



**Metodologia Integrada de Gestão de Iluminação em
Edifícios de Serviços Aplicada aos Edifícios do *Campus* do
IST**

Bernardo Nascimento Salvador

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Júri

Presidente: Prof. Mário Manuel Gonçalves da Costa

Orientador: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Vogal: Eng. Mário Miguel Franco Marques de Matos

Maio de 2015

AGRADECIMENTOS

Servem os presentes agradecimentos para demonstrar o meu reconhecimento por todos os que, ao longo do meu percurso académico, intervieram com a sua motivação, orientação e disponibilidade para me ajudar sempre que necessário.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Prof. Carlos Silva por todo o apoio, orientação e dedicação no decurso desta tese, a qual não teria sido possível sem todas as discussões construtivas que aconteceram. Obrigado também por aceitar novas ideias e sugestões.

Também gostaria de agradecer aos meus colegas de universidade, os quais me foram acompanhando durante todo o curso de Engenharia Mecânica, desde o ano de 2009. Sem eles, todo este percurso académico teria sido, sem dúvida alguma, mais difícil. Obrigado pela motivação e apoio dado nas alturas fundamentais.

Por fim gostaria de prestar especial destaque aos meus pais, que são as pessoas que, no fundo, são responsáveis pelo que sou hoje. Desde a educação dos princípios fundamentais ao amor incondicional e incessante, é razão para lhes dever tudo. Os seus sacrifícios permitiram-me chegar onde cheguei e o sentimento de dívida permanecerá eterno. Obrigado!

RESUMO

A redução do consumo energético a nível mundial é, hoje em dia, um objetivo de todos os países desenvolvidos, pelos impactos positivos que pode ter a nível económico e ambiental. Esta redução tem sido feita através de uma procura incessante de técnicas de utilização de energia de forma mais eficiente, e que tem levado ao aparecimento de sistemas tecnológicos cada vez mais inteligentes.

De acordo com estudos feitos pela OCDE, o consumo de energia primária em edifícios de serviços representa cerca de 14% do consumo total de energia primária e dentro destes, a iluminação é responsável por cerca de 12%. Apesar das previsões para 2015 estimarem uma percentagem para a iluminação superior (14%), estima-se que até 2035 o consumo se reduza em 20%.

A presente dissertação propõe-se a desenvolver uma ferramenta integrada de gestão de iluminação em edifícios de escritórios e serviços. Pretende-se implementar uma ferramenta que seja capaz de controlar, num determinado compartimento, o nível de iluminação interior, tendo em conta quer a iluminação natural proveniente dos vãos envidraçados, quer a iluminação artificial proveniente das luminárias instaladas. As luminárias deverão estar equipadas com um sistema de *dimming* individualizado, permitindo que sejam controladas individualmente consoante as necessidades. A ferramenta deve calcular as configurações de *dimming* ótimas para um determinado cenário de luz e através de uma interface em *Matlab*, comunicar com as luminárias e fazer o ajuste imediatamente. A calibração do modelo e validação da ferramenta foram feitas no laboratório de energia do IST no *TagusPark*.

Através da realização de testes de validação, foi possível concluir que a ferramenta desenvolvida é capaz de simular os níveis de iluminação de um compartimento fechado com um erro médio dos registos de 16% (em estimativas conservadoras) e 11% (em estimativas otimistas). As poupanças associadas a um sistema deste tipo são notórias uma vez que as luminárias são ajustadas, *in loco*, para ter em conta a iluminação exterior. Em média, nos piores cenários estudados (níveis de iluminação natural mais baixos) as poupanças são de pelo menos 53% enquanto nos casos em que há bastante iluminação natural, as poupanças podem ascender aos 75%.

Palavras-Chave: eficiência energética, edifícios sustentáveis, iluminação inteligente, controlo dinâmico

ABSTRACT

Decreasing the worldwide energy consumption is, nowadays, a standard for every developed country. The uninterrupted search for different techniques of energy management is leading to more and more advanced and intelligent technological systems.

Accordingly to some previous OCDE studies, the primary energy consumption in office buildings is responsible for about 14% of the total. Within this, lighting accounts for about 12%. Despite the predictions for 2015 foresee an increase from 12% to 14%, it is expected that until 2035, the energy use for office building lighting reduces by 20%.

The present master *thesis* pretends to develop an integrated tool of lighting management in office buildings. It is supposed to implement a model which is able to control, in a given compartment/room, the light levels of illuminance. These light levels should be estimated by using the radiosity and point by point methods. The first will be responsible for estimating the light illuminance level contributions from the Sun and transmitted through the window – natural lighting. The second will be responsible to estimate the contribution that each luminary has in each interest point – artificial lighting. Those luminaries will be equipped with individualized *dimming* systems that allows to be controlled individually accordingly to the real needs. The final program should be able to calculate the optimal *dimming* configurations for a given light situation and all the estimated will be based in a light sensor which will be installed in the ceiling of the room. Through a *Matlab* interface, it will be possible to set the *dimming* levels in all the luminaries.

After experimentally validating the model, it is possible to conclude that the developed model was able to estimate the light levels of illuminance in a closed compartment with a precision of 16% (for pessimistic situations) and 11% (for optimistic situations). The energy savings after using this model to control the luminaries were estimated and compared with a standard *dimming* installation where all the luminaries need to be at the same *dimming* level. Reductions of 75% were estimated in the situations where the ceiling sensor measured between 200 and 250 lx (which means high natural illuminance levels through the window) and 53% in the situations where the ceiling sensor measured between 0 and 50 lx (which means low natural illuminance levels through the Windows).

Keywords: energy efficiency, sustainable buildings, intelligent lighting, dynamic control

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
ÍNDICE GERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABELAS	xvi
LISTA DE ACRÓNIMOS	xviii
LISTA DE SÍMBOLOS	xx
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto	1
1.2. Energia nos edifícios	2
1.3. Objetivos e contribuições	4
1.4. Organização	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Definição de luz	7
2.2. Luz natural	8
2.3. Propriedades da radiação	14
2.4. Iluminação interior	16
2.4.1. Parâmetros	16
2.4.2. Eficiência de equipamentos de iluminação	20
2.4.3. Eficiência de equipamentos de controlo de iluminação	21
2.5. Técnicas de projeto luminotécnico	23
2.5.1. Métodos simples de projeto luminotécnico	23
2.5.1.1. Método das cavidades	24
2.5.1.2. Método ponto a ponto	25
2.5.1.3. Método da densidade de potência	25

2.5.1.4.	Método das tabelas	25
2.5.2.	Métodos complexos de simulação luminotécnica	26
2.5.2.1.	Split flux formula	26
2.5.2.2.	Radiosidade	27
2.5.2.3.	Ray tracing.....	27
2.5.2.4.	Photon Mapping.....	28
3.	MODELO TEÓRICO.....	29
3.1.	Iluminação natural	29
3.2.	Método da radiosidade	30
3.2.1.	Geometria	32
3.2.2.	Envolvente opaca	33
3.2.3.	Envidraçados	34
3.2.4.	Malha	35
3.2.4.1.	Eixo x	35
3.2.4.2.	Eixo y	36
3.2.4.3.	Eixo z	37
3.2.5.	Iluminação exterior	37
3.2.6.	Iluminação artificial	39
3.3.	Método ponto a ponto.....	40
3.4.	Luminárias	44
3.5.	<i>Dimming</i>	45
3.6.	Controlo da iluminação	46
3.6.1.	Fase 1 (Verificação de níveis de iluminação).....	47
3.6.2.	Fase 2 (Otimização energética)	47
3.6.3.	Fase 3 (Otimização da flutuação).....	48
3.6.4.	Fase 4 (Otimização da uniformidade)	49
4.	CASO DE ESTUDO	51

4.1.	Envolvente interior	51
4.2.	Envidraçados	52
4.3.	Malha	52
4.4.	Pontos de interesse	53
4.5.	Luminárias	54
4.6.	Controlo de iluminação	56
5.	VALIDAÇÃO DE RESULTADOS.....	59
5.1.	Validação de modelo da radiosidade (iluminação natural)	59
5.2.	Validação de método ponto a ponto (iluminação artificial).....	64
5.3.	Validação de modelo final	66
6.	CONCLUSÕES	73
6.1.	Síntese de resultados	73
6.2.	Recomendações para trabalho futuro	74
7.	REFERÊNCIAS	77
	ANEXOS.....	I
A.	Fatores de forma	I
B.	Exemplo de simulação	III
C.	Casos validados	VIII
D.	Valores típicos de DPI, FO e FD	XI

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Parcela de energia consumida por setor de atividade nos países da OCDE em 2012.....	2
Figura 2 – Parcela de consumo de energia em 2010 para os edifícios dos EUA – desagregação por tipo de utilização final (Department of Energy, 2011a)	3
Figura 3 – Parcela de consumo de energia previsto para 2015 para os edifícios dos EUA – desagregação por tipo de utilização final	3
Figura 4 – Consumo de energia primária devido à iluminação de edifícios (Department of Energy, 2011b).....	4
Figura 5 – Espectro eletromagnético com destaque da gama da luz visível.....	8
Figura 6 – Luz direta e difusa (transmitidas através da atmosfera).	9
Figura 7 – Proveniência da luz incidente na janela de um compartimento.....	11
Figura 8 – Iluminância horizontal exterior em dias de céu limpo (componente direta não considerada)	12
Figura 9 – Iluminância horizontal exterior em dias de céu nublado	13
Figura 10 – Propriedades da luz – A) Reflexão especular; B) Reflexão dispersa; C) Reflexão difusa	14
Figura 11 – Propriedades da luz – A) Transmissão direta; B) Transmissão por refração	16
Figura 12 – Processos de absorção, reflexão e transmissão em meios semitransparentes e opacos	16
Figura 13 – Ângulo sólido (Ω) – (Ryer, 1998)	17
Figura 14 – Fluxo luminoso (Φ).....	17
Figura 15 – Intensidade luminosa	18
Figura 16 – Iluminância	18
Figura 17 – Luminância	19
Figura 18 – Índice de restituição cromática.....	19
Figura 19 – Identificação das cavidades superior, intermédia e inferior	24
Figura 20 – Exemplo de tabela de iluminâncias para lâmpada de iódetos metálicos	26
Figura 21 – Componentes da iluminação consideradas pelo método split flux formula.....	27
Figura 22 – Exemplo de aplicação do método da radiosidade	27

Figura 23 – Exemplo de aplicação do método ray tracing	28
Figura 24 – Exemplo de aplicação do método <i>photon mapping</i>	28
Figura 25 – Algoritmo simplificado de cálculo de iluminação interior	30
Figura 26 – Exemplo de fator de forma entre o elemento 1 e o elemento 22.....	31
Figura 27 – Fator de forma associado à troca de radiação entre as superfícies elementares de áreas dA_i e dA_j	31
Figura 28 – Dimensões genéricas de um compartimento.....	33
Figura 29 – Iluminância na direção da face (E_1) e em direção oposta (E_2)	33
Figura 30 – Dimensões genéricas de um vão envidraçado	34
Figura 31 – Iluminância na direção da face (E_1) e em direção oposta (E_2)	35
Figura 32 – Malha genérica ao longo do eixo x (janela centrada).....	36
Figura 33 – Malha genérica ao longo do eixo x (janela descentrada)	36
Figura 34 – Malha genérica ao longo do eixo y	37
Figura 35 – Malha genérica ao longo do eixo z	37
Figura 36 – Verificação do erro associado às correlações propostas (os pontos coloridos representam medições experimentais).....	38
Figura 37 – Ilustração de janela com lamelas de sombreamento a cobrir cerca de 50%	39
Figura 38 – Algoritmo simplificado de cálculo de iluminação artificial	40
Figura 39 – Grandezas consideradas para o método ponto a ponto.....	40
Figura 40 – Orientação espacial de um ponto aleatório em relação à luminária e sua caracterização .	41
Figura 41 – Localização dos pontos de controlo de iluminância de acordo com o método 1	42
Figura 42 – Localização dos pontos de controlo de iluminância de acordo com o método 2	42
Figura 43 – Seccionamento de zonas.....	43
Figura 44 – Algoritmo de cálculo de iluminância artificial	43
Figura 45 – Exemplos de possíveis distribuições de luminárias.....	45
Figura 46 – Regras aplicadas à seleção das configurações globais válidas	47

Figura 47 – Configuração aleatória de luminárias e pontos de controlo de iluminância	48
Figura 48 – Esquematização das dimensões e formato da janela e lamelas de sombreamento.....	52
Figura 49 – Malha utilizada para cálculo numérico	53
Figura 50 – Esquema da localização dos pontos de interesse.....	54
Figura 51 – Esquema da disposição das luminárias.....	55
Figura 52 – Diagrama fotométrico das luminárias <i>ODELUX OD-6822</i>	56
Figura 53 – Curva de potência experimental	57
Figura 54 – Curva de eficácia considerada.....	57
Figura 55 – Erro relativo de 126 registos obtidos através da medição com luxímetros	63
Figura 56 – Erro relativo médio por ponto.....	63
Figura 57 – Número de registos observados por ponto.....	67
Figura 58 – Média de erro dos registos observados em reação ao real.....	67
Figura 59 – Distribuição de registos e respetivo erro.....	68
Figura 60 – Comparação entre iluminância simulada e iluminância real média nos pontos de controlo	68
Figura 61 – Relação entre o número de casos registados e a poupança média possível	69
Figura 62 – Relação entre a poupança energética média e a iluminância no teto da sala	70
Figura 63 – Ilustração exemplificativa do <i>output</i> esperado do programa	70
Figura 64 – Contribuição de iluminação natural (indicado em cima) e iluminação artificial (indicado em baixo), para <i>dimming</i> específico para registo de 57 <i>lx</i> (no teto).....	71
Figura 65 – Exemplo de cálculo de distribuição de iluminação natural	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Radiação solar decomposta por tipo (Moan, 2001)	8
Tabela 2 – Características da luz natural (Skylight, 1998).....	10
Tabela 3 – Reflexividade típica de superfícies.....	15
Tabela 4 – Valores típicos de E_m , UGR, U_0 e R_a para ambientes de escritório.....	20
Tabela 5 – Fatores de conversão de consumo energético para vários tipos de lâmpadas.....	20
Tabela 6 – Resumo das vantagens e desvantagens das principais tecnologias existentes no mercado	23
Tabela 7 – Exemplo de configuração global de <i>dimming</i> para compartimento com 6 luminárias.....	46
Tabela 8 – Exemplo de funcionamento da otimização das flutuações	49
Tabela 9 – Exemplo de otimização das uniformidades.....	50
Tabela 10 – Dimensões gerais da sala 1.58.....	51
Tabela 11 – Reflexividade média da envolvente opaca.....	51
Tabela 12 – Dimensões características de malha utilizada.....	53
Tabela 13 – Coordenadas dos pontos de interesse	54
Tabela 14 – Relação entre nível de <i>dimming</i> , potência, eficácia luminosa e intensidade luminosa de uma luminária ODELUX	58

LISTA DE ACRÓNIMOS

RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
AQS	Águas Quentes Sanitárias
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
UV	Ultravioleta
IV	Infravermelho
CIE	<i>Commission Internationale de l'Éclairage</i>
UGR	<i>Unified Glare Rating</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
IRC	Índice de Reprodução Cromática
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
BRE	<i>Building Research Establishment</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

ϕ	Latitude [°]	A	Área Genérica [m^2]
l	Longitude [°]	F_O	Fator Corretivo (Ocupação)
θ	Ângulo de Incidência [°]	F_D	Fator Corretivo (Disponibilidade de Luz Natural)
ω	Ângulo Horário do Sol [°]	P	Potência [W]
t_s	Tempo Solar [h]	DPI	Densidade de potência [W/m^2 100 lx]
t_{LST}	Tempo <i>Standard</i> Local [h]	θ_i	Ângulo entre a normal à superfície i e a linha que une a superfície i e j [°]
ET	Equação do Tempo	dA	Área de Superfície Elementar [m]
n	Dia do Ano [<i>dia</i>]	M	Iluminância Final [lx]
t	Hora do Dia [h]	M_{i_0}	Iluminância Inicial [lx]
B	Fator Corretivo	M_0	Matriz de Iluminâncias Iniciais [lx]
β	Ângulo de inclinação da superfície [°]	I	Matriz Identidade
δ	Declinação solar [°]	T	Matriz Auxiliar
γ	Ângulo azimutal da superfície [°]	M	Matriz de Iluminâncias Finais [lx]
α	Ângulo de altitude solar [°]	c_{malha}	Comprimento típico da malha em x [m]
F	Fator de Forma Genérico	l_{malha}	Comprimento típico da malha em y [m]
ρ	Reflexividade	a_{malha}	Comprimento típico da malha em y [m]
τ	Transmissividade	c_1	Distância Janela – Parede [m]
f	Fator Corretivo	c_2	Comprimento da Janela [m]
c	Coeficiente de Extinção Atmosférica	a_{pt}	Altura Posto Trabalho [m]
G	Energia Radiativa [W/m^2]	a_1	Distância Janela – Chão [m]
Ω	Ângulo Sólido [st]	a_2	Altura da Janela [m]
E	Iluminância [lx]	d	Distância Genérica [m]
ϕ	Fluxo Luminoso [lm]	N_{Dg}	Configuração Global de <i>Dimming</i>
I	Intensidade Luminosa [cd]	N_{Di}	Configuração Individual de <i>Dimming</i>
L	Luminância [cd/m^2]	N_L	Número de Luminárias
U_0	Rácio de Uniformidade Mínima		
R_a	Índice de Restituição Cromática		

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

A temática da eficiência energética tem vindo a ser cada vez mais debatida pelas entidades governantes, tanto a nível nacional como internacional. A utilização excessiva de energia com origem em combustíveis fósseis provoca um claro desequilíbrio da sociedade. Por um lado, a procura incessante por fontes de energia que satisfaçam os atuais requisitos põe em causa a sua própria existência no futuro. Por outro lado, a poluição associada à sua utilização põe em causa a sustentabilidade das gerações vindouras, por outras palavras, a sustentabilidade da raça humana tal como a conhecemos.

No ano de 1990 foi introduzido em Portugal o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), tratando-se do “primeiro instrumento legal que em Portugal impôs requisitos ao projeto de novos edifícios e de grandes remodelações, por forma a salvaguardar a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios sem necessidades excessivas de energia quer no Inverno quer no Verão.” (Ministério da Economia e do Emprego, 2006b)

No ano de 1998 foi aprovado pelo Decreto-Lei n.º 118/98 o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), que “procurava introduzir algumas medidas de racionalização, fixando limites à potência máxima dos sistemas a instalar num edifício para, sobretudo, evitar o seu sobredimensionamento...” (Ministério da Economia e do Emprego, 2006a)

Para fazer face aos elevados consumos, a comunidade europeia impôs, através da diretiva 2002/91/CE, que todos os edifícios deviam ser certificados. Esta medida tinha como objetivo incentivar a melhoria do desempenho energético e condições de conforto dos mesmos. Em resposta à mesma diretiva, Portugal criou, em 2006, o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios (SCE) que definia uma metodologia para a avaliação das características do comportamento térmico dos edifícios (RCCTE) e uma metodologia para a avaliação dos sistemas energéticos de climatização em edifícios (RSECE). Tendo em conta o resultado do RCCTE e RSECE, era emitido um certificado que indicava a classificação do edifício.

Em 2010 a diretiva 2002/91/CE foi revista (2010/31/CE), trazendo um conjunto de novos desafios. Apenas em 2013 o SCE sofreu um ajuste à nova diretiva, tendo sido aprovado o Decreto-Lei n.º 118/2013 (Ministério da Economia e do Emprego, 2013). Este diploma inclui “o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS)”, permitindo assim uma reorganização significativa de três diplomas apenas num. Por outro lado, passou a ser feita uma clara distinção entre os edifícios com destino a habitação dos edifícios de comércio e serviços, sendo os primeiros sujeitos apenas à avaliação de requisitos de

comportamento térmico e eficiência dos sistemas e os últimos, além desses, também à avaliação da instalação, condução e manutenção de sistemas técnicos. Por fim, foram acrescentados requisitos de eficiência energética, sistemas de climatização, preparação de águas quentes sanitárias (AQS), iluminação, aproveitamento de energias renováveis e gestão de energia. (Corvacho, 2013)

1.2. Energia nos edifícios

Estima-se que nos países da OCDE no ano de 2012 o setor dos edifícios residenciais, comerciais e de serviços públicos tenham sido responsáveis por 33% do consumo anual de energia final (**Figura 1**). Em Portugal, no ano de 2012, consumiram-se 16.508 ktep de energia final, ou seja, cerca de 192 GWh. Desses, cerca de 11% diziam respeito aos edifícios de comércio e serviços públicos e 16% diziam respeito a edifícios residenciais. (International Energy Agency, 2012)

Energia consumida por setor de atividade

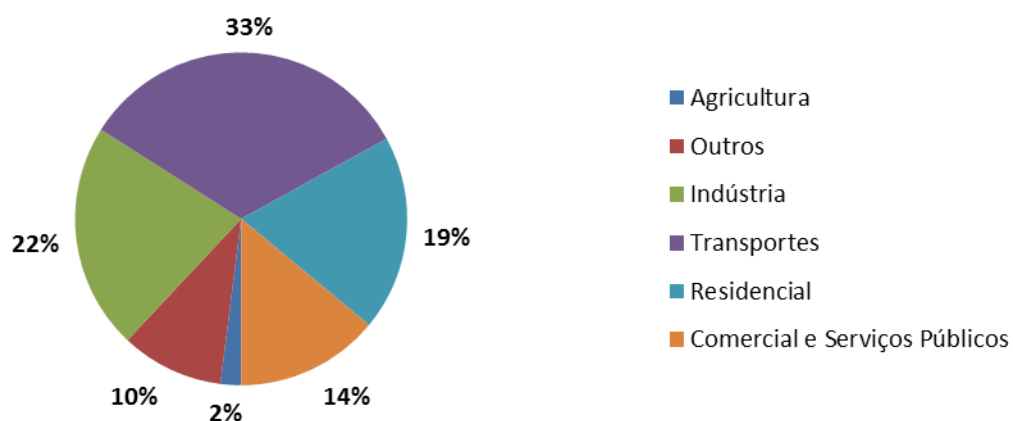


Figura 1 – Parcela de energia consumida por setor de atividade nos países da OCDE em 2012

Tipicamente o consumo energético de um edifício pode ser atribuído a três diferentes causas: redes de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), sistemas de iluminação e outros equipamentos de escritório.

No ano de 2010, a iluminação artificial foi responsável por cerca de 12% do consumo anual de energia primária em edifícios, enquanto os equipamentos de escritório consumiram 35% e as redes de AVAC 53% (**Figura 2**).

Energia consumida por tipo de utilização final (2010)

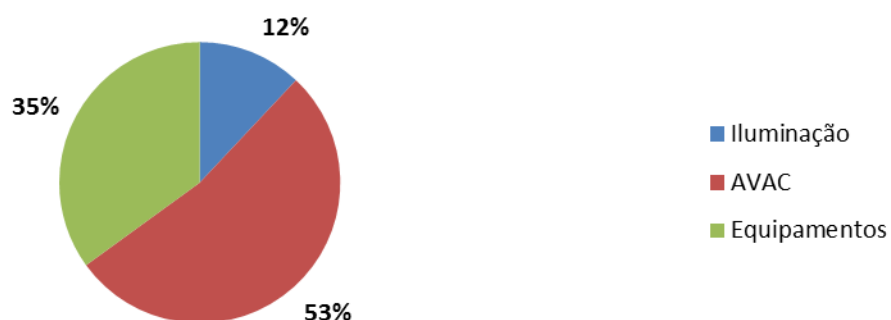


Figura 2 – Parcela de consumo de energia em 2010 para os edifícios dos EUA – desagregação por tipo de utilização final (Department of Energy, 2011a)

Estima-se que até ao final de 2015, a percentagem de consumo para a iluminação de edifícios de serviços (em termos relativos) aumente para 14% tal como está representado na **Figura 3**.

