Name* é onde se escreve o nome da variável desejada. Estes nomes encontram-se no ficheiro de output “.rdd”. Ficheiro descrito em maior detalhe em 3.3.

O campo *Reporting Frequency* refere-se à frequência com a qual a variável será atualizada. Neste trabalho as variáveis foram atualizadas com a frequência de cálculo do programa, 10 minutos.

O campo *Schedule Name* não foi preenchido (campo opcional) em nenhuma das variáveis utilizadas.

As variáveis de output definidas nesta classe são medidas de energia ou métricas de conforto, definidas em maior detalhe em 3.4.1: *total cooling needs*; *total heating needs*; *total electric light needs*; UDI\_100; UDI\_100-500; UDI\_500-2000; UDI\_100-2000; UDI\_2000; DGI%.

As variáveis *total cooling needs* e *total heating needs* correspondem às necessidades de energia do AVAC de arrefecimento e aquecimento respetivamente. Estas variáveis foram calculadas com um programa do EMS (ver Anexo A) utilizando “sensores” de variáveis de *output*. Com a informação das variáveis *Zone Ideal Loads Zone Total Cooling Rate*, *Zone Ideal Loads Zone Total heating Rate* calculou-se o somatório das necessidades energéticas em kWh/m<sup>2</sup> de arrefecimento e aquecimento respetivamente.

A variável *total electric light needs* corresponde às necessidades de energia da iluminação elétrica. Esta variável foi calculada com um programa do EMS (ver Anexo A) utilizando um “sensor” de variáveis de *output*. Com a informação da variável *Zone Lights Electric Energy* calculou-se o somatório das necessidades energéticas da iluminação elétrica em kWh/m<sup>2</sup>.

As variáveis UDI\_100, UDI\_100-500, UDI\_500-2000, UDI\_100-2000 e UDI\_2000 representam medidas complementares da métrica de conforto *useful daylight autonomy* (ver 2.1.1.6 e 3.2.2). Estas variáveis foram calculadas com um programa do EMS (ver Anexo A) utilizando um “sensor” de variáveis de *output*. Com a informação da variável *Daylighting Reference Point 2 Illuminance* calcularam-se várias componentes do UDI.

A variável DGI% representa uma métrica de conforto que tem como valor a percentagem de tempo das horas de ocupação em que o DGI estava abaixo dos 22. Esta variável foi calculada com um programa do EMS (ver Anexo A) utilizando o “sensor” de variáveis de *output Daylighting Reference Point 1 Glare Index*.

O objeto da classe *Output:EnergyManagementSystem* tem como propósito produzir o ficheiro de *output* “.edd”. Este ficheiro está descrito em maior detalhe em 3.3. Os campos deste objeto foram preenchidos com a opção *Verbose* de modo a ter informação mais detalhada no ficheiro de *output*.

O objeto da classe *Output:Diagnositics* permite alterar o tipo de mensagens de output do programa. Este objeto foi definido com a opção “*DisplayExtraWarnings*” para mostrar os erros e avisos no ficheiro de output “.err” de forma mais detalhada. Este ficheiro está descrito em maior detalhe em 3.3.