Energia consumida por tipo de utilização final (2015)

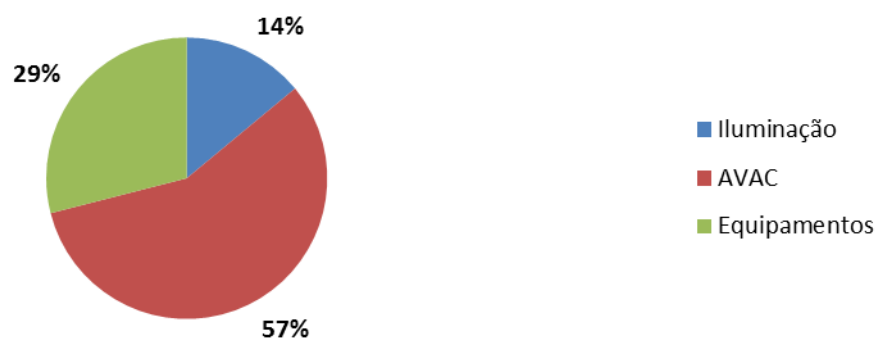


Figura 3 – Parcela de consumo de energia previsto para 2015 para os edifícios dos EUA – desagregação por tipo de utilização final

Apesar de ser esperado um aumento relativo do consumo relacionado com a iluminação, espera-se também que o consumo absoluto reduza em 20% até 2015 (**Figura 4**), mantendo um valor constante até 2035.

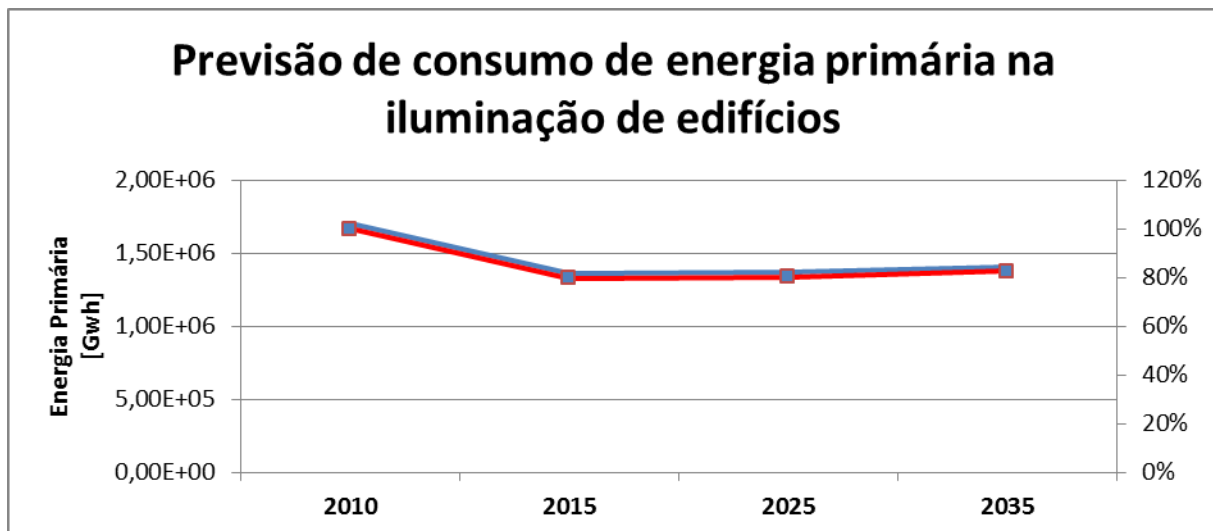


Figura 4 – Consumo de energia primária devido à iluminação de edifícios (Department of Energy, 2011b)

1.3. Objetivos e contribuições

O objetivo deste trabalho é conceptualizar e desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão que permita a otimização da utilização de um sistema de iluminação convencional tendo em conta as condições de iluminação natural existentes num determinado espaço. Esta ferramenta vai englobar dois módulos principais, o de simulação e o de controlo. O objetivo do módulo de simulação é estimar quais as poupanças energéticas associadas a um sistema de *dimming* tendo por base correlações que calculam a iluminância natural consoante a posição do Sol ao longo do dia/ano e para vários estados do céu, como por exemplo, céu limpo, nublado ligeiro, nublado carregado, entre outros. O objetivo do módulo de controlo é calcular instantaneamente a iluminância artificial que é necessário obter através das luminárias por forma a atingir os níveis luminosos necessários e definidos pelo utilizador da ferramenta. Este último módulo vai basear-se na medição instantânea da iluminância numa posição específica de um compartimento (através de um sensor de luminosidade, por exemplo, luxímetro), para calcular a configuração de *dimming* ideal para as luminárias existentes e vai interagir com estas de forma remota, através de uma interface em *Matlab*. O algoritmo de cálculo baseia-se num modelo de elementos finitos que terá em conta informações tais como as dimensões gerais do compartimento, dimensões gerais da janela, características das luminárias, posicionamento das mesmas, localização dos pontos de controlo entre outras. Neste módulo será também possível calcular as poupanças associadas à utilização deste sistema, comparando-as com um sistema tradicional de *dimming* onde todas as luminárias são configuradas para o mesmo nível.

Esta ferramenta destina-se a ser utilizada por um gestor de energia que esteja incumbido de analisar propostas de medidas de melhoria da eficiência energética da iluminação ou para fazer o controlo automático de um sistema de luminárias de uma forma autónoma, flexível e eficiente.

1.4. Organização

A presente tese encontra-se dividida em 6 capítulos.

O presente capítulo (capítulo 1) consiste na introdução da temática abordada no restante documento e objetivos a que o trabalho se propõe.

No capítulo 2 é feito um enquadramento específico do tema, ou seja, são definidos os conceitos gerais necessários ao prosseguimento da leitura. Também são descritos alguns estudos feitos na área e que se mostram relevantes para a temática em questão.

No capítulo 3 é descrito todo o modelo teórico envolvido no desenvolvimento do modelo final, sendo aqui que se definem as restrições e capacidades do mesmo.

No capítulo 4 é feita uma descrição do caso de estudo onde se pretende validar o modelo.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados da validação do modelo bem como a sua análise.

Por último, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas e também propostas sugestões de futuro desenvolvimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica tem como objetivo definir e esclarecer os conceitos necessários à temática da iluminação natural e artificial em compartimentos fechados. Neste capítulo também serão descritos estudos que se considerem importantes e relevantes.

2.1. Definição de luz

A radiação eletromagnética pode ser vista como a energia que é emitida por um corpo que se encontra a uma temperatura finita, através da propagação de ondas eletromagnéticas. A sua origem está nas alterações das configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem esse corpo e a sua propagação acontece em qualquer meio físico incluindo o vácuo. As propriedades que definem uma emissão eletromagnética são a direção, a intensidade e o comprimento de onda ou frequência.

O tipo de radiação eletromagnética depende da frequência da onda e pode ir desde as ondas de rádio (baixa frequência) aos raios gama (alta frequência). Estas gamas estão representadas no espectro eletromagnético da **Figura 5**. A luz visível emitida por exemplo pelo Sol ou por uma lâmpada, não é mais do que uma gama bem definida, entre os 390 nm (cor violeta) e os 780 nm (cor vermelha), onde o olho humano consegue ver. Toda a radiação que se situa fora deste intervalo não é útil do ponto de vista da iluminação.

A luz visível é constituída pela mistura de 7 cores, violeta, ciano, azul, verde, amarela, laranja e vermelha. Esta decomposição pode ser vista por exemplo quando um feixe luminoso atravessa um prisma ótico ou num arco-íris. Denomina-se luz branca à sobreposição de todas essas cores.

A percepção de cor que temos ao olhar para qualquer superfície deve-se à frequência da radiação visível que é refletida por esta, isto é, uma parede é azul porque de toda a luz visível que lhe incide, apenas a componente azul é refletida, sendo todas as outras absorvidas. A percepção de uma superfície de cor branca ou preta prende-se com a reflexão total ou absorção total da luz, respetivamente. É por este motivo que, por exemplo, não se deve vestir roupa preta no Verão, pois esta vai absorver toda a radiação na gama do visível, contribuindo assim para o aumento da temperatura.

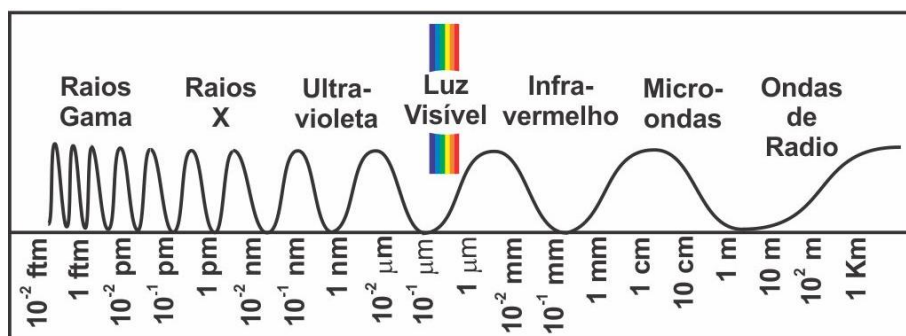


Figura 5 – Espectro eletromagnético com destaque da gama da luz visível

2.2. Luz natural

De acordo com Universe 2012, o Sol emite radiação num espectro abrangente – desde o raio-X às ondas de rádio. Embora o pico de intensidade de radiação emitida pelo Sol aconteça na gama do infravermelho, a radiação que efetivamente chega à superfície terrestre é, na sua grande maioria, luz visível (**Tabela 1**). Dentro desta gama, o Sol emite aproximadamente seis bilhões de lumens¹ por cada metro quadrado de superfície, dos quais cerca de 134.000 lux² atingem a atmosfera terrestre, após fenómenos de absorção e reflexão. (Coutinho, 2009) Da luz visível que é transmitida através da atmosfera, uma parte dá origem à luz direta, através de feixes paralelos e outra parte origina luz difusa com um aspeto homogéneo (**Figura 6**).

Tabela 1 – Radiação solar decomposta por tipo (Moan, 2001)

	Ultravioleta (UV)	Visível	Infravermelho (IV)
Fora da atmosfera	8%	39%	53%
Ao nível do mar	6%	52%	42%

A quantidade de luz direta depende de vários fatores tais como a posição da terra em relação ao Sol e a reflexividade das várias camadas interiores à atmosfera (nuvens, ar, etc.). A luz difusa é difícil de estimar uma vez que depende de vários fatores indiretos, tais como a densidade das nuvens, existência de chuva, entre outros.

¹ **Lumen** é a unidade de medida do fluxo luminoso e encontra-se definida no subcapítulo 2.4.1 – Parâmetros

² **Lux** é a unidade de medida da iluminância e encontra-se definida no subcapítulo 2.4.1 – Parâmetros

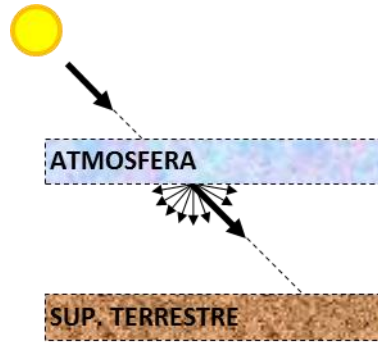


Figura 6 – Luz direta e difusa (transmitidas através da atmosfera).

Devido ao movimento de rotação própria da Terra e translação em relação ao Sol, a posição relativa entre o Sol e uma superfície arbitrária situada na superfície terrestre varia ao longo do ano. Essa posição é imprescindível à caracterização da intensidade e sentido dos feixes luminosos que atingem a superfície em estudo e por isso devem-se definir os seguintes eixos de referência e variáveis de interesse (Coelho, 2013):

- **Latitude (ϕ)** define-se como o ângulo entre a localização considerada e o Equador, medido através do meridiano do local. Convenciona-se que acima do Equador a latitude é positiva.
- **Longitude (l)** define-se como o ângulo entre a localização considerada e o meridiano de Greenwich.
- **Ângulo de incidência (θ)** define-se como o ângulo que a linha que une os centros do Sol e da Terra faz com a normal à superfície considerada.
- **Ângulo horário do Sol (ω)** define-se como o deslocamento angular do sol relativamente ao meridiano local devido à rotação da Terra. Toma o valor de zero ao meio-dia solar e varia 15° por hora em relação ao meio dia solar. Calcula-se da seguinte forma:

$$\omega = 15^\circ(t_s - 12)$$

$$t_s = t_{LST} + \frac{(l_{meridiano} - l_{local})}{15} + ET$$

$$l_{meridiano} = 15^\circ(t_{LST} - t_{LST-Greenwich})$$

$$ET = \frac{9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B}{60}$$

$$B = \frac{360(n - 81)}{364}$$

- **Ângulo de inclinação da superfície (β)** define-se como o ângulo entre a superfície considerada e o plano horizontal.

- **Declinação solar** (δ) define-se como o ângulo que a linha que une os centros do Sol e da Terra faz com o plano do Equador e define-se da seguinte forma:

$$\delta = 23.45^\circ \sin[360(284 + n)/365], \quad n = \text{número do dia do ano}$$

- **Ângulo azimutal da superfície** (γ) define-se como o ângulo que a linha que une o Norte e o Sul faz com a projeção horizontal da normal à superfície considerada.
- **Ângulo de altitude solar** (α) define-se como o ângulo que os raios solares fazem com o plano horizontal e define-se da seguinte forma:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

A luz natural que incide na janela de um espaço interior é invariavelmente de origem solar, mas dependendo das condições meteorológicas locais, a quantidade de luz pode ser afetada. Na **Tabela 2** são indicados os níveis típicos de iluminância para várias condições.

Tabela 2 – Características da luz natural (Skylight, 1998)

Condição	Tipo de radiação	Iluminância	Temperatura da cor ³
		[lx]	[K]
Sol ao meio dia	Direta	86.000 – 108.000	5.500
Sol no horizonte	Direta	32.000 – 86.000	2.000
Céu limpo	Difusa	11.000 – 22.000	10.000
Céu nublado	Direta, difusa	5.000 – 54.000	7.500

Com vista a auxiliar as estimativas de estudos luminotécnicos, a *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE) decidiu padronizar três níveis de condições do céu: céu limpo, céu encoberto e céu intermédio. De um modo simplista, as condições de céu limpo assumem que o céu se encontra sem nuvens e o Sol é visível. O céu encoberto assume condições de céu totalmente coberto por nuvens espessas e escuras cobrindo o Sol na sua totalidade e por este motivo, do ponto de vista do cálculo luminotécnico, é preferível utilizar este modelo uma vez que considera condições mais desfavoráveis de iluminação (antecipando resultados conservadores). O céu intermédio representa condições intermédias entre o céu limpo e céu encoberto. Esta padronização permite caracterizar as condições do céu de uma forma quantitativa, evitando deste modo erros de interpretação.

Como foi referido anteriormente, dentro do próprio compartimento, a radiação está sujeita a reflexões na envolvente interior e portanto parte da radiação transmitida pela janela é refletida pelo

³ A temperatura da cor é uma característica da luz visível, mede-se em Kelvin e representa a temperatura de um corpo negro para a qual a radiação emitida por ele é comparável à fonte de luz (Westinghouse, 2015)

chão, paredes interiores e teto. Athienitis et al., 2002, propõe que as contribuições são diferentes caso se trate de um dia de céu limpo ou encoberto. Na **Figura 7** esquematizam-se as várias proveniências da luz natural.

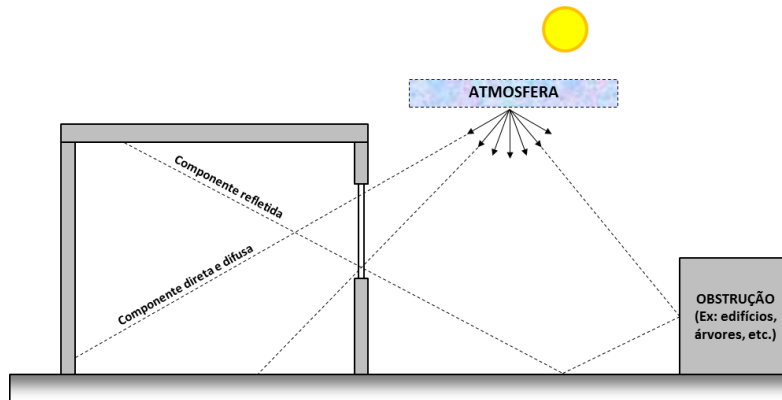


Figura 7 – Proveniência da luz incidente na janela de um compartimento

Nos dias de céu limpo existem contribuições de luz direta (radiação direta do Sol), luz difusa (proveniente da interação da atmosfera com a radiação direta) e luz refletida (devido à interação das superfícies com a luz direta e difusa), tal como descrito na **Equação [1]**, onde n representa o dia do ano (de 1 a 365), $F_{1/2}$ representa o fator de forma entre a superfície 1 e a superfície 2 e ρ_1 representa a reflexividade da superfície 1.

$$E_{janela_{limpo}}(n, t) = F_{j/céu} \cdot E_{hdifusa_{limpo}}(n, t) + F_{j/chão} \cdot \rho_{chão} \cdot E_{refletida_{limpo}}(n, t) + E_{hdireta_{limpo}}(n, t) \quad [1]$$

$$E_{janela_{limpo}}(n, t) = \text{Componente Difusa} + \text{Componente Refletida} + \text{Componente Direta}$$

Athienitis et al, 2002, sugere que em Nova Iorque a iluminância incidente numa superfície horizontal proveniente da radiação direta é estimada através da **Equação [2]**, onde $E_0 = 133\,800\,lx$ é a iluminância média numa superfície perpendicular aos raios solares e localizada fora da atmosfera, $f(n) = 1 + 0.033 \cos(360 \cdot n/365)$ representa um fator corretivo que tem em conta a trajetória elíptica da Terra em torno do Sol, c é o coeficiente de extinção atmosférica e $m(n, t) = 1/\sin(\alpha(n, t))$ é a massa ótica do ar.

$$E_{hdireta_{limpo}}(n, t) = E_0 \cdot f(n) \cdot e^{-c \cdot m(n, t)} \sin(\alpha(n, t)) \quad (lx) \quad [2]$$

Também é sugerido um modelo que estima a iluminância horizontal proveniente da luz difusa em dias de céu limpo, tal como indicado na **Equação [3]**.

$$E_{hdifusa_{limpo}}(n, t) = 800 + 15\,500 \cdot [\sin(\alpha(n, t))]^{1/2} \quad (lx) \quad [3]$$

Como foi referido, a componente refletida acontece devido à interação da luz direta e difusa com as superfícies e pode ser calculada através da **Equação [4]**, onde ρ_c é a reflexividade do chão exterior e $F_{j/c}$ representa o fator de forma entre a janela e este.

$$E_{refletida_{limpo}}(n, t) = \rho_{ch\tilde{a}o} \cdot (E_{h_{difusa_{limpo}}} + E_{h_{direta_{limpo}}}) \quad (lx) \quad [4]$$

Apesar da contribuição de luz direta ser significativa em termos relativos, se houver um sistema de sombreamento instalado (por exemplo persianas, estores, lamelas, etc.) a sua contribuição vai-se resumir apenas às reflexões entre as palhetas desse sistema e portanto irá deixar de ser relevante para os cálculos. Por esse mesmo motivo e apenas nestas condições, o efeito de $E_{h_{direta_{limpo}}}(n, t)$ no balando global descrito pela **Equação [1]** não será considerado. Utilizando as **Equações [2] a [4]** referidas anteriormente é possível caraterizar, para qualquer posição do Sol e num dia de céu limpo, as contribuições das várias componentes, tal como representado na **Figura 8**.

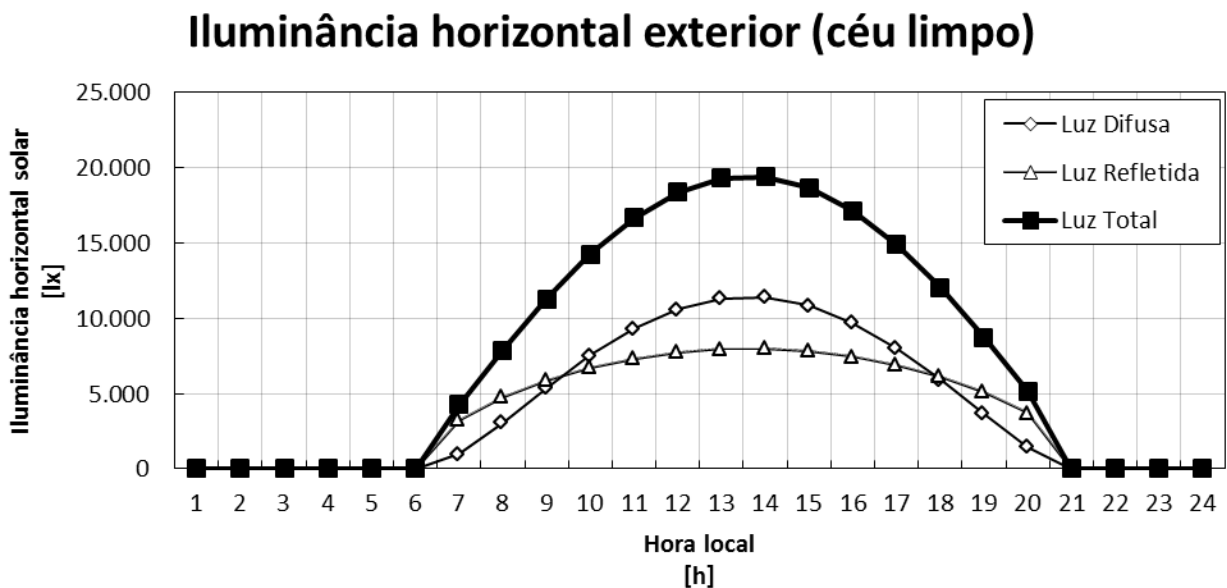


Figura 8 – Iluminância horizontal exterior em dias de céu limpo (componente direta não considerada)

Nos dias de céu encoberto apenas existem contribuições de luz difusa (proveniente da interação da atmosfera com a radiação direta) e luz refletida (devido à interação das superfícies com a luz difusa), tal como descrito pela **Equação [5]**.

$$E_{janela_{nublado}}(n, t) = F_{j/c\acute{e}u} \cdot E_{h_{difusa_{nublado}}}(n, t) + F_{j/ch\tilde{a}o} \cdot E_{refletida_{nublado}}(n, t) \quad (lx) \quad [5]$$

$$E_{janela_{nublado}}(n, t) = \text{Componente Difusa} + \text{Componente Refletida}$$

Athienitis et al., 2002, sugere um modelo que estima a iluminância horizontal proveniente da luz difusa em dias de céu encoberto, tal como indicado na equação [6].

$$E_{h_{difusa_{nublado}}}(n, t) = 1\,000 \cdot [0.3 + 21 \cdot \sin(\alpha(n, t))] \quad (lx) \quad [6]$$

Neste caso, não havendo influência da componente de luz direta, a luz refletida apenas acontece devido à luz difusa, tal como é indicado na equação [7].

$$E_{refletida_{nublado}}(n, t) = \rho_{ch\tilde{a}o} \cdot E_{h_{difusa_{nublado}}} \quad (lx) \quad [7]$$

Utilizando as **Equações [6] e [7]** no balanço de energia descrito na **Equação [5]** é possível caraterizar, para qualquer posição do Sol e num dia de céu encoberto, as contribuições das várias componentes, tal como representado na **Figura 9**.

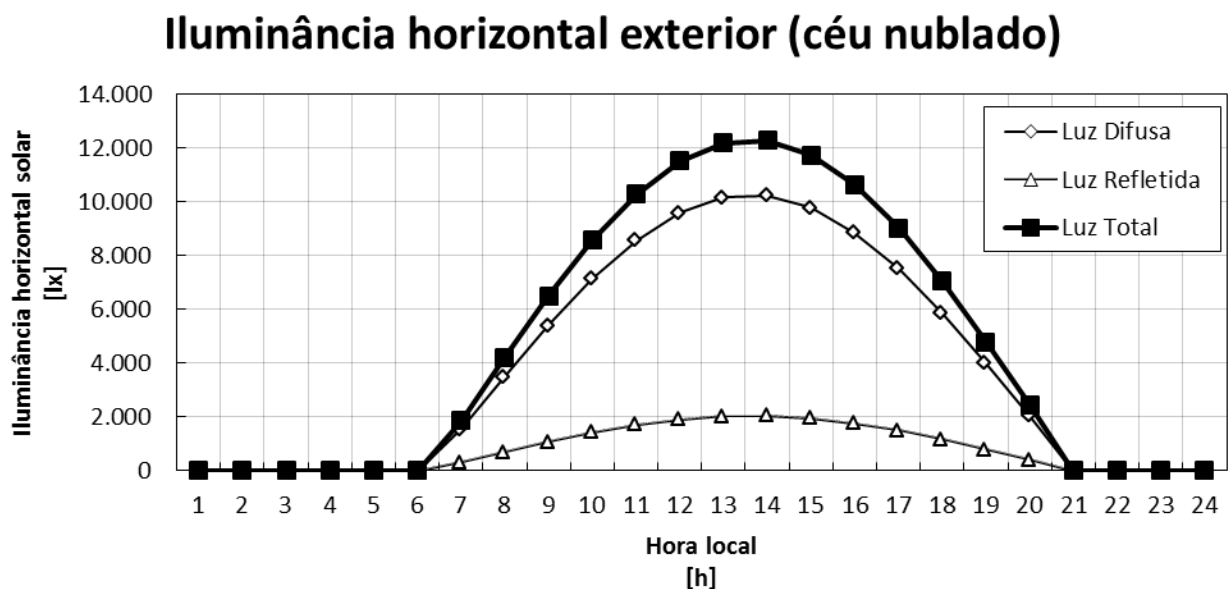


Figura 9 – Iluminância horizontal exterior em dias de céu nublado

Comparando a **Figura 8** com a **Figura 9** e tendo em conta que as correlações foram retiradas de um estudo feito em Nova Iorque, é possível anotar diversos fenómenos:

- Num dia de céu limpo, a luz difusa é responsável por cerca de 49% da iluminação total enquanto num dia de céu encoberto é responsável por 83%;
- Em termos qualitativos, a luz difusa em dias de céu nublado e limpo atingem níveis máximos semelhantes (entre os 10.000 e os 11.000 lx);

- Em média, os níveis de luz refletida em dias de céu limpo são 450 vezes superiores aos níveis em dias de céu encoberto, o que é explicado pelo facto de no dia de céu limpo haver uma forte contribuição de luz direta.

2.3. Propriedades da radiação

A quantidade e distribuição da luz num ambiente interior dependem fortemente do tipo de acabamento das superfícies interiores - paredes, teto e chão, móveis e equipamentos - devido às propriedades que cada material tem relativamente à radiação eletromagnética na gama do visível: reflexividade, absorvidade e transmissividade.

A **reflexividade** é uma propriedade que determina a porção de radiação incidente que é refletida por uma superfície e pode ser classificada do tipo especular, dispersa ou difusa. Na reflexão especular o ângulo de incidência é, em módulo, igual ao ângulo de reflexão e as características do feixe mantêm-se. Este tipo de comportamento acontece quando um feixe luminoso incide sobre uma superfície polida, tal como metais e espelhos (**Figura 10A**). A reflexão dispersa acontece devido a superfícies espelhadas mas irregulares onde um feixe luminoso dá origem a um cone constituído por vários feixes com diferentes propriedades do feixe incidente. O ângulo de reflexão principal do cone é igual ao ângulo de incidência mas as características dos feixes alteram-se (**Figura 10B**). A reflexão difusa acontece quando um feixe incidente é refletido igualmente em todas as direções, por exemplo, no caso de superfícies mate (**Figura 10C**). A combinação de todos estes tipos de reflexão dá origem à denominada reflexão combinada, que respeita a lei da conservação da energia, garantindo que toda a energia incidente é refletida. (Lighting Research Center, 2013)

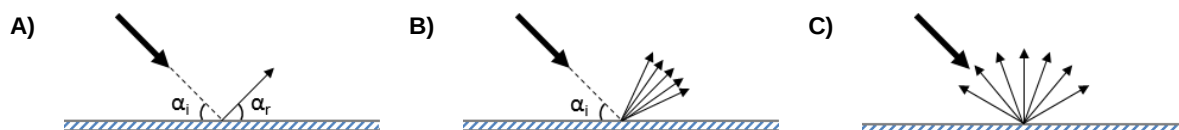


Figura 10 – Propriedades da luz – A) Reflexão especular; B) Reflexão dispersa; C) Reflexão difusa

Na **Tabela 3** indicam-se valores típicos de reflexividade para alguns materiais, onde 1 significa que toda a radiação foi refletida e 0 indica que nenhuma radiação foi refletida. A cor, o acabamento e a forma da superfície influenciam fortemente a reflexividade da mesma. (Coutinho, 2009)

Tabela 3 – Reflexividade típica de superfícies

Tipo de superfície	Descrição	Reflexividade
Tetos	Tinta branca em superfície lisa	0,8
	Tinta branca em tela acústica	0,7
Paredes	Tinta branca em superfície lisa	0,8
	Azulejo vidrado branco	0,4
	Tijolo ou cimento cinzento claro	0,4
Chão e mobiliário	Tela de papel	0,8
	Cimento cinzento claro	0,45
	Ladrilho de madeira	0,45
Outros	Asfalto	0,07
	Terra húmida	0,07
	Gravilha	0,13

A **absorvidade** é uma propriedade do material que determina a fração de radiação incidente que é absorvida por este. Esta radiação absorvida contribui para o aumento da energia interna da superfície ou material em questão, podendo o mesmo aumentar a temperatura, alterar a constituição química ou até observar-se uma alteração de estados (sólido, líquido ou gasoso). Por esse motivo, do ponto de vista da iluminação, o destino da radiação absorvida não é relevante.

A **transmissividade** é uma propriedade do material que determina a fração de radiação incidente na superfície que é capaz de atravessar o meio ao qual essa superfície é adjacente. Esta passagem pode ser do tipo direta ou por refração. A transmissão direta implica uma alteração do meio sem que haja mudança das propriedades óticas do feixe e portanto o ângulo de incidência mantém-se. A transmissão por refração acontece quando um feixe atravessa um meio composto por diversos materiais, isto é, diferentes densidades. Nesse caso, a velocidade do feixe diminui quando a densidade do meio aumenta e portanto o ângulo de incidência não se mantém constante.

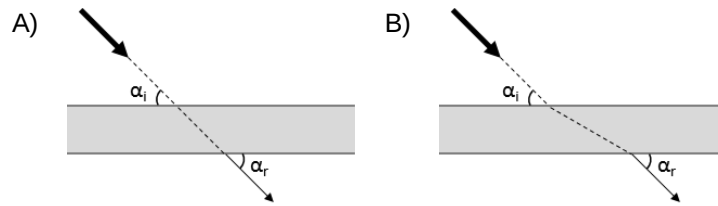


Figura 11 – Propriedades da luz – A) Transmissão direta; B) Transmissão por refração

Na maior parte dos materiais existentes verifica-se a ocorrência dos três fenómenos acima descritos. Considerando o balanço de energia radiativa indicado na **Figura 12**, de toda a energia radiativa incidente (G), uma parte é refletida (G_{ref}) e a restante pode ser absorvida (G_{abs}) e/ou transmitida (G_{tra}). Quando se observa a existência dos três fenómenos, o meio é denominado por semitransparente. Se não se observar o fenómeno da transmissão, o meio é considerado opaco.

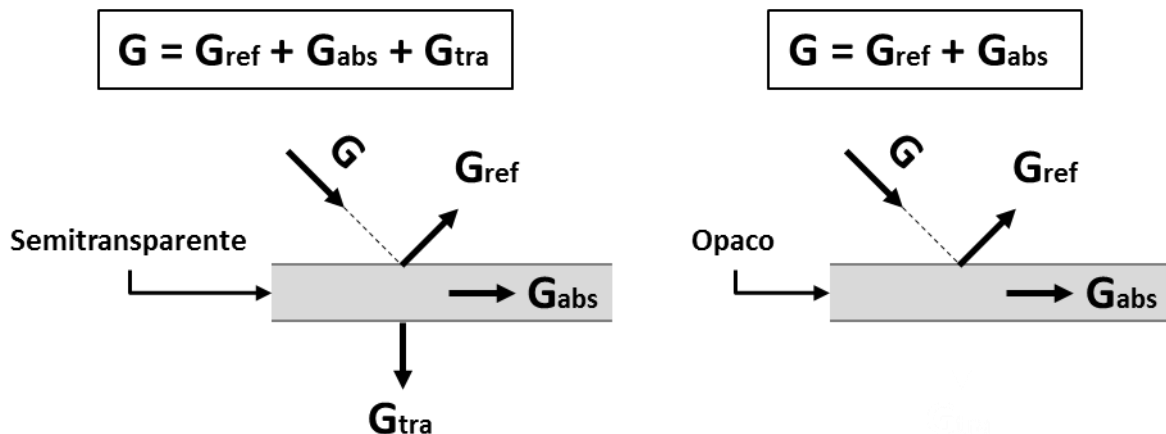


Figura 12 – Processos de absorção, reflexão e transmissão em meios semitransparentes e opacos

2.4. Iluminação interior

2.4.1. Parâmetros

A quantidade e qualidade de iluminação num escritório dependem de vários fatores tais como o preenchimento do espaço, reflexividade das superfícies, posição dos envidraçados, altura do posto de trabalho entre outros.

Iverson et al., 2013, fez duas simulações luminotécnicas para dois cenários distintos onde a única variação foi a reflexividade das superfícies. Na configuração inicial as reflexividades utilizadas foram 0,2, 0,5 e 0,7 para o chão, paredes e teto, respetivamente. Na configuração alternativa as

reflexividades utilizadas foram de 0,9 para todas as superfícies. A diferença de resultados entre as duas simulações foi de 22%, provando que efetivamente a correta escolha das propriedades dos materiais tem uma enorme influência nos cálculos luminotécnicos.

Athienitis et al., 2002, concluiu experimentalmente que para um certo sistema de vidro duplo, a variação da transmissividade ao longo de um dia de céu encoberto é desprezável, ou seja, independente do ângulo de incidência – $\tau(n, t) \approx \text{constante}$. Contudo, em condições de céu limpo, o seu valor já depende do ângulo de incidência, ou seja, da posição relativa do Sol em relação ao vão envidraçado – $\tau(n, t) \neq \text{constante}$.

Para que seja possível quantificar a luz mas também analisar a sua qualidade, é importante compreender alguns conceitos fundamentais:

O **ângulo sólido (Ω)** é definido como o ângulo que, tendo o seu vértice no centro de uma esfera de raio r , percorre uma determinada área A da superfície da mesma esfera. A unidade de medida do ângulo sólido é o esterradiano (st). Como referência, um esterradiano é o ângulo sólido que secciona a superfície esférica de tal forma que a área da seção é igual ao quadrado do raio da própria esfera.

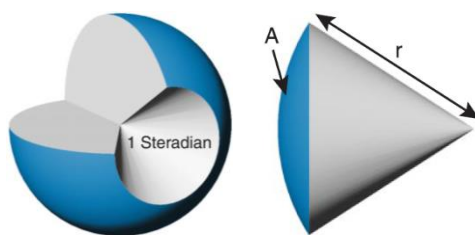


Figura 13 – Ângulo sólido (Ω) – (Ryer, 1998)

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (st)$$

O **fluxo luminoso (Φ)** é a quantidade total de luz emitida a cada segundo por uma fonte luminosa num determinado ângulo sólido. A unidade de medida do fluxo luminoso é o lúmen (lm). Como referência, um lúmen é o fluxo gerado num ângulo sólido de um esterradiano por uma fonte de intensidade luminosa igual a uma candela.

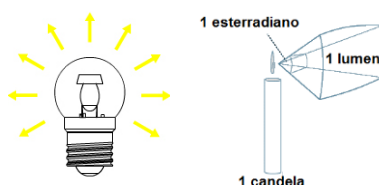


Figura 14 – Fluxo luminoso (Φ)

A **intensidade luminosa (I)** é a concentração de luz emitida por uma fonte luminosa numa direção específica do ângulo sólido. A unidade de medida da intensidade luminosa é a candela (cd).



Figura 15 – Intensidade luminosa

$$I = \frac{\phi}{\Omega} \quad (cd)$$

A **iluminância (E)** é o fluxo luminoso (ϕ) que incide sobre uma superfície de área A. A unidade de medida da iluminância é o lux (lx). Como referência, um lux é o nível de luz (iluminância) produzido por um lúmen numa área de um metro quadrado. Denomina-se iluminância média mantida (E_m) à iluminância média de uma superfície a uma determinada distância da(s) fonte(s) luminosa(s). A título de exemplo, quando se trata de escritórios, a medição deve ser feita à altura de 0,75 m.

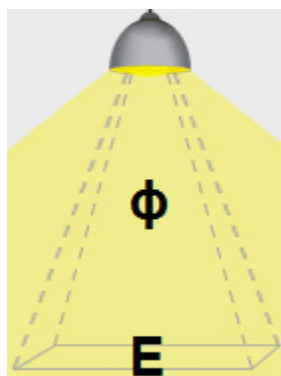


Figura 16 – Iluminância

$$E = \frac{\phi}{A}$$

A **luminância (L)** é o fluxo luminoso refletido por uma dada superfície de reflexividade ρ numa determinada direção. Em termos práticos esta grandeza quantifica a percepção que temos, por exemplo, de uma parede estar mais ou menos iluminada. A unidade da luminância é a candela por metro quadrado (cd/m^2).

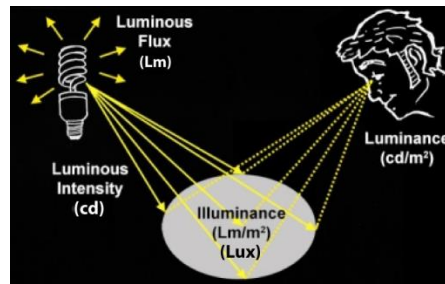


Figura 17 – Luminância

$$L = \frac{\rho E}{\pi} \quad (cd/m^2)$$

O **índice de encandeamento (UGR)** “expressa a probabilidade de encandeamento direto por parte das luminárias” (ETAP Lighting, 2012). O seu valor é calculado com base no rácio entre a luminância de uma luminária e a luminância do plano de fundo e portanto quanto mais alto for o seu valor, maior é a probabilidade de encandeamento. Tipicamente os fornecedores de luminárias fornecem esta informação em tabelas que relacionam a geometria da divisão e reflexividade das superfícies.

O **rácio de uniformidade mínima (U_0)** indica o grau de uniformidade de iluminância numa sala. Define-se pelo rácio entre a iluminância mínima (E_{min}) e a iluminância média mantida (E_m) à altura de 0,75 m.

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_m}$$

O **índice de restituição cromática (R_a)** indica a capacidade de uma lâmpada em reproduzir as cores o mais perto possível da luz natural. Toma valores de 0 a 100, onde 0 significa que não reproduz a luz natural e 100 significa que reproduz de igual forma a luz natural. Por exemplo, as lâmpadas incandescentes tinham um índice de reprodução cromática acima de 96 enquanto as lâmpadas fluorescentes não passam dos 70.



Figura 18 – Índice de restituição cromática

A **Tabela 4** indica os valores típicos de iluminância média mantida, índice de encandeamento, uniformidade mínima e índice de restituição cromática para vários ambientes de escritório. (ETAP Lighting, 2012).

Tabela 4 – Valores típicos de E_m , UGR, U_0 e R_a para ambientes de escritório (Norma EN12464)

Ambiente	E_m	UGR	U_0	R_a
Desempenho do trabalho, fotocópias, etc.	300	19	0,4	80
Escrita, digitação e leitura, processamento de dados num PC	500	19	0,6	80
Desenho técnico	750	16	0,7	80
Postos de trabalho CAD	500	19	0,6	80
Salas de conferências e reuniões	500	19	0,6	80
Secretárias de recepção	300	22	0,6	80
Arquivos	200	25	0,6	80

2.4.2. Eficiência de equipamentos de iluminação

O consumo energético de uma lâmpada depende de três fatores: condução, convecção e radiação. Enquanto a radiação na gama da luz visível é a responsável pela luz efetivamente obtida através da lâmpada, a radiação fora da gama da luz visível, a condução e a convecção são responsáveis por cargas térmicas adicionais. Fazendo um balanço energético global ao equipamento, é possível quantificar a sua eficiência.

Dependendo do tipo e tecnologia – incandescente, fluorescente, iodetos metálicos, LED, etc. – as contribuições de cada fator são significativamente diferentes. De acordo com Department of Energy, 2007, as lâmpadas fluorescentes tubulares e LED têm eficiências comparáveis, pois as tubulares convertem 21% da energia em forma de luz visível enquanto os LED convertem entre 15-25%. A Tabela 5 detalha os vários fatores de conversão para diversas tecnologias de lâmpadas. (Department of Energy, 2007)

Tabela 5 – Fatores de conversão de consumo energético para vários tipos de lâmpadas

	Incandescente	Fluorescente Tubular	Iodetos Metálicos	LED
Luz Visível	8%	21%	27%	15-25%
Radiação não visível	73%	37%	36%	~0%
Condução + convecção	19%	42%	37%	75-85%

2.4.3. Eficiência de equipamentos de controlo de iluminação

A quantidade de iluminação artificial necessária para cumprir os respetivos requisitos em edifícios depende de vários fatores, nomeadamente da tipologia e exposição solar do espaço, fração de vãos envidraçados, cor da envolvente opaca interior, etc. O consumo energético associado à iluminação artificial depende fortemente dos sistemas de controlo instalados, isto é, se a iluminação for acionada por um botão *on/off* manual, o mais certo é que existam períodos do dia em que apesar de não existirem ocupantes no espaço, a luz encontrar-se ligada. Por outro lado, se houver um sensor de presença ou de movimento, o consumo pode ser reduzido pois quando não existe ocupação, também não é detetado movimento. A desvantagem destes sistemas é que por vezes há ocupação mas não é detetado qualquer movimento e portanto a iluminação é desativada sem motivo. Existem ainda equipamentos que permitem analisar o nível de luminosidade média natural do espaço e consoante os requisitos, ativam ou não a iluminação. Contudo os modos de funcionamento da iluminação não precisam de ser apenas *on* ou *off*, isto é, podem ser utilizados sistemas que adaptam de forma contínua a iluminação artificial por forma a cumprir os requisitos especificados, compensando a iluminação natural. Como exemplo desta tecnologia existem os aparelhos de *dimming*, que por via da variação da tensão de entrada na lâmpada conseguem ajustar a intensidade luminosa da mesma. Esta variação pode ser definida através de uma tabela horária ou interligada a um sistemas dinâmico, tal como sensores de presença, luminosidade, calor, etc.

Um estudo realizado pelo departamento de engenharia arquitetónica da Universidade de Kyung Hee (Yun et al., 2012) mostra que num sistema tradicional *on/off*, a utilização de iluminação artificial em escritórios tem uma fraca dependência do nível de luminosidade exterior mas que, por outro lado, é altamente dependente dos padrões dos seus utilizadores, ou seja, o acionamento das luzes no interior dos escritórios é independente dos níveis de luminosidade interior. Desta forma, os sistemas de controlo tornam-se ferramentas importantes para a automatização da iluminação artificial, traduzindo-se em poupanças que podem ser elevadas.

Em ambientes de escritório e *openspace*, ao interligar o *dimming* da lâmpada a um sistema de controlo de presença ou luminosidade permite reduzir os consumos elétricos e consequentemente o nível de luminosidade em períodos em que não existem ocupantes ou a luminosidade proveniente do exterior através dos vãos envidraçados não é suficiente para cumprir os requisitos indicados pelas respetivas normas. Deste modo, o *dimming* das lâmpadas tem sido cada vez mais frequente em instalações onde se pretende atingir altos níveis de eficiência.

Athienitis et al., 2002, levou a cabo um modelo numérico com posterior validação experimental que consistiu em modelar os níveis de luminosidade interior através das equações de transmissão de radiação ao longo do dia, para que fosse possível minimizar a utilização de luz artificial através da utilização de sombreamento adaptativo e *dimming* individual das lâmpadas. Os resultados finais demonstraram que são necessários vários ajustes do sombreamento ao longo do dia de modo a que não haja, por um lado, excesso de luminosidade no interior e por outro lado, permita o

mínimo de transtorno visual aos ocupantes do espaço. Em termos energéticos, as poupanças podem ascender aos 75% em dias de céu nublado e 90% em dias de céu limpo, quando comparadas com uma situação típica em que não existe controlo de luminosidade e *dimming*. O erro do modelo numérico ascende aos 16% na proximidade da janela, o que acontece porque não se consideram as reflexões que acontecem nas palhetas das lamelas de sombreamento.

Os programas de simulação luminotécnica consideram que a função de *dimming* das lâmpadas tem um comportamento linear, ou seja, a variação da tensão de *input* é igual à variação do fluxo luminoso. Ozenc et al., 2014 demonstrou experimentalmente que o comportamento não é linear e portanto, considerando um perfil de *dimming* diário bem definido, os consumos reais são 28-44% superiores aos estimados pelo programa de simulação, caso se tratem de lâmpadas fluorescentes e 3-13% caso sejam lâmpadas de tecnologia LED. Deste modo, o impacto económico real é substancialmente superior ao estimado.

Aghemo et al., 2014, levou a cabo um teste piloto onde se procedeu à integração de sistemas de controlo e luz natural com a utilização de luz artificial. A experiência teve a duração de um ano e foi realizada num edifício composto por 10 escritórios, que se situam ao nível do rés-do-chão. Os vãos envidraçados desses escritórios são afetados por sombreamento exterior provocado por obstruções originadas por outros edifícios. O objeto de estudo foi a modernização do sistema de controlo e gestão centralizada bem como o *retrofit* dos equipamentos de iluminação, tais como lâmpadas e luminárias, de forma a ser possível controlar o sistema de AVAC e iluminação de uma forma quase autónoma. As ações de controlo foram definidas do seguinte modo: acionamento dos aparelhos de AVAC, acionamento das luminárias e regulação ou *dimming* da iluminação artificial. O *trigger* que permite desencadear estas ações provém das medições/registos de três tipos de sensores: sensor de luminosidade (LI04 Thermokon Sensor), sensor de movimento (WRD04 Thermokon Sensor PIR) e um sensor misto de luminosidade e movimento (MDS Thermokon Ceiling Multi-sensor 360°). O objetivo da experiência passava por analisar o consumo de energia elétrica associado ao sistema de iluminação com controlo integrado, verificando regularmente os níveis de performance a nível de funcionamento da iluminação e dos próprios instrumentos de medida. Após o sistema ter sido instalado e calibrado para corresponder aos requisitos pretendidos (iluminância média de 500 lx, percentagem de uniformidade superior a 70%, UGR inferior a 19 e índice de reprodução cromática (IRC) superior a 80), registaram-se, com uma resolução de 10 minutos, os valores de iluminância horizontal no plano de trabalho, iluminância no sensor de luminosidade, percentagem de *dimming* e consumo elétrico real. Uma outra componente estudada nesta instalação piloto foi a satisfação dos trabalhadores e para tal foram realizados inquéritos. Os resultados obtidos demonstram poupanças que podem ascender aos 17%, quando comparados a um sistema manual com interruptor e 32% quando comparados a um sistema que está sempre ligado durante o horário de trabalho.

Na **Tabela 6** encontra-se um quadro resumo com as vantagens e desvantagens das principais tecnologias existentes no mercado.

Tabela 6 – Resumo das vantagens e desvantagens das principais tecnologias existentes no mercado

		Tecnologia			
		Botão ON/OFF	Sensor de presença	Sensor de movimento	Dimming tradicional Dimming autónomo
Vantagens	Permite controlo fácil por parte do utilizador	Só é ativado quando é detetada uma presença	Só é ativado quando é detetado movimento	Permite regular nível de luz facilmente	Não permite regulação por parte do utilizador
	Instalação barata	Não é necessário detetar movimento			Poupanças elevadas pois há uma constante adaptação dos níveis
Desvantagens	Sem mecanismo de desativação automática	Sem opções intermédias para os níveis de luz	Em espaços de pouco movimento pode desligar mesmo na presença de pessoas	Níveis de luz iguais para todas as luminárias (depende da instalação elétrica)	Instalação mais cara e demorada
	Potencial de poupança baixo porque depende do utilizador	Difícil cobrir igualmente toda a área de um compartimento	Difícil cobrir igualmente toda a área de um compartimento		

2.5. Técnicas de projeto luminotécnico

Como foi referido anteriormente, os espaços interiores estão sujeitos a determinadas condições de iluminação, nomeadamente os níveis mínimos obrigatórios ou recomendados. Esses níveis são ou devem ser regularmente verificados pelos departamentos de segurança e saúde no trabalho e no caso de não serem cumpridos, devem ser tomadas ações e medidas corretivas. Por este motivo, o projeto luminotécnico de espaços interiores deve ser feito de uma forma cuidada e rigorosa. As técnicas de projeto luminotécnico para espaços interiores podem ser classificadas em dois tipos, métodos simples e métodos complexos.

2.5.1. Métodos simples de projeto luminotécnico

Os métodos simples de projeto luminotécnico permitem que, com o mínimo de detalhe e conhecimento técnico, seja possível estimar os níveis de iluminância num determinado espaço. Estes métodos servem também para estimar a quantidade de luminárias a instalar num compartimento tendo em conta diversas restrições e condições. Os métodos simples são: método das cavidades (ou *lumens*), método ponto a ponto, método da potência específica por área e método das tabelas.

2.5.1.1. Método das cavidades

O método das cavidades é utilizado para calcular a iluminância média num compartimento tendo em conta a emissão uniforme proveniente de lâmpadas quer incandescentes, fluorescentes ou outras. Baseando-se em tabelas fornecidas pelos fornecedores das lâmpadas/luminárias, este método assume que um compartimento pode ser dividido em três cavidades distintas: superior, intermédia e inferior, tal como indicado na **Figura 19**.

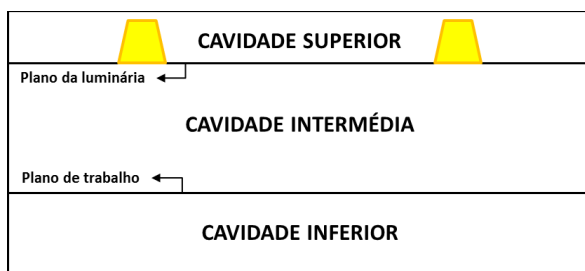


Figura 19 – Identificação das cavidades superior, intermédia e inferior

A altura da cavidade superior vai desde as luminárias ao teto. Se as mesmas forem encastradas no teto, considera-se que a cavidade superior é zero. A altura da cavidade inferior vai desde o chão à altura de trabalho. Analogamente, se não se considerar superfície de trabalho, a cavidade inferior é nula.

A Sociedade de Engenharia de Iluminação (IES) desenvolveu um procedimento para o cálculo da iluminância média mantida que, de um modo geral, segue as seguintes etapas:

1. Definição do tipo de atividade em vigor no compartimento em estudo e respetivas restrições de níveis de iluminação;
2. Determinação de fatores ponderadores com base em tabelas e que se relacionam com a idade típica dos ocupantes e tarefas realizadas;
3. Cálculo dos rácios das cavidades de teto, sala e chão de acordo com fórmulas definidas que relacionam altura da sala com dimensão da cavidade;
4. Cálculo das reflexividades gerais das superfícies;
5. Cálculo do coeficiente de utilização;
6. Cálculo do fator de decaimento luminoso (LLF) tendo em conta a idade da lâmpada, sujidade da luminária entre outros;
7. Cálculo do número de luminárias necessárias;
8. Cálculo do fluxo luminoso total;
9. Cálculo da iluminância média.

A grande desvantagem do método das cavidades é que não permite responder a questões tais como qual a influência direta de uma determinada luminária num ponto especificado.

2.5.1.2. Método ponto a ponto

O método ponto a ponto permite calcular de uma forma expedita a iluminância num determinado ponto considerando a influência de uma determinada fonte. As grandezas necessárias para o cálculo são a intensidade luminosa da luminária, a distância da luminária ao ponto em estudo e a orientação da superfície onde o ponto se encontra. A metodologia utilizada neste método encontra-se descrita detalhadamente no seguimento da tese mas de um modo geral, são seguidas as seguintes etapas:

1. Definição e caracterização dos pontos em estudo relativamente à fonte luminosa (distância e inclinação);
2. Pesquisa nos diagramas luminotécnicos das luminárias pela intensidade luminosa correta e adequada consoante o ponto em estudo;
3. Cálculo da iluminância estimada através da lei do inverso quadrado, que relaciona a intensidade luminosa com a distância ao ponto em estudo e a respetiva inclinação.

2.5.1.3. Método da densidade de potência

O método da densidade de potência é um método que permite calcular a iluminação a instalar num determinado compartimento tendo em conta fatores tais como os níveis de iluminação exigidos (E_m), a potência das luminárias, a existência e potência dos equipamentos de controlo (P_n e P_c respetivamente) e a área do compartimento (A). F_o e F_D representam fatores multiplicativos associados à existência e tipo de equipamentos de controlo, tal como está descrito na **Equação [8]**.

$$DPI = \frac{(P_n F_o F_D) + P_c}{A} \quad (W/m^2)$$
$$\frac{DPI}{100 \text{ lux}} = \frac{DPI}{E_m} 100 \quad \left(\frac{W}{m^2 \cdot 100 \text{ lx}} \right)$$
[8]

A portaria P349D do RECS sugere valores típicos de DPI, F_o e F_D , os quais estão definidos no **Anexo D**. Como exemplo, as salas de aula não devem ultrapassar os 2,8 $DPI/100 \text{ lx}$.

2.5.1.4. Método das tabelas

O método das tabelas é, de todos, o que permite estimativas mais rápidas de cálculos de projeto luminotécnico. Essas tabelas contêm informação da iluminância média mantida desejada, dimensões do compartimento em estudo e distância entre luminárias e pode ser utilizado para estimar

níveis de iluminância médios de compartimentos pequenos ou grandes e até para pontos. Na **Figura 20** encontra-se um exemplo de tabela. Deve-se ter especial atenção quando as dimensões do compartimento e/ou características das lâmpadas/luminárias não correspondem aos das tabelas disponíveis.

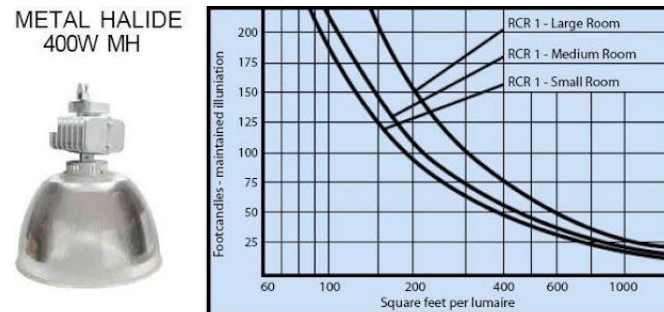


Figura 20 – Exemplo de tabela de iluminâncias para lâmpada de iodetos metálicos

2.5.2. Métodos complexos de simulação luminotécnica

Os *softwares* de simulação luminotécnica têm vindo a ser desenvolvidos afincadamente nos últimos anos. Estes *softwares* são capazes de estimar os níveis de iluminação detalhados num compartimento, tendo em conta diversos fatores, tais como a orientação, a fração de vãos envidraçados, as características radiativas das paredes, chão e teto mas também a localização geográfica e clima local.

Os resultados e a precisão das simulações dependem de vários fatores tais como o método de cálculo, o modelo do céu, o modelo do edifício, as propriedades da superfície e até a experiência do utilizador. (Iverson et al., 2013)

Alguns dos métodos de cálculo mais significativos são o *split flux formula*, radiosidade, *ray tracing* e mapeamento de fotões.

2.5.2.1. Split flux formula

Este método consiste num algoritmo que tem origem numa metodologia de cálculo manual definida pela BRE (*Building Research Establishment*). Segundo este, o nível de iluminação global num certo ponto é composto pelo somatório de três componentes distintas: componente direta proveniente do Sol e componente indireta proveniente das reflexões internas e externas (**Figura 21**). Cada componente é calculada individualmente e seguidamente somada. A componente de reflexão interna é estimada através de uma fórmula que tem em conta a reflexividade média das superfícies interiores, a área de envidraçado e um fator corretivo para as obstruções exteriores. Uma vez que os resultados são baseados em muitas aproximações, é natural que a precisão não seja grande e como

tal, o método só devolve resultados satisfatórios quando aplicado em compartimentos simples onde os vãos envidraçados são paralelas às paredes.

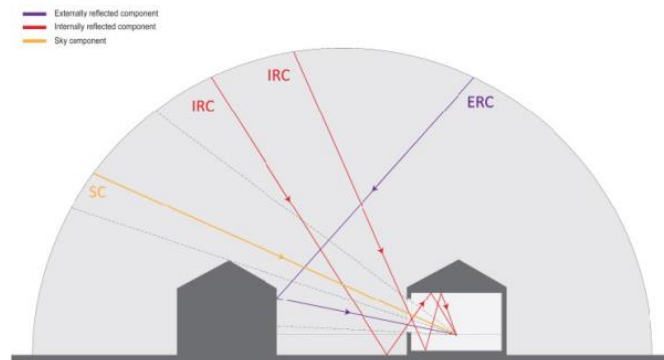


Figura 21 – Componentes da iluminação consideradas pelo método split flux formula

2.5.2.2. Radiosidade

O método da radiosidade é um algoritmo capaz de estimar cenários considerando sombras e luz difusa. Consiste na aplicação de um método de elementos finitos onde são calculados os fatores de forma entre todas as superfícies existentes no compartimento e a iluminação final em cada elemento consiste no somatório de todas as contribuições (**Figura 22**). A particularidade deste método é que considera as superfícies puramente difusas. Essas superfícies podem ser subdivididas em secções tão pequenas quanto se queira, melhorando assim a precisão, com a desvantagem de exigir maior poder computacional.

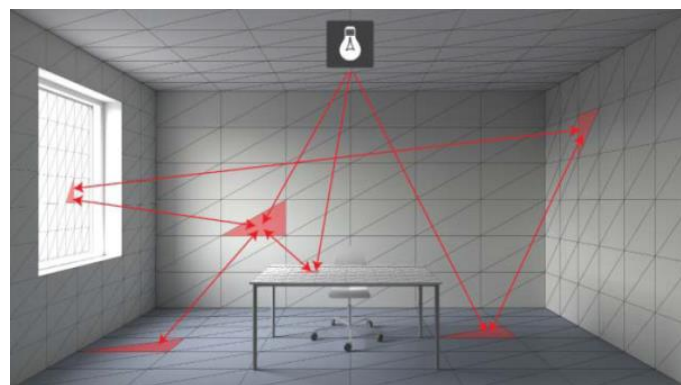


Figura 22 – Exemplo de aplicação do método da radiosidade

2.5.2.3. Ray tracing

O método de *ray tracing* é uma técnica de renderização baseada no rastreamento dos feixes luminosos emitidos numa determinada situação. Este rastreamento pode ser feito no sentido direto

(origem na fonte luminosa) ou sentido inverso (origem no ponto da superfície em estudo). Este método permite ter em conta os fenómenos de reflexão, transmissão e refração e portanto é adequado quando são estudados ambientes com materiais complexos, tais como vidro.

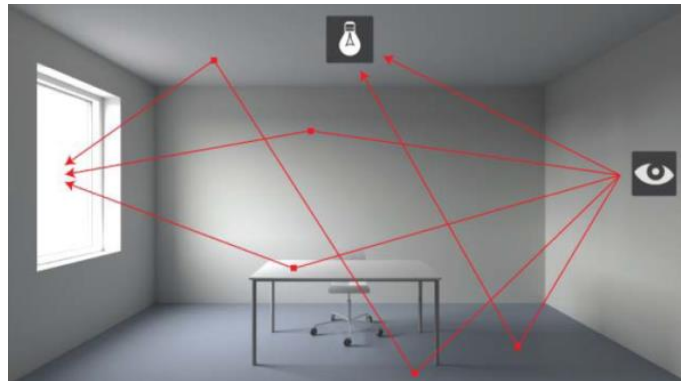


Figura 23 – Exemplo de aplicação do método ray tracing

2.5.2.4. Photon Mapping

O método do mapeamento de fótons é uma técnica de renderização que usa o método do ray tracing de um modo bi-direcional, isto é, numa primeira etapa os níveis de iluminação são calculados baseando-se nas fontes luminosas. Numa segunda etapa os níveis de iluminação que entretanto foram guardados temporariamente são atualizados tendo em conta a superfície em estudo. Este método permite a simulação de cenários muito complexos.

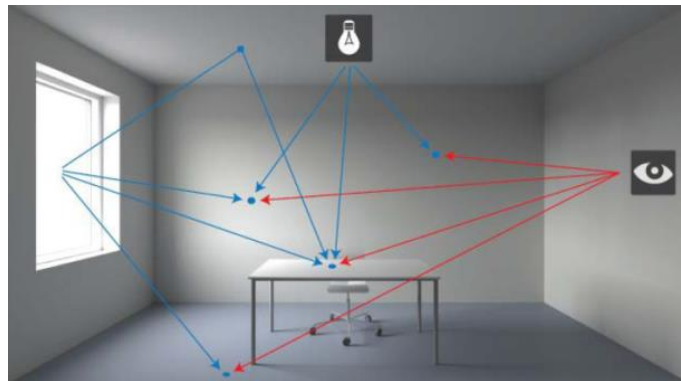


Figura 24 – Exemplo de aplicação do método *photon mapping*

3. MODELO TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo detalhar todo o modelo teórico responsável pelo cálculo da distribuição de iluminação num compartimento. Essa iluminação é proveniente de duas origens distintas: natural (Sol) e artificial (luminárias). Enquanto a luz natural só é parcialmente controlável pelo homem dentro de um compartimento através da utilização de sistemas de sombreamento, a luz artificial é passível de o ser, por exemplo, através de sistemas autónomos de *dimming*. Nos próximos subcapítulos vão ser apresentados os algoritmos e fundamentos teóricos utilizados na ferramenta de apoio à gestão de iluminação, que, como referido anteriormente, se propõe não só a simular um sistema inteligente de *dimming* mas a controlar em *real-time* as condições de iluminação de uma sala. Os modelos terão como base as características geométricas do compartimento e tecnologia das luminárias. O controlo em tempo real utilizará um sensor de luminosidade que mede, de forma instantânea, o nível de luz interior, atuando diretamente nas luminárias instaladas. O intervalo entre medições pode ser ajustado pelo utilizador, tendo em conta não só fatores de ordem técnica, pois o tempo de vida útil de uma lâmpada diminui com o número de ciclos, mas também a necessidade de adaptação constante às condições de iluminação exterior. Considera-se que um período de 15 minutos é adequado a este controlo.

3.1. Iluminação natural

A componente de iluminação natural irá ser calculada através do método da radiosidade, que é um método baseado no princípio da conservação da energia e que permite o cálculo da distribuição de iluminação num espaço fechado. Uma vez que a geometria do compartimento e as suas características têm uma grande influência neste método, os subcapítulos seguintes vão detalhar todos os passos necessários à sua aplicação. O algoritmo simplificado encontra-se representado na **Figura 25**.

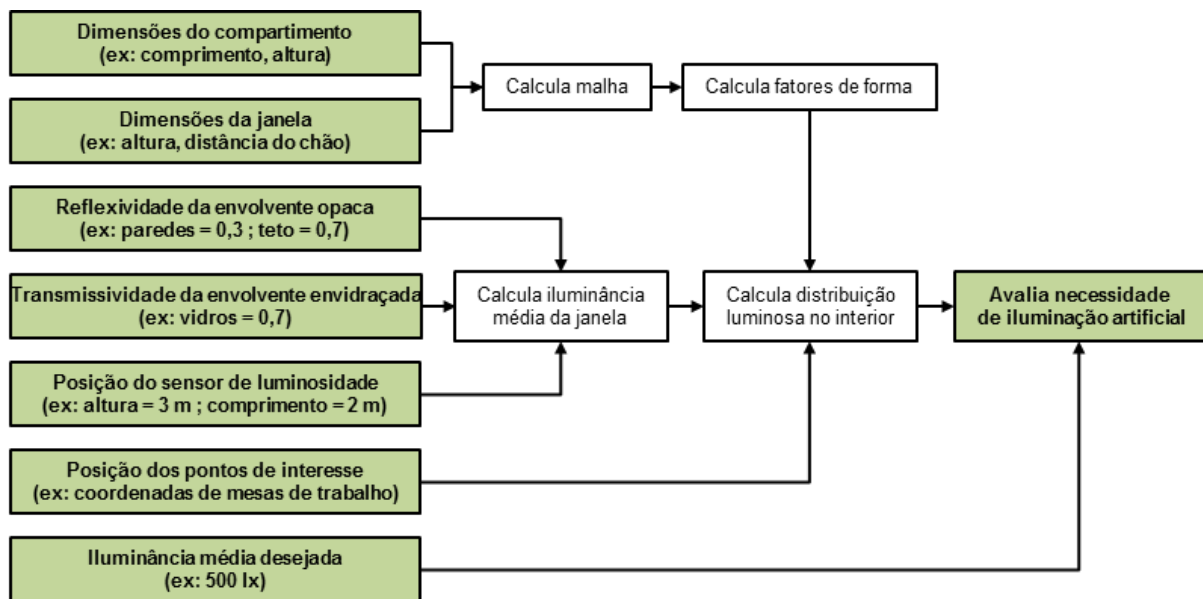


Figura 25 – Algoritmo simplificado de cálculo de iluminação interior

3.2. Método da radiosidade

O método da radiosidade é um algoritmo que se baseia no princípio da conservação da energia e é capaz de calcular a distribuição de iluminação num compartimento fechado tendo em conta a influência de luz proveniente de uma fonte (i.e. janela, claraboia, etc.).

Os resultados deste método variam fortemente com as dimensões do compartimento, ou seja, para duas fontes iguais (de igual intensidade), os resultados de distribuição de iluminação podem ser totalmente diferentes consoante as geometrias. Por esse motivo torna-se necessário fazer uma caracterização pormenorizada não só das dimensões físicas do espaço (i.e. comprimento, altura, etc.) mas também das propriedades óticas (reflexividade e transmissividade) da envolvente opaca interior e vãos envidraçados.

A aplicação deste método implica o cálculo de fatores de forma. Um fator de forma F_{ij} define-se como o fluxo radiativo (ex: luz ou calor) que parte da superfície i e interceta a superfície j . Cada uma destas superfícies é considerada uniforme e por isso as propriedades são constantes na sua totalidade. Cada fator de forma está associado a uma superfície e no limite, um compartimento sem janelas e de geometria paralelepipedica (6 superfícies) apenas necessitaria de 6 fatores de forma. Contudo se essa situação se verificasse os resultados seriam pouco precisos. Surge então a necessidade de dividir as superfícies genéricas em superfícies mais pequenas. Na **Figura 26** encontra-se um exemplo onde as superfícies genéricas foram subdivididas em pequenos elementos sendo deste modo possível, por exemplo, calcular a influência que o subelemento 1 da superfície horizontal tem no subelemento 22 da superfície vertical. No entanto, embora o aumento do número de divisões (malha mais refinada) aumente a precisão e detalhe do método, o poder computacional

requerido também aumentará exponencialmente. Consoante as aplicações, deve-se exigir maior ou menor refinamento, tendo sempre em conta o compromisso entre o tempo de processamento e a precisão necessária.

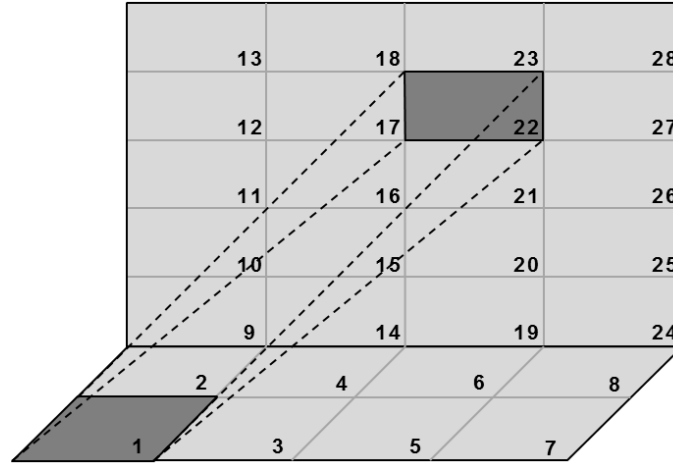


Figura 26 – Exemplo de fator de forma entre o elemento 1 e o elemento 22

A forma genérica de calcular fatores de forma encontra-se descrita na **Equação [9]** e **Figura 27**.

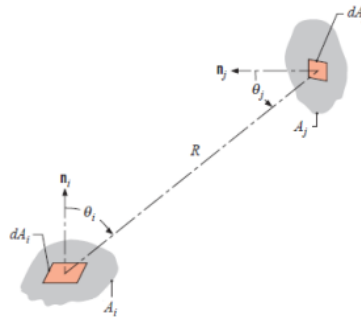


Figura 27 – Fator de forma associado à troca de radiação entre as superfícies elementares de áreas dA_i e dA_j

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad [9]$$

Este método admite tantas fontes de radiação quanto se queira, tais como janelas, claraboias no teto ou entradas de luz indireta, contudo a forma como foi implementado computacionalmente apenas permite uma fonte de luz (uma janela).

O cálculo dos fatores de forma entre superfícies está sujeito a algumas regras:

1. Conservação da energia: $\sum_i F_{ij} = 1$
2. Reciprocidade $A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$
3. Superfície não emite para ela própria $F_{ii} = 0$
4. Simetria $F_{ij} = F_{jk}$

Usando os fatores de forma, a iluminância final em cada superfície i interior (M_i) é calculada através da **Equação [10]**, onde ρ representa a reflexividade da superfície i .

$$M_i = M_{i_0} + \rho_i \sum M_j \cdot F_{ij} \quad (lx) \quad [10]$$

Este sistema pode ser escrito na seguinte forma matricial:

$$M_0 = (I - T) \cdot M \quad (lx)$$

onde M_0 representa a matriz de iluminâncias iniciais das superfícies, I é uma matriz identidade, M é a matriz de iluminâncias finais das superfícies e T é calculado da seguinte forma:

$$T_{ij} = \rho_i \cdot F_{ij}$$

A matriz M é calculada da seguinte forma:

$$M = (I - T)^{-1} \cdot M_0 \quad (lx)$$

Para cada ponto interior, a iluminância (E) é calculada da seguinte forma:

$$E_{interior} = \sum M \cdot F_{ij} \quad (lx)$$

Neste caso, $E_{interior}$ representa a matriz de iluminâncias finais associadas a um ponto interior, M é a matriz de iluminâncias finais das superfícies e F_{ij} são os fatores de forma entre os elementos de superfície e os pontos considerados.

3.2.1. Geometria

Como foi referido anteriormente, a geometria do espaço em estudo é extremamente relevante para a precisão dos resultados.

O programa está preparado para analisar resultados de uma sala paralelepípedica com as dimensões genéricas e os eixos de referência representados na **Figura 28**. As faces 1 a 4 identificam as paredes e as faces 5 e 6 identificam o teto e chão, respetivamente. Apenas deve existir uma superfície envidraçada e esta deve-se localizar na face 1. Foi escolhida esta forma por representar a generalidade das salas de aulas e gabinetes do Instituto Superior Técnico.

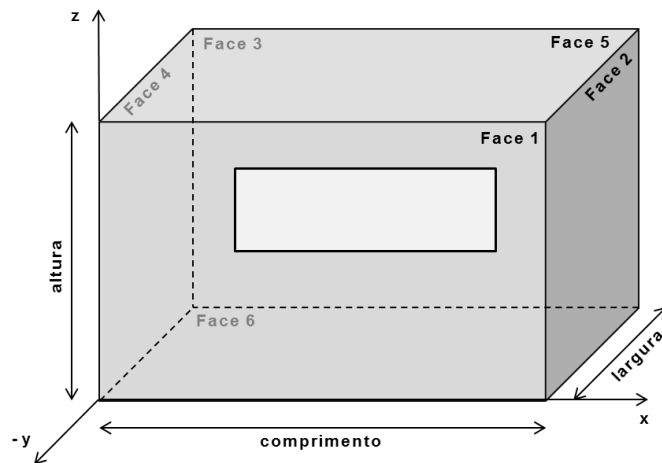


Figura 28 – Dimensões genéricas de um compartimento

3.2.2. Envolvente opaca

A reflexividade interior da envolvente opaca depende do revestimento/cor das superfícies. Existem valores típicos médios tabelados para esta propriedade (**Tabela 3**), contudo é possível estimar o seu valor médio através da **Fórmula [11]**, que segue o procedimento esquematizado na **Figura 29**.

$$\rho = \frac{E_2}{E_1} \cdot 100 \quad [11]$$

E_1 e E_2 representam a iluminância que chega e parte da superfície i , respetivamente.



Figura 29 – Iluminância na direção da face (E_1) e em direção oposta (E_2)

3.2.3. Envidraçados

O envidraçado que o programa considera pode ter qualquer dimensão e disposição. Para definir concretamente a sua posição deve ser feito um *input* com as dimensões c_1 , c_2 , a_1 e a_2 , representando respetivamente a distância da janela à parede, comprimento da janela, distância da janela ao chão e altura da janela. Na

Figura 30 estão esquematizadas as dimensões genéricas de um vão envidraçado.

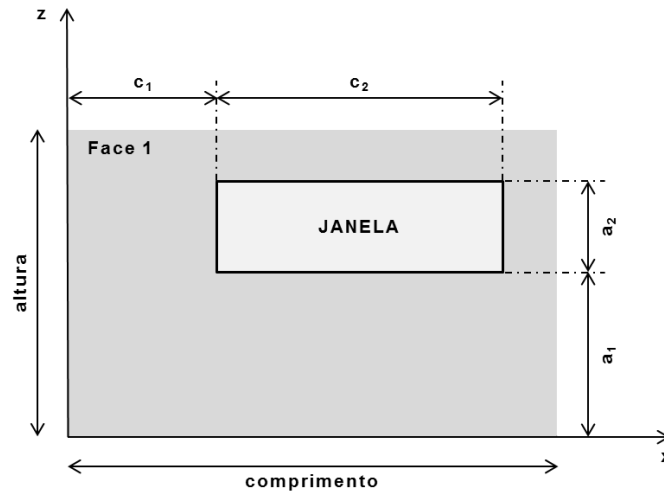


Figura 30 – Dimensões genéricas de um vão envidraçado

A transmissividade do vão envidraçado depende das propriedades óticas dos seus constituintes e tipicamente é uma característica do fabricante. Por forma a estimar o seu valor pode ser utilizada a **Fórmula [12]** que se baseia numa metodologia em tudo semelhante à utilizada para calcular a reflexividade e que está representada na **Figura 31**:

$$\tau = E_2/E_1 \cdot 100 \quad [12]$$

E_1 e E_2 representam a iluminância que chega e parte do vão envidraçado i , respetivamente.



Figura 31 – Iluminância na direção da face (E_1) e em direção oposta (E_2)

3.2.4. Malha

Como foi referido anteriormente, de um modo geral, com uma malha mais refinada é possível obter resultados mais precisos. No entanto esse refinamento paga-se em tempo de computação que aumenta significativamente. Deste modo decidiu-se deixar a cargo do utilizador a definição da dimensão da malha desejada para os três eixos – x (c_{malha}), y (l_{malha}) e z (a_{malha}). Contudo, foi implementada uma verificação para não permitir a utilização de uma malha maior que a dimensão global respetiva. O algoritmo de construção da malha está detalhado nas subseções seguintes.

3.2.4.1. Eixo x

Optou-se por criar diferentes algoritmos de geração de malha, consoante a janela esteja centrada ou não. O motivo desta decisão prende-se com questões computacionais, pois considerando uma malha simétrica para uma janela centrada, as incógnitas reduzem-se a metade e portanto o poder computacional também. Para o caso de janelas descentradas já não foi possível seguir essa lógica. Em ambos os casos são utilizados elementos de dimensão fixa (c_{malha}) sempre que possível, tal como representado na **Figura 32** e **Figura 33** e tendo em atenção que devem ser definidos nós pelo menos na distância da janela à parede (c_1) e comprimento da janela (c_2).

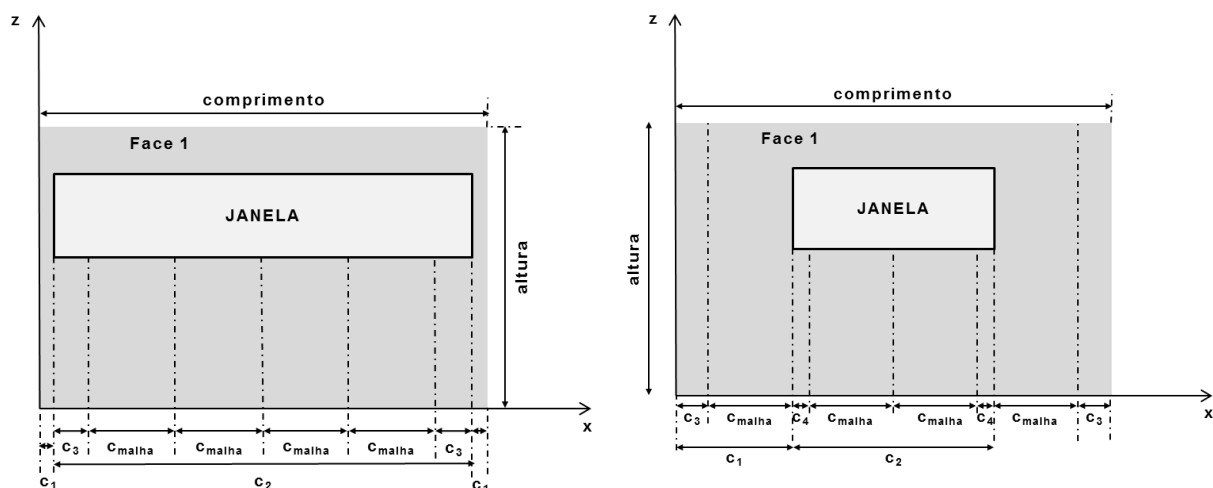


Figura 32 – Malha genérica ao longo do eixo x (janela centrada)

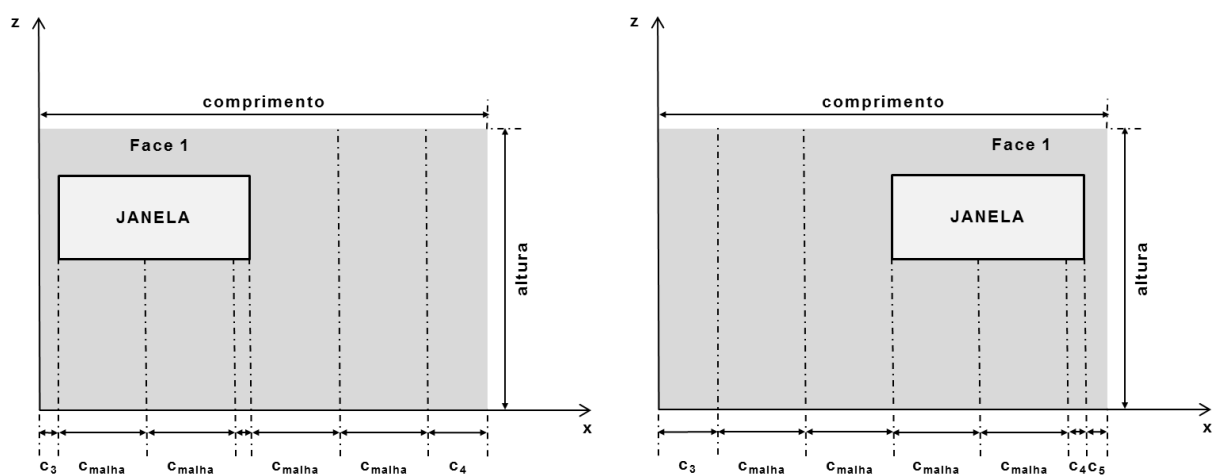


Figura 33 – Malha genérica ao longo do eixo x (janela descentrada)

3.2.4.2. Eixo y

Ao longo deste eixo não existem nós obrigatórios e por isso é possível criar uma malha simétrica e deste modo diminuir o trabalho computacional (à semelhança da malha ao longo do eixo x em casos de janelas centradas). É utilizada uma dimensão de malha fixa (l_{malha}) sempre que possível.

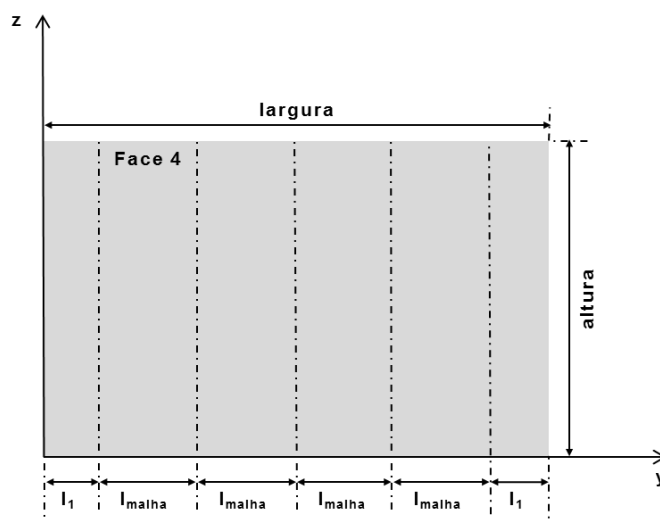


Figura 34 – Malha genérica ao longo do eixo y

3.2.4.3. Eixo z

Ao longo deste eixo existem três pontos de referência onde devem ser definidos nós. Essas alturas são a altura do posto de trabalho (a_{pt}), a distância da janela ao chão (a_1) e a altura da janela (a_2). É utilizada uma dimensão de malha fixa (a_{malha}) sempre que possível.

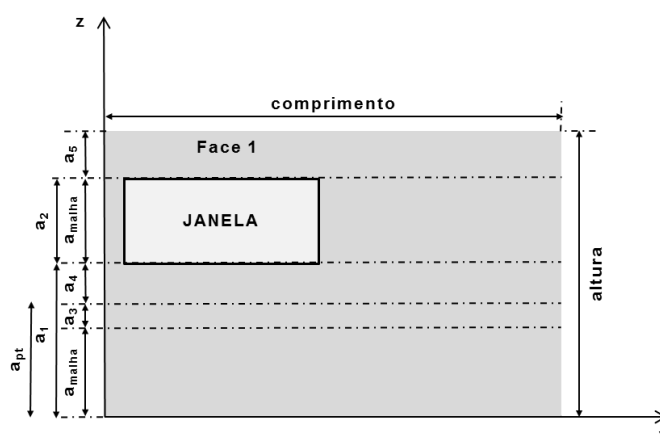


Figura 35 – Malha genérica ao longo do eixo z

3.2.5. Iluminação exterior

O modelo teórico implementado, como já foi descrito anteriormente, considera uma fonte de luz proveniente de uma janela. Essa fonte de luz é, naturalmente, proveniente do Sol e varia não só consoante a hora do dia mas também com as condições climáticas.

Inicialmente considerou-se utilizar as **Equações [1] e [5]** para estimar a iluminância incidente na janela. Estas equações teriam em conta a posição do Sol e a orientação do envidraçado e dispensariam a utilização de qualquer sensor de luminosidade para que o programa funcionasse em pleno. Contudo após algumas medições de verificação foi possível concluir que apresentavam um erro médio de 173%, tal como é mostrado na **Figura 36**. Este erro, embora sendo facilmente explicável (as correlações foram criadas tendo em conta medições feitas no Canadá), não era comportável para os resultados esperados do programa. O cálculo de correlações próprias para Lisboa não era viável uma vez que seria necessário uma amostra estatisticamente relevante de medições de iluminância para vários tipos de céu. Por motivos de polivalência do programa decidiu-se manter este método de cálculo, permitindo que se no futuro forem calculadas correlações do tipo já referenciado, estas possam ser implementadas rapidamente.

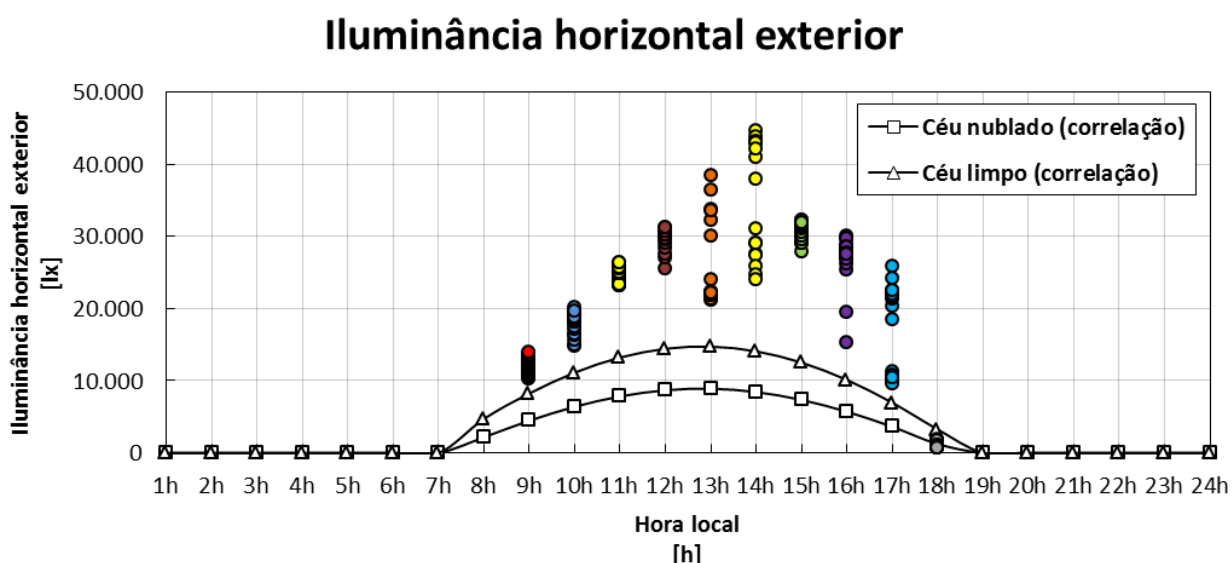


Figura 36 – Verificação do erro associado às correlações propostas (os pontos coloridos representam medições experimentais)

Alternativamente ao primeiro método, considerou-se a utilização de um sensor de luminosidade que seria instalado na janela para medir a iluminância transmitida através da mesma. Esse valor seria indicativo a fonte luminosa e posteriormente calcular-se-ia a distribuição na sala. Contudo este método também não se mostrou eficaz pelo seguinte motivo: ao existir um sistema de sombreamento (ex: lamelas), a posição das mesmas influencia fortemente o registo do sensor mesmo que não influencie da mesma forma a iluminação interior. Imagine-se um exemplo em que, devido à configuração das lamelas, existem raios solares a incidir diretamente no luxímetro. Neste caso as medições vão aumentar significativamente (para mais de 100.000 lx) mas esse valor não seria representativo da iluminância média na janela (**Figura 37**). Deste modo, não havendo forma de relacionar o registo medido pelo sensor com a iluminância média da janela, considerou-se este método inviável.

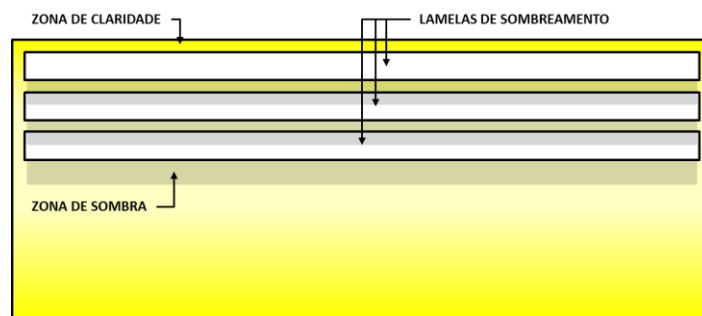


Figura 37 – Ilustração de janela com lamelas de sombreamento a cobrir cerca de 50%

Por fim decidiu-se fazer testes a um outro método, que considera os registos de um luxímetro instalado no teto da sala. A posição pode ser definida aleatoriamente, contudo prevê-se que se for numa zona central, o erro será menor. Tendo o registo do teto memorizado, o programa itera vários valores de iluminância média da fonte luminosa (vidro) até chegar ao valor efetivamente medido. Este método mostrou-se bastante robusto porque além de permitir instalar o luxímetro numa posição à escolha (desde que se configure as suas coordenadas no programa), também permite calcular um valor médio de iluminância à janela que já tem em conta a influência dos mais variados fatores, tais como sombreamento exterior, originado por edifícios, florestação e até meios de sombreamento forçado, como persianas, estores e outros.

3.2.6. Iluminação artificial

A componente de iluminação artificial irá ser calculada através do método ponto a ponto, que se baseia nas características luminotécnicas das luminárias para o cálculo da iluminância em qualquer ponto do espaço. Definindo **cenário** como as condições de iluminação artificial em vigor durante um período de 15 minutos, o algoritmo de controlo de iluminação irá, para cada cenário, calcular as condições necessárias ao cumprimento dos requisitos luminotécnicos. Maior detalhe pode ser encontrado nos subcapítulos seguintes. O algoritmo simplificado encontra-se representado na **Figura 38**.

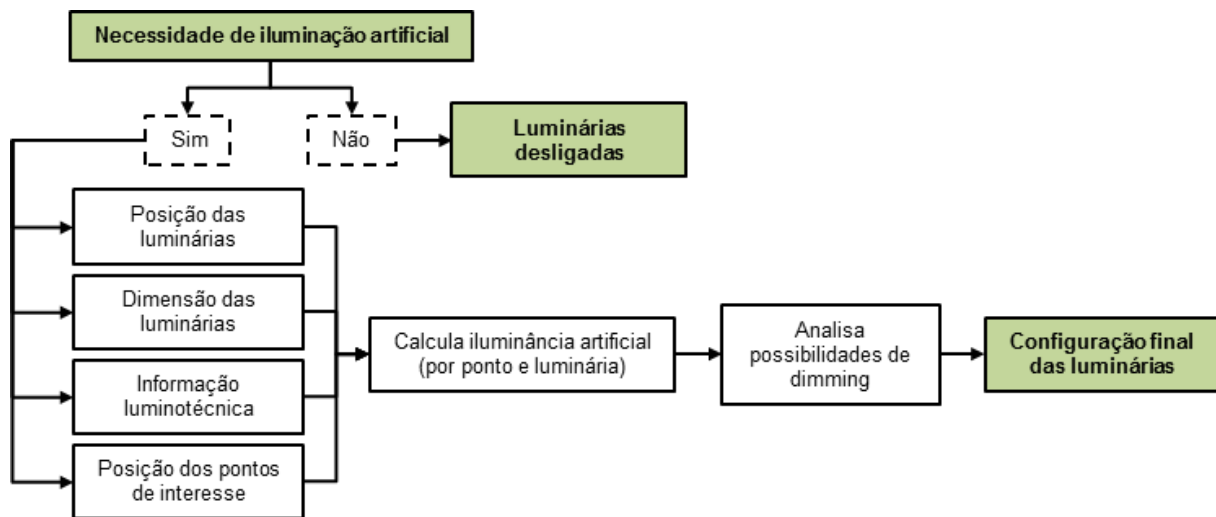


Figura 38 – Algoritmo simplificado de cálculo de iluminação artificial

3.3. Método ponto a ponto

O método ponto a ponto permite estimar a influência de uma luminária na iluminação de um ponto, tendo em consideração a intensidade luminosa, a distância ao ponto e o ângulo entre os dois tal como está representado na **Figura 39**. O cálculo é feito através da lei do inverso do quadrado da distância que está descrita na **Equação [13]**, onde I representa a intensidade luminosa (cd), E representa a iluminância (lx), d representa a distância entre a luminária e o ponto de interesse (m) e θ representa o ângulo entre eles.

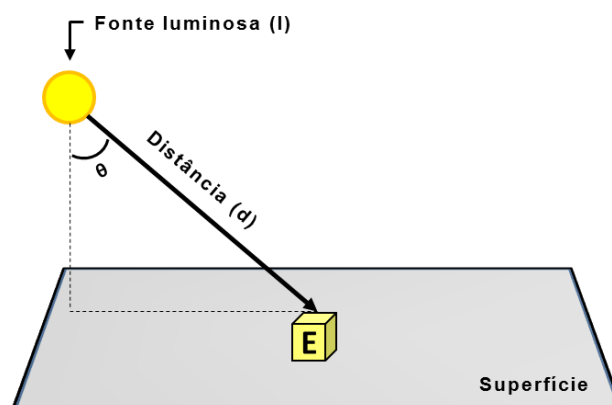


Figura 39 – Grandezas consideradas para o método ponto a ponto

$$I = \frac{E \cdot d^2}{\cos \theta} \quad [13]$$

As características luminotécnicas das luminárias são frequentemente caracterizadas por gráficos fotométricos. Esta informação é fornecida pelos fabricantes e deve ser importada para o programa através de *IESNA Photometric File* (extensão “.ies”). Um ficheiro fotométrico deste tipo caracteriza a intensidade luminosa de uma luminária numa determinada direção. (Design, 2012) O ponto em análise define-se pelo ângulo de orientação do plano que contém a luminária e o próprio ponto (α) e também o ângulo que esse ponto faz com a vertical (β), tal como indicado na **Figura 40**.

Os valores de intensidade luminosa disponibilizados podem ser absolutos (em candelas) ou relativos (em candelas por quilolumens). Ambos os casos baseiam-se em condições específicas de teste, isto é, a marca, modelo e fluxo nominal das lâmpadas deve ser especificado (por exemplo lâmpada do tipo T8 de 36 W e 3350 lm nominais(Radium Die Lichtmarke, 2015)). Contudo, se a intensidade for absoluta, esses valores só são válidos quando as condições reais são idênticas às condições de teste, ou seja, a marca, modelo e fluxo nominal das lâmpadas serem as mesmas. Se a intensidade for relativa significa que é baseada no fluxo nominal da lâmpada utiliza nas condições de teste, por exemplo, 200 cd/klm significa que por cada 1000 lm de fluxo da lâmpada (em termos nominais) a luminária produz 200 cd. Esta segunda escala – relativa – tem vindo a ser cada vez mais utilizada pelos fabricantes uma vez que torna possível o cálculo da intensidade luminosa para qualquer instalação, independentemente do fluxo nominal da lâmpada.

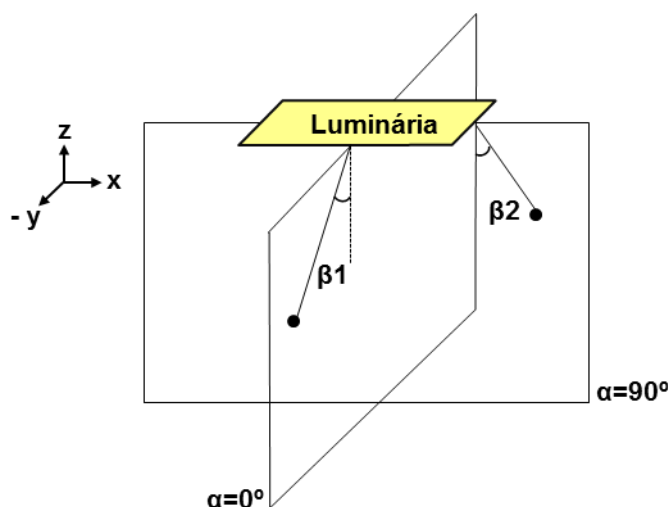


Figura 40 – Orientação espacial de um ponto aleatório em relação à luminária e sua caracterização

Por norma o fabricante estuda as luminárias para várias orientações α e β . Sabendo o valor da intensidade luminosa para essas orientações e fazendo uso da lei do inverso do quadrado da distância (*inverse square law*), é possível estimar a iluminância de qualquer ponto a uma distância d da fonte luminosa.

A localização dos pontos de interesse a analisar é definida pelo utilizador e varia de compartimento para compartimento. Foram programados dois métodos para facilitar a inserção de

dados. O método 1 define pontos espaçados 2 metros entre si, de forma automática (**Figura 41**). O método 2 permite definir a localização dos pontos manualmente e foi programado para responder à necessidade de em certos compartimentos haver zonas de passagem, zonas “mortas” ou zonas com armários que não necessitam de atingir o nível de iluminância definido (**Figura 42**).

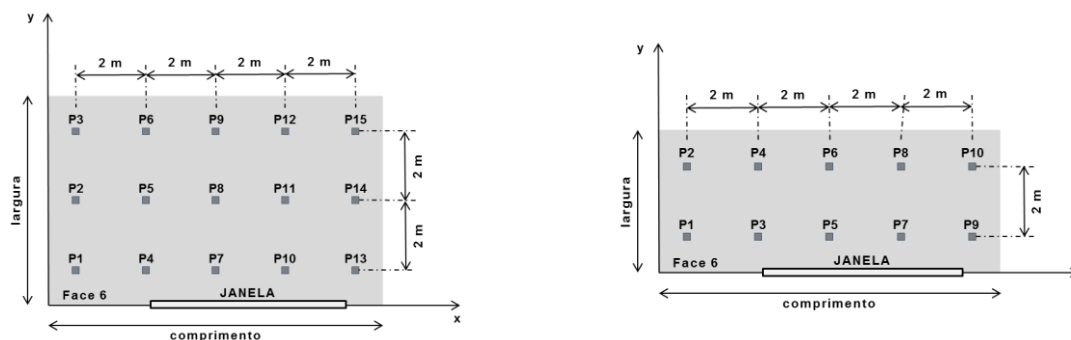


Figura 41 – Localização dos pontos de controlo de iluminância de acordo com o método 1

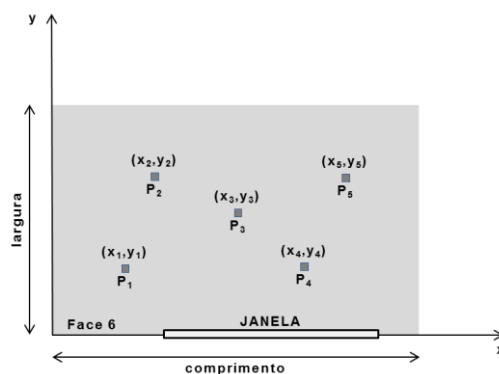


Figura 42 – Localização dos pontos de controlo de iluminância de acordo com o método 2

Optou-se por implementar um sistema de cálculo de iluminância no simulador que utiliza secionamento de zonas (**Figura 43**), ou seja, de acordo com a posição do ponto em estudo (distância e orientação em relação à luminária), assim o programa calcula a intensidade luminosa associada a essa direção e consequentemente a iluminância atingida. A metodologia utilizada para cálculo da intensidade luminosa em qualquer direção encontra-se indicada na **Figura 44**.

Seção 3	Seção 6	Seção 9
Seção 2	Luminária Seção 5	Seção 8
Seção 1	Seção 4	Seção 7

Figura 43 – Seccionamento de zonas

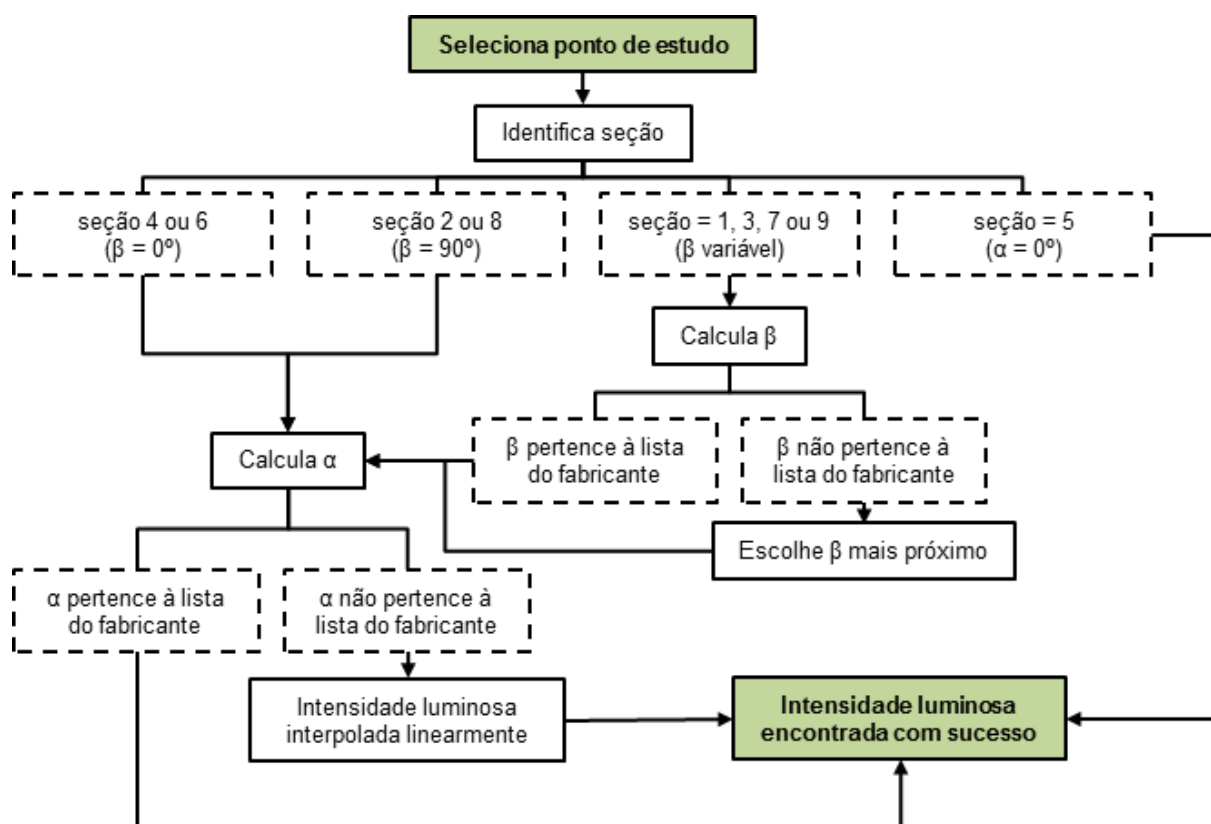


Figura 44 – Algoritmo de cálculo de iluminância artificial

Por motivos vários, as características das lâmpadas instaladas nas luminárias podem não corresponder às características das lâmpadas testadas pelo fabricante. Esses motivos podem ser por exemplo a lâmpada não ser nova e o seu fluxo ter-se degradado, haver sujidade no difusor da luminária, o balastro estar em más condições, entre outros. Por forma a garantir que o simulador trabalha com as intensidades luminosas reais e adequadas aos casos de estudo, decidiu-se programar um procedimento de calibração que segue a seguinte metodologia:

1. Definir uma distância d_{ref} que seja viável para medir o nível de iluminância, utilizando um luxímetro. Esta distância deve dizer respeito a um ponto que se localize por baixo da luminária, ou seja, $\beta = 0^\circ$;
2. Registrar iluminância $E_{i,j}$ a uma distância d_{ref} da luminária (com *dimming* a 100%), sendo i a identificação da luminária e j o número do registo, de tal forma que o número total de registos é dado por N_I ;
3. Introdução dos registos no simulador.
4. Cálculo automático da média de iluminância de referência, $E_{ref} = \frac{\sum_{i=1} \sum_{j=1} E_{i,j}}{N_I}$;
5. Cálculo da intensidade luminosa média de referência associada às luminárias, I_{ref} através da **Equação [14]**.

Deve-se notar que como, como em qualquer dos registos anteriores, a medição é feita por baixo da luminária $\beta = 0^\circ$, para qualquer plano α o fluxo é aproximadamente o mesmo.

$$I_{ref} = \frac{E_{ref} \cdot d_{ref}^2}{\cos\beta} = E_{ref} \cdot d_{ref}^2 \quad (cd) \quad [14]$$

Sabendo a razão entre a intensidade luminosa relativa teórica para qualquer orientação, I_{rel} e a intensidade luminosa relativa teórica para as condições de referência $I_{rel_{ref}}$ (para $\beta_{ref} = 0^\circ$), é possível recalcular as intensidades reais, através da **Equação [15]**.

$$I_{real}(\alpha, \beta) = \frac{I_{rel}(\alpha, \beta)}{I_{rel_{ref}}(\beta_{ref} = 0)} \cdot I_{ref} \quad (cd) \quad [15]$$

3.4. Distribuição de luminárias

O modelo desenvolvido considera uma distribuição uniforme de luminárias tanto ao longo do comprimento como da largura. É definido o número de luminárias ao longo do comprimento (eixo x) e largura (eixo y) bem como as distâncias c_{L1} , c_{L2} , l_{L1} e l_{L2} . A orientação das mesmas é mantida constante e pode – a pedido do utilizador – ser paralela ou perpendicular à janela. Na **Figura 45** apresentam-se dois esquemas possíveis do posicionamento das luminárias.

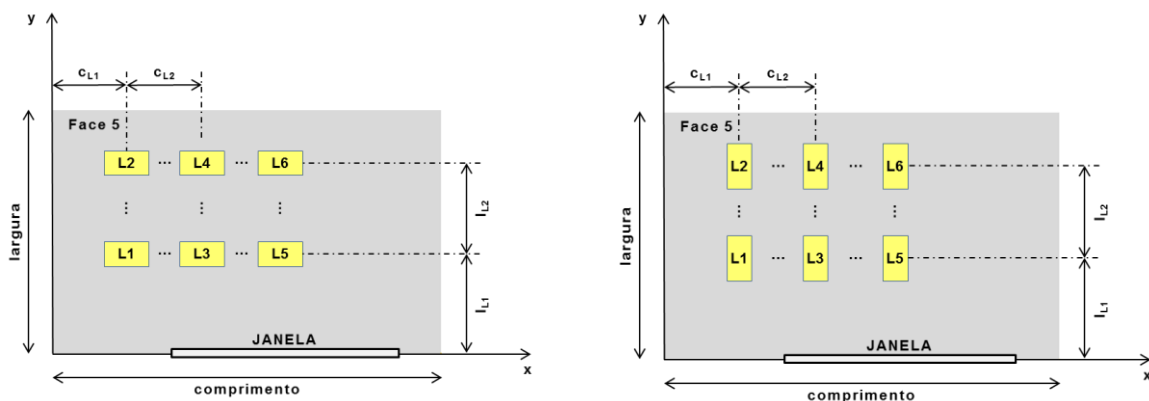


Figura 45 – Exemplos de possíveis distribuições de luminárias

3.5. Dimming

A eficácia luminosa de uma lâmpada ou luminária é a relação entre o fluxo luminoso emitido e a potência elétrica consumida e não é constante para todos os níveis de *dimming*. (Ozenc et al., 2014) provou que a curva de eficácia de uma lâmpada é do tipo polinomial de 2ª ordem através de uma instalação experimental. Contudo esta curva depende de vários fatores tais como o tipo de balastro, marca, modelo entre outros. Por forma a calibrar da melhor forma o modelo, decidiu-se implementar um procedimento de cálculo da curva de eficácia média das luminárias em estudo, que segue a seguinte metodologia:

1. Definir uma distância d_{ref} que seja viável para medir o nível de iluminância, utilizando um luxímetro. Esta distância deve dizer respeito a um ponto que se localize por baixo da luminária, ou seja, $\beta_{ref} = 0^\circ$;
2. Registrar iluminância $E_{L_i D_j}$ a uma distância d_{ref} da luminária, sendo L_i a identificação da luminária e D_j o nível de *dimming*;
3. Introdução dos registos no simulador;
4. Cálculo da curva de eficácia através do método dos mínimos quadrados;
5. Cálculo de fluxo luminoso médio associado às luminárias, consoante o nível de *dimming*.

O método dos mínimos quadrados é um método estatístico que permite estimar parâmetros desconhecidos de uma regressão (polinomial, exponencial, logarítmica, etc) tendo em conta a minimização das diferenças entre os registos reais e os registos obtidos através dessa aproximação. Essas diferenças são denominadas por resíduos. O coeficiente de determinação, vulgarmente chamado de R^2 , é uma medida da qualidade da regressão, indicando a capacidade da mesma

representar os valores reais. O seu valor varia entre 0 (pouco representativo) e 1 (muito representativo).

3.6. Controlo da iluminação

Como tem vindo a ser referido, a iluminação interior é passível de ser calculada através do método ponto a ponto. Sabendo as características das luminárias e a localização dos pontos, a aplicação do método é direta. Contudo, uma vez que o objetivo do projeto é criar um sistema de controlo inteligente de luminárias através de *dimming*, há muitas alternativas para se atingir o fim pretendido.

Uma **configuração global de *dimming***, N_{dg} , define-se como um conjunto de configurações individuais de *dimming*, N_{di} , que, num certo instante (cenário), contribuem para a iluminação artificial de um espaço. O número máximo de configurações globais de *dimming* é dado por $N_{di}^{N_L}$ e pode facilmente ascender aos milhões de combinações possíveis, dependendo do grau de discretização dos níveis de *dimming*. Considere-se que N_L representa o número de luminárias instaladas no compartimento e N_{di} representa os níveis de *dimming* individuais possíveis – 0%, 25%, 50%, 75% ou 100%. Se por exemplo, $N_L = 6$ e $N_{di} = 5$, vão haver $N_{di}^{N_L} = 5^6 = 15.625$ configurações possíveis de *dimming*.

Tabela 7 – Exemplo de configuração global de *dimming* para compartimento com 6 luminárias

Luminária	1	2	3	4	5	6
<i>Dimming</i>	50%	25%	75%	75%	100%	0%

De todas as configurações globais possíveis há que filtrar aquelas que, por um motivo ou outro não cumprem os requisitos, por exemplo, por não permitirem atingir os níveis de iluminação necessários ou por não serem a configuração que minimiza o consumo energético global.

O conjunto de regras utilizado para calcular a configuração global de *dimming* mais adequada encontra-se representado na **Figura 46** e será detalhado nos subcapítulos seguintes.

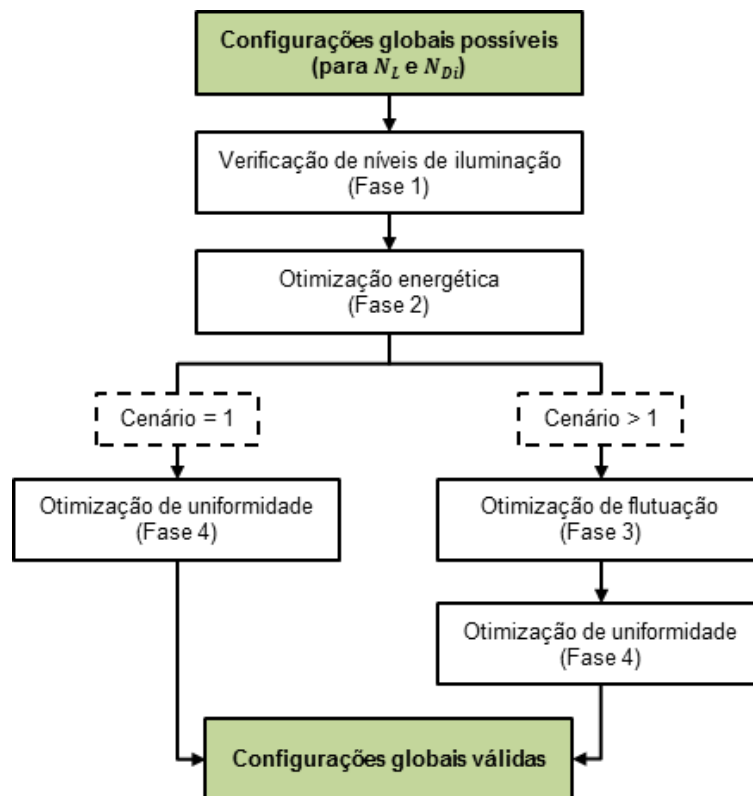


Figura 46 – Regras aplicadas à seleção das configurações globais válidas

3.6.1. Fase 1 (Verificação de níveis de iluminação)

Uma vez que nesta fase já foi calculada a iluminação artificial mínima necessária para que cada ponto de interesse atinga o nível luminoso adequado, resta saber quais das configurações globais de *dimming* são válidas. Contudo, consoante a situação, nem todas são válidas, isto porque nem todas permitem que os pontos de interesse atinjam os níveis luminosos esperados. Esta primeira fase permite eliminar as configurações globais que não atendem ao compromisso, diminuindo assim as alternativas.

3.6.2. Fase 2 (Otimização energética)

Um dos principais objetivos a que este projeto se propõe é diminuir os consumos energéticos associados à iluminação tendo como base um sistema de controlo capaz de calcular as necessidades de iluminação artificial para compensar o défice de iluminação natural num compartimento.

Apesar das combinações globais de *dimming* provenientes da fase 1 respeitarem os requisitos de iluminação a nível dos pontos de interesse, nem todas têm o mesmo consumo energético. Este conceito é fácil de perceber através do seguinte exemplo:

Considere-se a configuração aleatória esquematizada na **Figura 47**, onde L1-L6 simbolizam as luminárias e P1-P13 simbolizam os pontos de interesse onde a iluminância é calculada.

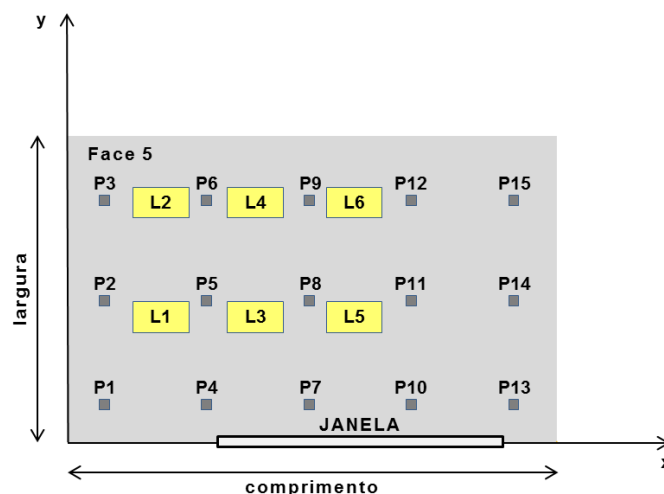


Figura 47 – Configuração aleatória de luminárias e pontos de controlo de iluminância

Imagine-se o cenário em que a iluminância natural do ponto P15 está abaixo do valor recomendado (por exemplo 500 lx). Nesse caso há necessidade de compensação de luz através de iluminação artificial ($E_{art} > 0 = cte$). Duas das hipóteses possíveis seriam iluminar P15 através da luminária 4 ou 6. Sabendo que tanto a distância d como a orientação β das luminárias em relação ao ponto são diferentes ($d_{L4-P15} > d_{L6-P15}$ e $\beta_{L4-P15} < \beta_{L6-P15}$), a intensidade luminosa teria que ser maior em L4 que em L6 e portanto seria mais dispendioso (em termos energéticos) garantir a iluminação de 500 lx em P15 através da luminária 4.

Embora o exemplo supracitado seja simples, porque apenas foi considerado um ponto e duas luminárias, ao considerar-se uma sala como a representada na **Figura 47**, a escolha deixa de ser óbvia. O que se faz nesta fase é então analisar todas as combinações provenientes da fase 1 e selecionar as que consomem menor quantidade de energia. Desta maneira é possível excluir configurações globais de *dimming* que, apesar de garantirem os níveis de iluminação recomendados, têm um consumo energético excessivo e desnecessário.

3.6.3. Fase 3 (Otimização da flutuação)

Denomina-se **flutuação individual** como o módulo da variação do nível de *dimming* individual de uma luminária entre dois cenários sequenciais e **flutuação global** como a soma das flutuações entre duas configurações globais entre dois cenários sequenciais. Esta grandeza, numa perspetiva prática, indica se, em dois cenários sequenciais, foi necessário alterar mais ou menos a configuração. No limite, se a flutuação global for zero é porque a configuração global se manteve.

Tendo em conta a forma como a grandeza foi definida, é importante referir que caso o cenário seja o primeiro do dia, a fase 3 não se aplica, passando diretamente à fase 4, tal como está descrito na **Figura 38**.

Decidiu-se implementar este tipo de otimização porque a fase 2 pode devolver mais do que uma configuração global possível e com este algoritmo é possível escolher, de todas as configurações de menor energia, aquelas que minimizam a flutuação em relação à configuração anterior. Esta fase é importante pois dois motivos, primeiro porque ajuda a manter o conforto visual dos utilizadores pois estes não são incomodados com alterações constantes de *dimming* e segundo porque permite aumentar a vida útil dos balastros uma vez que estão sujeitos a menos arranques. De seguida apresenta-se um exemplo que melhor descreve a utilidade desta fase.

Imagine-se a condição descrita na **Tabela 8**, que diz respeito a um compartimento com 4 luminárias instaladas. Às 9h00 (cenário 1) é selecionada uma configuração global de *dimming* mas às 9h15 (cenário 2) as necessidades de luz artificial diminuem e portanto a configuração global de *dimming* deve ser ajustada. Dentro das configurações possíveis de menor energia para o cenário 2, a flutuação global da 1ª configuração é menor que a 2ª configuração. Entre o cenário 2 e 3 segue-se a mesma lógica.

Tabela 8 – Exemplo de funcionamento da otimização das flutuações

Cenário	Horas	Configurações globais de <i>dimming</i>				Grau de flutuação	Observações
1	9h00	50%	50%	75%	50%	N/A	
2	9h15	25%	25%	50%	25%	100%	Menor grau de flutuação em relação às 9h00
		0%	75%	25%	25%	150%	
3	9h30	0%	25%	25%	0%	75%	Menor grau de flutuação em relação às 9h15
		0%	50%	0%	0%	125%	

3.6.4. Fase 4 (Otimização da uniformidade)

Designa-se, neste contexto, **uniformidade** (luminosa) ao módulo da diferença entre o nível de *dimming* médio da configuração global e o nível de *dimming* individual da luminária. **Uniformidade global** não é mais do que o somatório das uniformidades para uma configuração global. No fundo esta medida mostra a dispersão entre as várias luminárias e portanto quanto mais pequeno for o seu

valor, mais uniforme é a configuração global de *dimming*. Em termos de conforto luminoso, esta fase é importante para garantir que, caso possível, não haja uma luminária com *dimming* a 100% e outra totalmente desligada. De seguida segue-se um exemplo de otimização de uniformidade:

Imagine-se um cenário onde há três possibilidades de configuração global. Ambas são válidas para iluminar o espaço (garantido pela fase 1), com o mesmo consumo energético (garantido pela fase 2) e sem relação de flutuação com cenários anteriores (considera-se que é o primeiro cenário do dia e como tal não se aplica a fase 3). Na **Tabela 9** exemplifica-se uma otimização feita tendo em conta o grau de uniformidade

Tabela 9 – Exemplo de otimização das uniformidades

Cenário	Horas	Configurações globais de <i>dimming</i>				Média	Uniformidade global	Observações
		50%	75%	75%	25%		75%	
1	9h00	50%	50%	75%	50%	56%	38%	Menor grau de uniformidade
		75%	25%	50%	75%		75%	

4. CASO DE ESTUDO

Para caso de estudo e validação do modelo, foi escolhida a sala 1.58 do *Instituto Superior Técnico, Campus do TagusPark*. O motivo desta escolha prende-se com o facto de nesta sala estarem instalados sistemas de controlo inteligente que permitem controlar as luminárias através de uma interface gráfica e/ou plataforma *Matlab*. Nos subcapítulos seguintes vão ser detalhadas não só as características geométricas (dimensões, vãos envidraçados, paredes) mas também as características técnicas dos equipamentos elétricos importantes ao modelo (luminárias, lamelas elétricas, sistemas de controlo).

Como foi referido anteriormente, o modelo programado necessita de ser adaptado à realidade em questão. Embora a introdução de dados no programa seja feita de forma intuitiva, é necessário fazer algumas medições manuais.

4.1. Envolvente interior

A sala 1.58 apresenta as dimensões gerais apresentadas na **Tabela 10** e tem uma área útil de 57 m².

Tabela 10 – Dimensões gerais da sala 1.58

Comprimento	10,00 m
Largura	5,70 m
Altura	2,85 m

Através do método referido na **Figura 29**, foi calculada a reflexividade média da envolvente opaca, ou seja, das paredes, teto e chão. Os valores encontrados estão descritos na **Tabela 11**.

Tabela 11 – Reflexividade média da envolvente opaca

Tipo de envolvente	Reflexividade	Material
Paredes	0.8	Betão pintado a branco
Teto	0.8	Teto falso metálico / betão pintado a branco
Chão	0.3	Soalho de madeira claro

4.2. Envidraçados

O vão envidraçado da sala 1.58 é composto por caixilharia de alumínio com vidros duplos, tem uma área total aproximada de $12,5 \text{ m}^2$ e encontra-se orientado a sudoeste. Para efeitos de cálculo e considerando a forma como o modelo foi elaborado, a área útil vai ser igual à área total, ou seja, vai ser desprezada a área de alumínio.

Deve-se referir que a janela está equipada com um sistema de lamelas elétricas de sombreamento que podem ser ajustadas via interface gráfica e/ou *Matlab*, permitindo diminuir a incidência de radiação direta que causa desconforto visual (Marques, 2012). Esse sistema é constituído por três seções de regulação independentes, tal como está esquematizado na **Figura 48**. A posição das lamelas influencia a quantidade de luz que entra na sala mas não tem impacto no cálculo da distribuição de iluminação nos pontos de interesse. Isto significa que numa situação real, o utilizador pode, em qualquer altura, ajustar a posição das lamelas, sem que esta alteração afete o funcionamento da ferramenta.

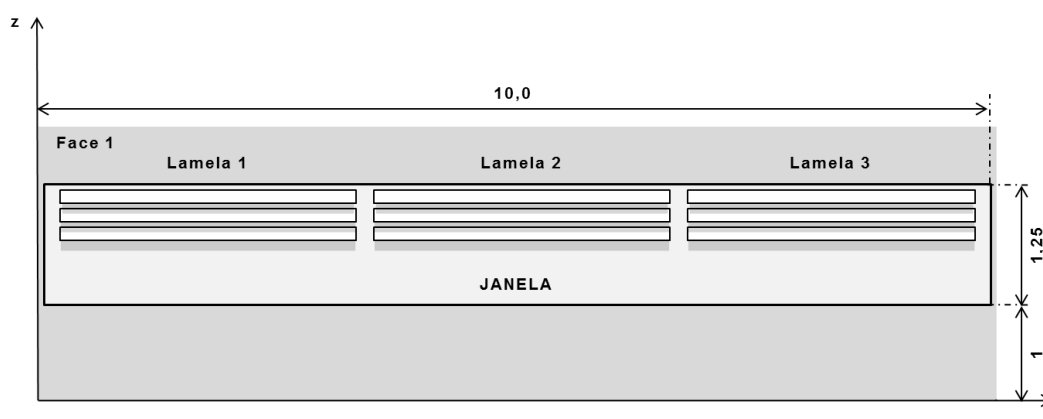


Figura 48 – Esquematização das dimensões e formato da janela e lamelas de sombreamento

A transmissividade do vidro foi calculada de acordo com o método indicado na **Figura 31** e tem o valor de 0,64.

4.3. Malha

A malha utilizada para a aplicação do método da radiosidade é importante para a precisão dos resultados obtidos. Embora o refinamento de malha aumente a precisão dos resultados, o tempo de processamento computacional também irá aumentar. Consideraram-se as dimensões características de malha indicadas na **Tabela 12**.

Tabela 12 – Dimensões características de malha utilizada

Eixo	Dimensão
x	3,00 m
y	1,50 m
z	2,85 m

Considerando o algoritmo de geração de malha descrito no capítulo anterior, a malha gerada é constituída por 130 elementos e encontra-se representada na **Figura 49**.

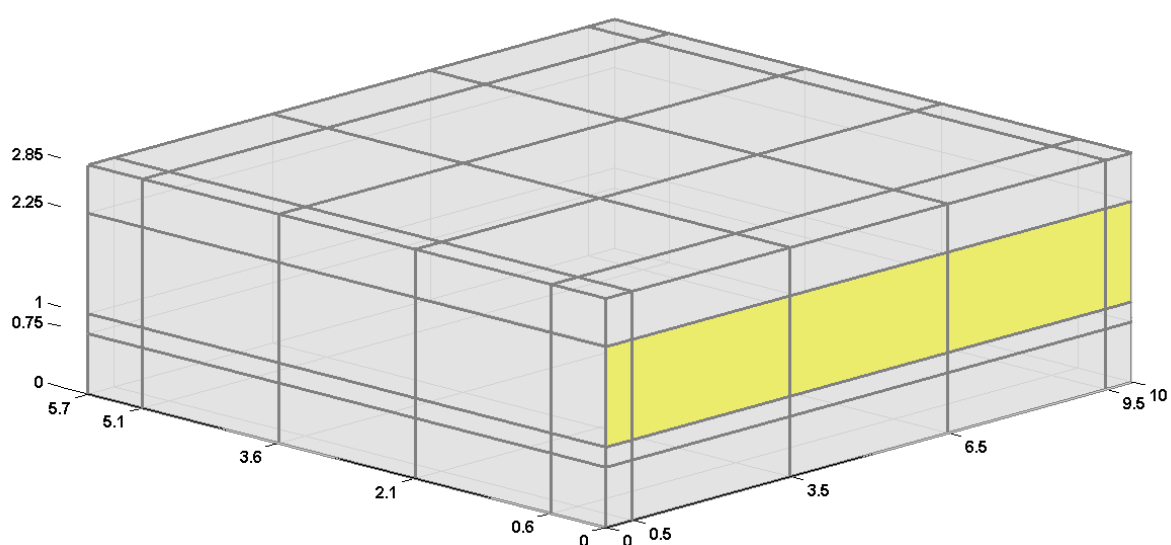


Figura 49 – Malha utilizada para cálculo numérico

4.4. Pontos de interesse

Os pontos de interesse que vão ser estudados estão representados na **Figura 50** e as suas coordenadas estão descritas na **Tabela 13**. A escolha da localização foi feita, por um lado, para ter possibilidade de validar o modelo para várias situações (perto e longe de luminárias e janelas) e por outro para ter em atenção a disposição do mobiliário existente na sala. Considerou-se a altura do posto de trabalho a 0,75 metros do chão, correspondente à altura dos postos de trabalho.

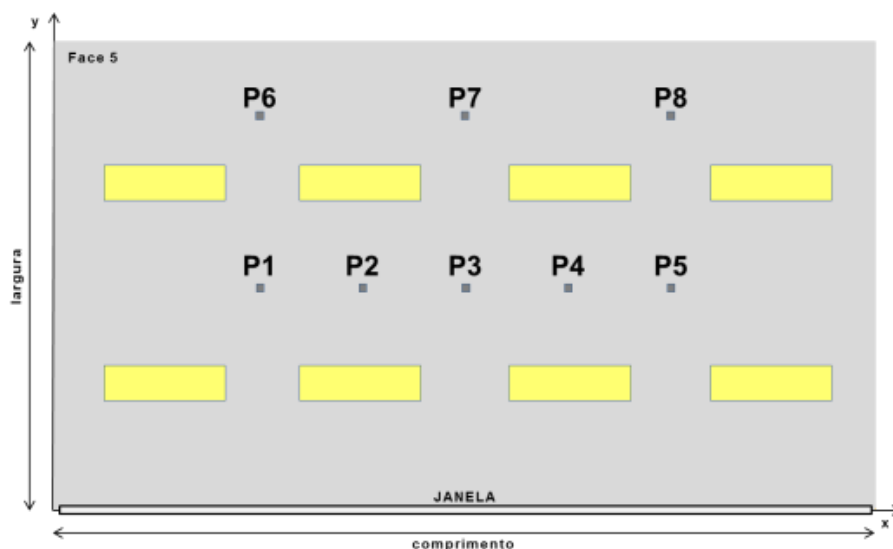


Figura 50 – Esquema da localização dos pontos de interesse

Tabela 13 – Coordenadas dos pontos de interesse

Ponto	Coordenadas		
	x	y	z
P1	2,45	2,65	0,75
P2	3,70	2,65	0,75
P3	4,95	2,65	0,75
P4	6,20	2,65	0,75
P5	7,45	2,65	0,75
P6	2,45	4,75	0,75
P7	4,95	4,75	0,75
P8	7,45	4,75	0,75

4.5. Luminárias

As 8 luminárias instaladas na sala são da marca *ODELUX*, modelo *OD-6822*. Cada luminária tem capacidade para 2 lâmpadas tubulares T8 de 120 *cm* e as suas dimensões são de 1,25 x 0,20 *m*, estando instaladas a 2,53 *m* de altura. As lâmpadas instaladas são da marca *Radium*, modelo *NL-*

T8/840, com um consumo nominal de 36 W, fluxo de 3350 lm e temperatura da cor de 4000 K. A disposição da instalação encontra-se esquematizada na **Figura 51**.

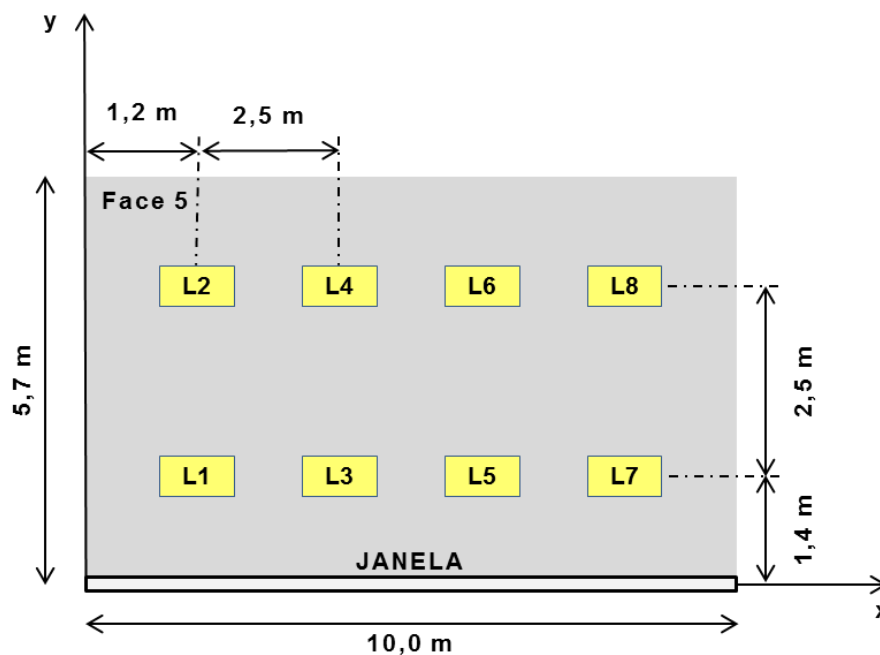


Figura 51 – Esquema da disposição das luminárias

O balastro instalado é do tipo eletrónico, pelo que se assume um rendimento de 99%.

O diagrama fotométrico fornecido pelo fabricante está representado na **Figura 52** e apresenta a intensidade luminosa calculada numa base relativa em relação ao fluxo luminoso nominal das lâmpadas instaladas. O fabricante estudou 3 orientações α – 0, 45 e 90 graus – e 19 orientações β – 0 a 90 graus com um passo de 5 graus – perfazendo assim um total de 57 combinações possíveis.

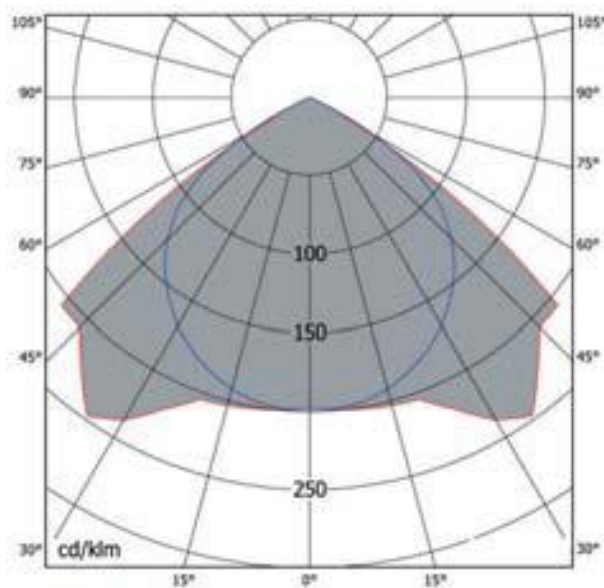


Figura 52 – Diagrama fotométrico das luminárias ODELUX OD-6822

Para calibrar o valor da intensidade luminosa das luminárias (com *dimming* a 100%) seguiu-se o procedimento indicado no subcapítulo anterior, ou seja, mediu-se a iluminância de todas as luminárias, individualmente e a uma distância de referência $d_{ref} = 1,78 \text{ m}$. O valor médio obtido para a iluminância foi de $E_{ref} = 817 \text{ lx}$, o que, equivale a $I_{ref} = 2.588 \text{ cd}$ (usando a lei do inverso do quadrado da distância para $\beta_{ref} = 0^\circ$).

Fazendo uso da **Equação [15]** foi possível calcular a intensidade luminosa real da luminária, $I_{real}(\alpha, \beta)$, para as várias orientações testadas pelo fabricante.

4.6. Controle de iluminação

A instalação luminosa da sala 1.58 tem ao seu dispor um sistema de *dimming* individualizado por luminária. Com este equipamento é possível controlar, através de uma interface gráfica e/ou *Matlab* o nível de *dimming* associado a uma luminária e deste modo, ajustar o valor da intensidade luminosa consoante as necessidades reais.

Para efeito de cálculo de consumo energético, considerou-se que a percentagem de *dimming* definida através da interface *Matlab* segue o comportamento descrito na **Figura 53**. Os pontos resultam da medição com uma pinça amperimétrica.

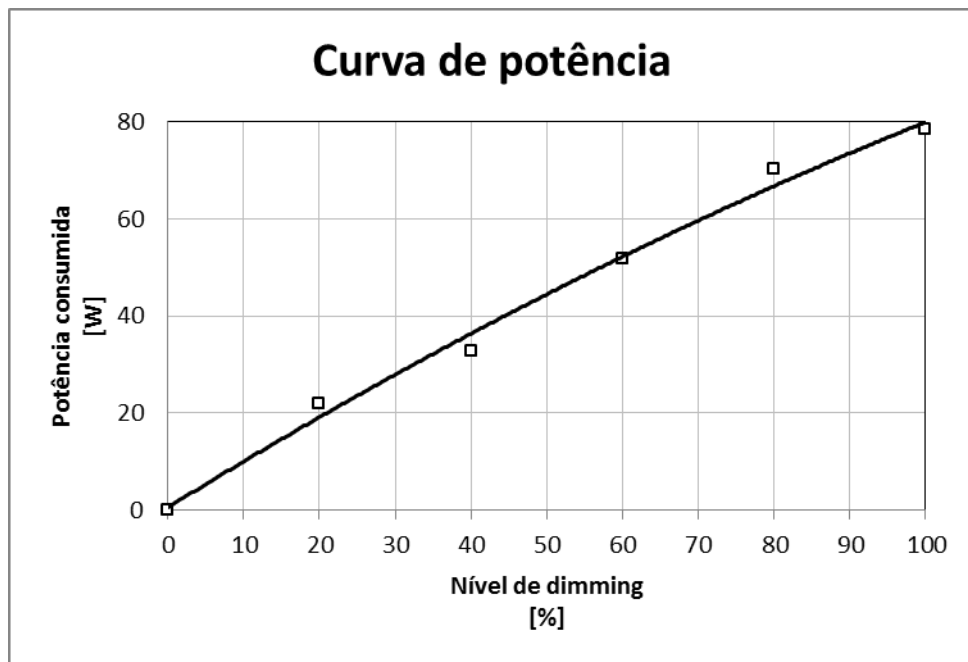


Figura 53 – Curva de potência experimental

A curva de eficácia da luminária foi determinada de acordo com a metodologia descrita anteriormente. Para tal, mediram-se para cada luminária, a uma distância $d_{ref} = 1,78\text{ m}$, vários valores de iluminância, $E_{L_i D_j}$ para todas as luminárias, L_i e níveis de *dimming* de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, D_j . Os valores obtidos estão representados na **Figura 54**.

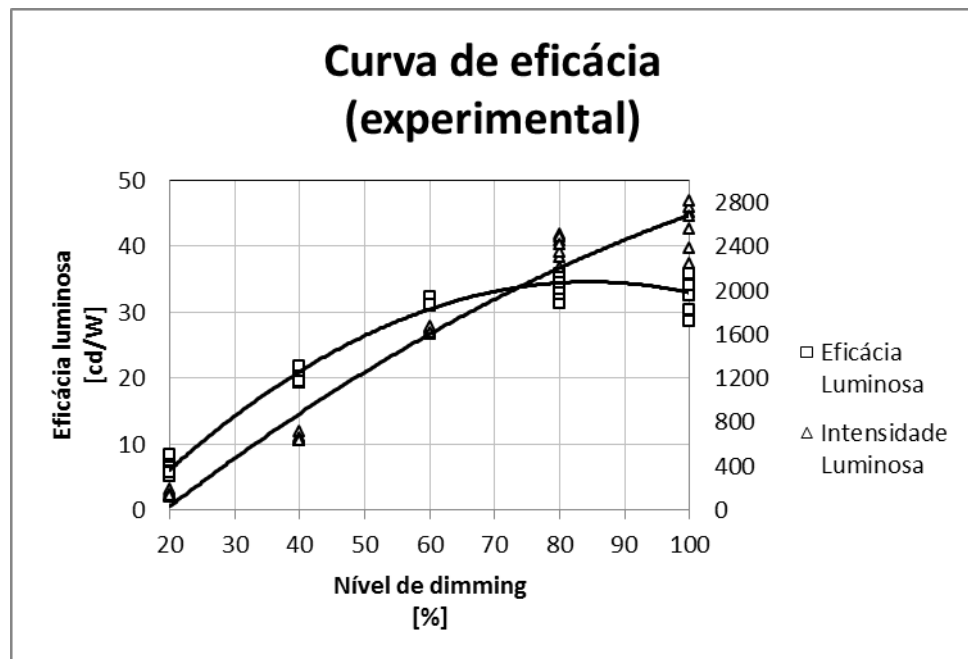


Figura 54 – Curva de eficácia considerada

Pela análise da **Figura 54** é possível estimar não só os consumos energéticos mas também a intensidade luminosa associada às luminárias *ODELUX*, para vários níveis de *dimming*. Essas estimativas estão indicadas na **Tabela 14** e vão ser as utilizadas no seguimento do caso de estudo. Na mesma tabela pode-se também comparar os resultados obtidos com os que (Ozenc et al., 2014) obteve através da análise de uma instalação experimental onde foram testadas várias lâmpadas fluorescentes tubulares.

Tabela 14 – Relação entre nível de *dimming*, potência, eficácia luminosa e intensidade luminosa de uma luminária *ODELUX*

Percentagem de <i>dimming</i>	25	50	75
Potência [W]	24	44	63
Eficácia luminosa experimental [<i>cd/W</i>]	10,39	26,55	34,22
Eficácia luminosa prevista (Ozenc et al., 2014)	17,10	28,0	34,20
Intensidade luminosa experimental [<i>cd</i>]	245	1.180	2162

5. VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

Uma validação de resultados significa, na sua génese, comparar os resultados obtidos através de um modelo matemático com as medições reais de uma instalação experimental. A validação do modelo desenvolvido foi feita em duas fases, iluminação natural e iluminação artificial. Para medir a iluminação nos pontos de interesse recorreu-se a um luxímetro.

5.1. Validação de modelo da radiosidade (iluminação natural)

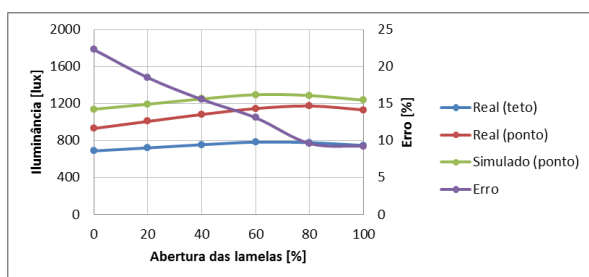
A validação da iluminação natural consistiu na medição da interação da luz natural proveniente única e exclusivamente da janela com a iluminância dos pontos de interesse definidos no subcapítulo anterior. Esta forma de validação pretende despistar erros associados ao modelo da radiosidade, quer do próximo modelo em si e sua formulação, quer das características geométricas definidas.

A metodologia associada a esta validação passou por medir para várias condições de iluminação exterior a iluminância nos pontos de interesse. Para possibilitar interagir com a quantidade de luz que era transmitida à sala através da janela fez-se uso das lamelas elétricas de sombreamento, fazendo variar ao longo do dia, a posição das mesmas, alterando assim a intensidade de luz interior. Considerando que a posição das lamelas pode variar entre 0 e 100%, onde 0% significa mais fechadas (menos luz) e 100% significa mais abertas (mais luz), consideraram-se, para cada conjunto de testes, as posições de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

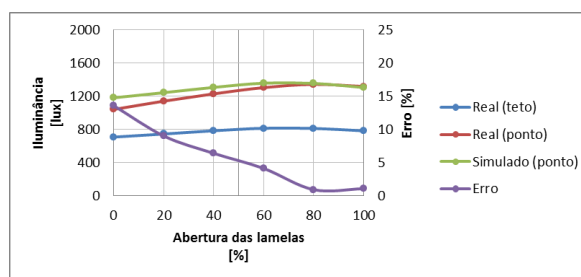
As medições foram feitas para os seguintes períodos do dia: 10h00 às 10h30, 12h00 às 12h30 e 14h30 às 15h00. A escolha destes horários prendeu-se com a posição relativa do Sol em relação à janela. As medições registadas estão representadas nas seguintes figuras:

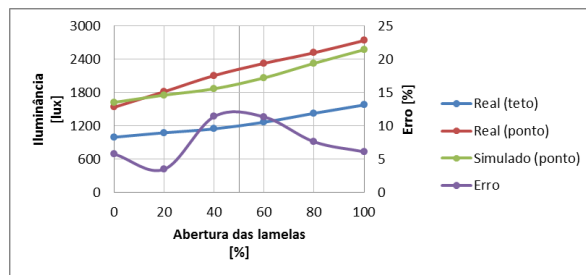
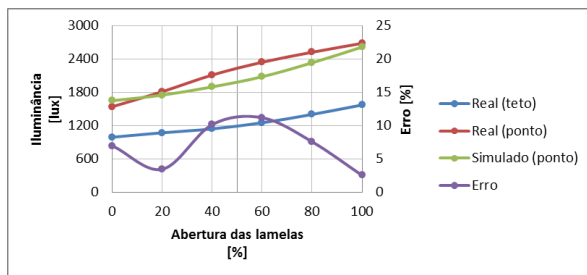
10h00 às 10h30

Ponto 1

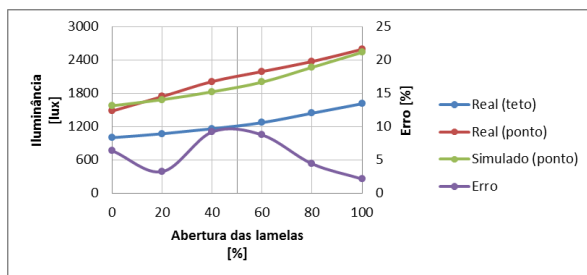


Ponto 2





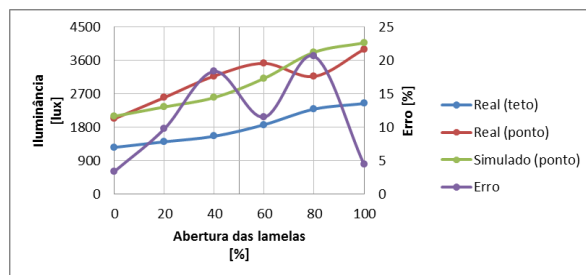
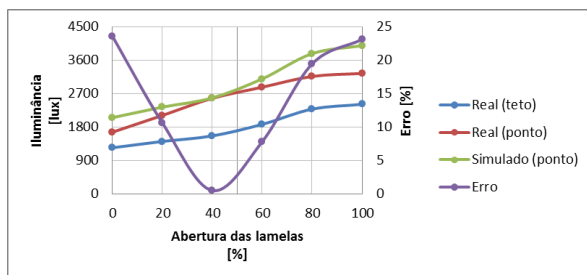
Ponto 5



14h30 às 15h00

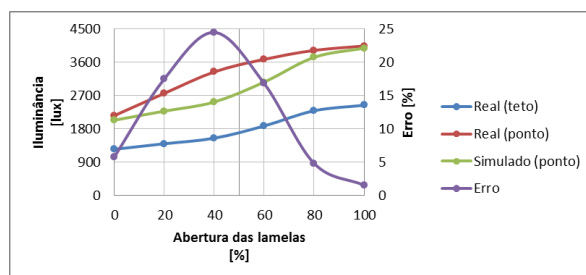
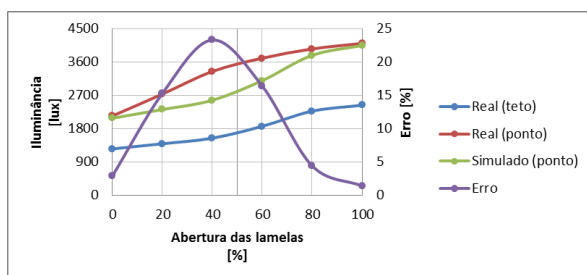
Ponto 1

Ponto 2



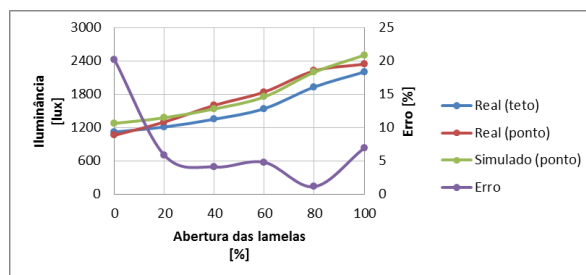
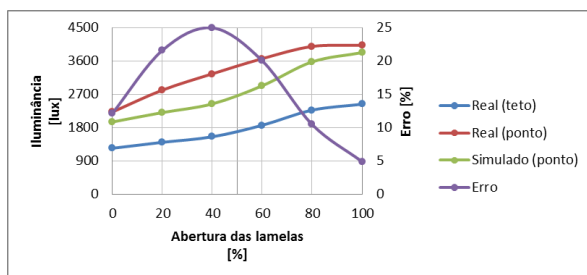
Ponto 3

Ponto 4



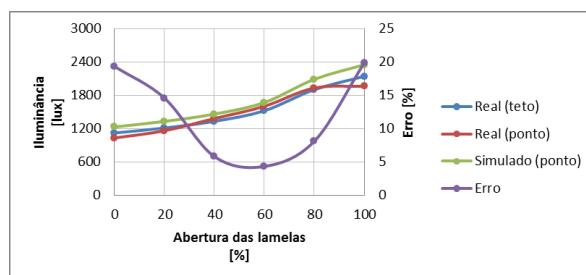
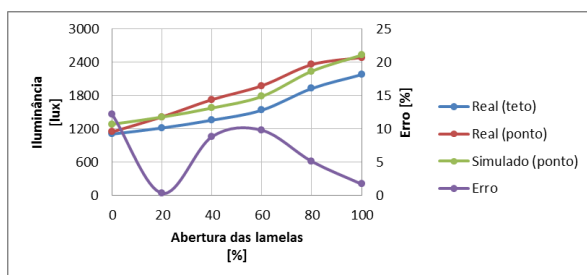
Ponto 5

Ponto 6



Ponto 7

Ponto 8



Através da **Figura 55** pode-se concluir que o erro máximo do modelo, para os pontos estudados é de 25% sendo o erro médio de 10%. Em 58% dos registos obtidos, a simulação subestimou o valor de iluminância o que significa que numa situação real de aplicação do sistema de controlo, o nível de *dimming* seria maior que o necessário e portanto as situações de défice de iluminação real seriam menos prováveis.

Observando a Figura 56 e analisando os pontos 1 a 5 verifica-se que o erro máximo é tipicamente maior quando comparado com os pontos 6 a 8. Este fenómeno é explicado pela influência que as lamelas de sombreamento têm no direcionamento da luz numa determinada direção, isto é, ao alterar a posição entre 0 e 100%, a luz é mais direcionada para o teto e chão, respetivamente. Deste modo, a distribuição de iluminação não é uniforme em todos os pontos. Não é, então, de admirar que os pontos mais próximos da janela sejam mais afetados por esta variação de posição do que os mais afastados (onde a luz incidente já sofreu mais reflexões). A nível de intensidade luminosa também se verificou uma forte interação com a posição das lamelas e isto acontece pelos mesmos motivos supracitados, ou seja, tipicamente quando as lamelas estão a 100%, a entrada de luz é maior.

Pode-se então concluir, relativamente ao modelo da radiosidade, que os resultados dependem fortemente da forma como a luz é transmitida através da janela. Dependendo da posição relativa do Sol em relação à janela e da posição das lamelas de sombreamento, o erro pode variar entre + 25% e - 24%, ou seja, a iluminância natural nos pontos de interesse pode ser sobre ou subvalorizada.

Dadas as limitações técnicas da instalação experimental, não foi possível medir, de forma instantânea e para uma única condição de iluminação exterior, as várias posições das lamelas.

Também não foi possível para uma posição fixa da janela, medir instantaneamente para os 8 pontos de interesse, o que torna mais difícil associar determinadas fenómenos a possíveis causas.

Outra fonte de erro a nível do modelo prende-se com a definição de um valor médio de reflexividade da envolvente opaca (paredes, chão e teto). Uma vez que a sala se encontra mobilada, as próprias secretárias e móveis têm forte influência na distribuição de iluminação.

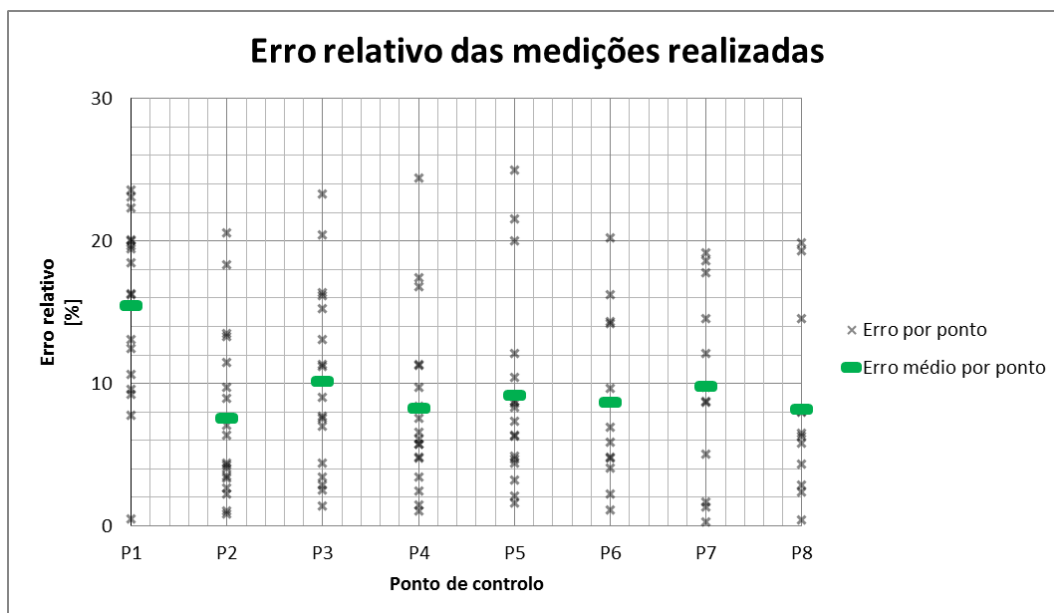


Figura 55 – Erro relativo de 126 registos obtidos através da medição com luxímetros

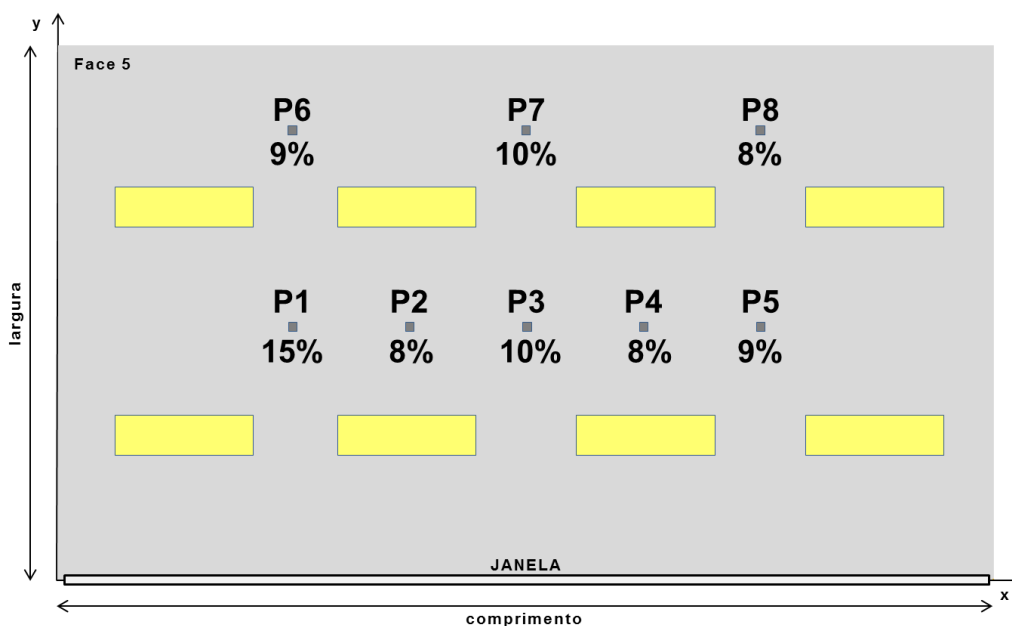


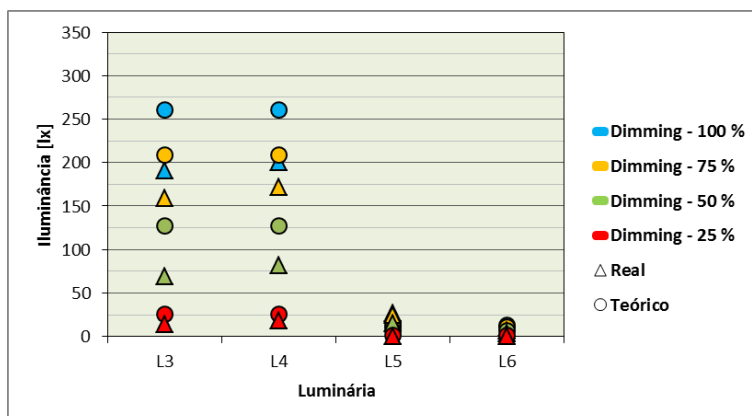
Figura 56 – Erro relativo médio por ponto

5.2. Validação de método ponto a ponto (iluminação artificial)

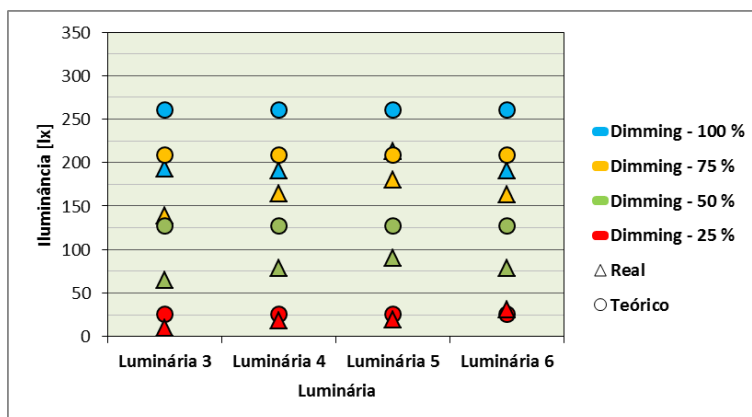
A validação do método ponto a ponto, utilizado para calcular a distribuição de iluminação artificial nos pontos de interesse, consistiu na medição da iluminância nesses mesmos pontos. Para isso, optou-se por registrar a influência de cada luminária, individualmente, em cada ponto. Por forma a tornar a influência da iluminação natural proveniente da janela desprezável, decidiu-se tapar a mesma com cortinados.

Os registos que foram feitos basearam-se na utilização de 4 luminárias (L3 a L6), 4 níveis de *dimming* (100%, 75%, 50% e 25%) e 5 pontos de interesse (P1, P3, P5, P6 e P8), totalizando 80 registos.

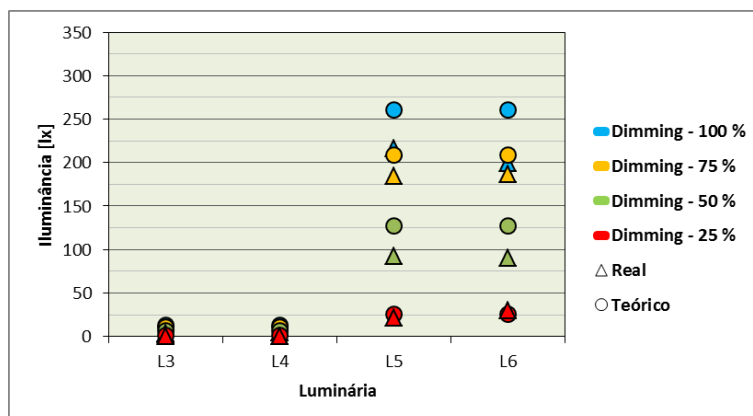
Ponto 1



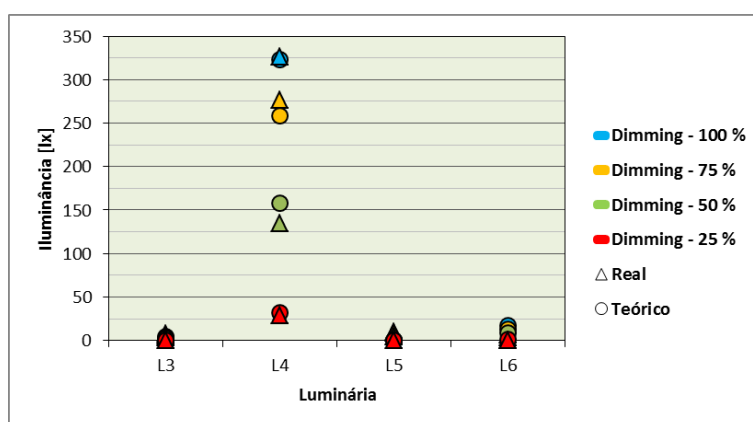
Ponto 3



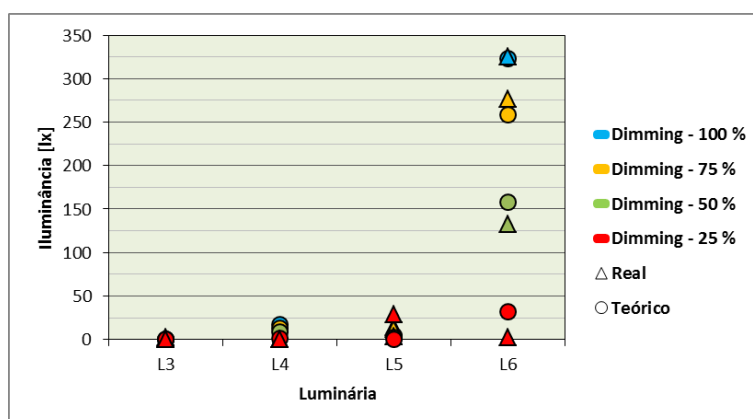
Ponto 5



Ponto 6



Ponto 8



Através da análise dos gráficos anteriores verifica-se que o resultado da aplicação do método ponto a ponto permite calcular, de uma forma aproximada, a iluminância num determinado ponto afastado da luminária. Para os pontos 1 e 5 obtiveram-se gráficos “simétricos”, o que seria de esperar pois este ponto encontra-se localizado centralmente em relação às luminárias 3 a 6.

A diferença média entre a iluminância real e teórica nos vários registos foi de 16 lx. Pode-se também concluir que, de um modo geral, para níveis de *dimming* de 100% o erro entre a estimativa e

a realidade é maior. A razão deste fenómeno prende-se com a forma como o algoritmo foi desenhado, ou seja, no subcapítulo anterior foi referido um método de calibração da intensidade luminosa nominal real da luminária, que propunha o seu cálculo através da aplicação da lei do quadrado da distância em relação a um determinado ponto. O objetivo dessa calibração era evitar que fenómenos de desgaste da lâmpada e/ou luminária influenciassem de forma negativa o modelo. Contudo o valor calculado seria uma média de todas as luminárias existentes e portanto é de esperar que, nesta validação, para os níveis de *dimming* de 100% haja um maior erro. No entanto, de um modo geral, é possível concluir que este método simples de cálculo luminotécnico (ponto a ponto) apresenta resultados credíveis e coerentes, recomendando-se portanto a sua utilização para cálculos luminotécnicos onde não se exige uma grande precisão.

5.3. Validação de modelo final

A designação de “modelo final” refere-se, no fundo, à união do modelo da radiosidade, responsável pelo cálculo da distribuição da iluminação natural num compartimento com o método ponto a ponto, responsável pelo cálculo da contribuição das luminárias na iluminância dos pontos de interesse. É importante referir que as validações descritas nos subcapítulos anteriores serviram para despistar eventuais problemas de base, ou seja, para garantir que todo o modelo estava bem construído e quantificar e explicar os erros. O objetivo desta validação final é mostrar efetivamente os resultados esperados pelo utilizador final, ou seja, o nível de *dimming* necessário para iluminar pontos de interesse de um compartimento acima dos 500 *lx*.

A forma mais conveniente de validar o modelo final foi através da medição, num certo espaço de tempo, da distribuição luminosa nos pontos de interesse. Para isso usaram-se as várias posições das lamelas de sombreamento para simular diferentes níveis de entrada de luz pela janela. Introduziu-se no programa, manualmente, os valores registados pelo luxímetro instalado no teto da sala, obtendo-se então os níveis de *dimming*. Através da interface *Matlab* foi possível controlar imediatamente o nível de *dimming* das luminárias. Procedeu-se à verificação de 84 registos, dos quais 57 foram medições sequenciais (tirando partido da etapa de otimização da flutuação) e 27 medições esporádicas.

A **Figura 57** indica o número de registos observados. Dos 84 registos, 68% (57 registos) foram considerados conservadores, isto é, o nível de iluminância simulado foi inferior ao real. Isto é um bom indicador de que os resultados do simulador estão, em grande parte das situações, ao mesmo nível ou abaixo da realidade, não se correndo o risco de estar a considerar valores de iluminância inferiores aos definidos (500 *lx*).

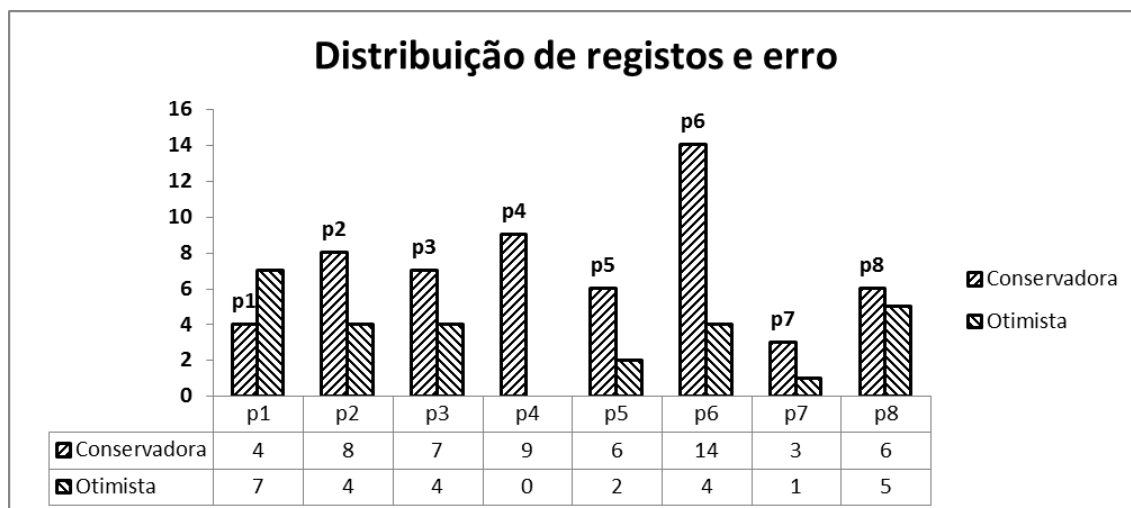


Figura 57 – Número de registos observados por ponto

Na **Figura 58** está representado o erro médio por ponto. Definindo registos conservadores aqueles cuja simulação calculou um nível de iluminância abaixo do real e registos otimistas aqueles cuja simulação calculou um nível de iluminação acima do real, pode-se ver que para ambos os cenários, o erro máximo observado foi de 21%.

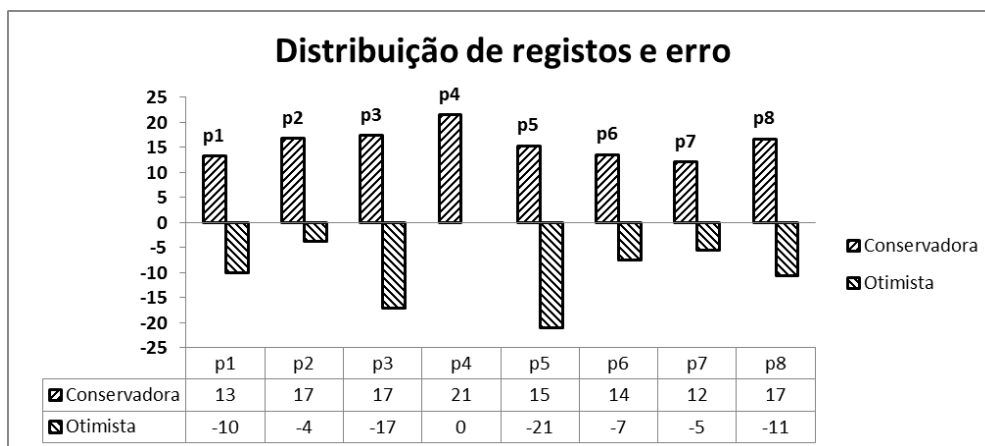


Figura 58 – Média de erro dos registos observados em reação ao real

O erro médio dos registos conservadores é de 16% enquanto o erro médio dos registos otimistas é de 11%. Estes valores estão indicados na **Figura 59**. O facto do segundo ser menor que o primeiro é um bom indicador, pois significa que nos casos em que há o risco da iluminância proveniente do simulador ser maior que a realidade e desde modo haver défice de luz, o erro é, em média, mais pequeno.

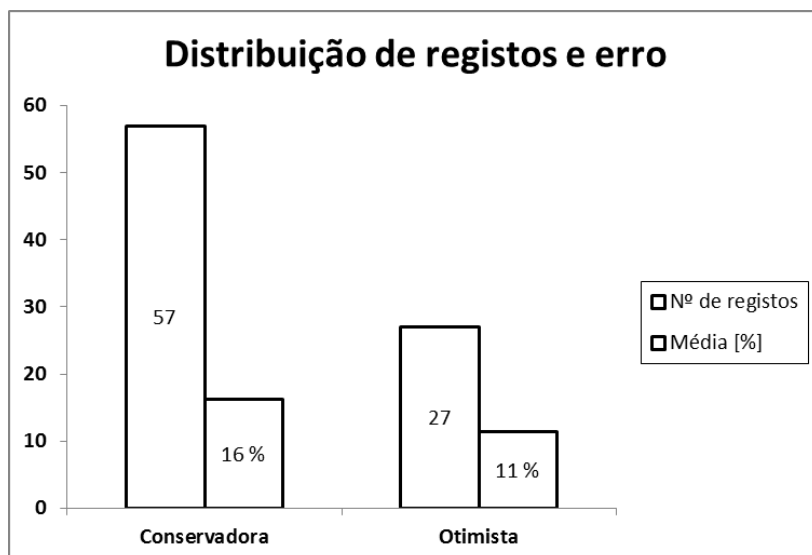


Figura 59 – Distribuição de registos e respetivo erro

Considerando os 84 registos realizados e validados onde as condições de iluminação natural ficavam aquém dos 500 lx estipulados, havendo portanto necessidade de uma compensação de luz artificial controlada por *dimming*, o valor médio de iluminância estimada final (considerando luz natural e artificial) foi de 561 lx , tal como representado na **Figura 60**. Quando comparado com os registos reais nas mesmas condições, a iluminância média foi de 614 lx . O erro médio estimado (para um nível definido de 500 lx) foi de -9%, ou seja, garante que a estimativa é conservadora.

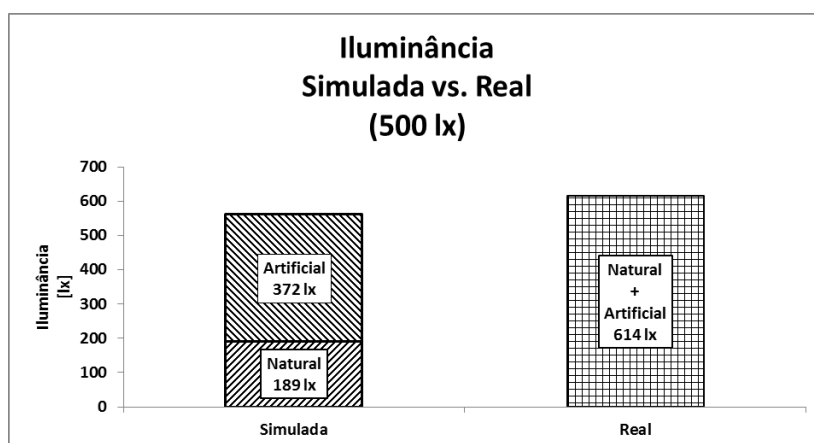


Figura 60 – Comparação entre iluminância simulada e iluminância real média nos pontos de controlo

A sala testada tem um vão envidraçado grande e com boa exposição solar e isto reflete-se que em muitas horas do dia é possível atingir os níveis de 500 lx sem ser necessário recorrer à iluminação artificial. Contudo, através da utilização das lamelas de sombreamento foi possível intervir na iluminação transmitida através da janela.

Um sistema típico de *dimming* considera o mesmo nível para todas as luminárias. Isto significa que a base de comparação para efeitos de cálculo de poupança energética deve ser aquela que considera que todas as luminárias estão ligadas com um nível de *dimming* equivalente ao máximo da configuração calculada pela ferramenta, isto é, se entre todas as luminárias o nível mais alto calculado for de 75%, então considera-se que todas estão definidas a 75%. Comparando o consumo energético que resulta da aplicação da ferramenta desenvolvida com o sistema típico de *dimming* descrito anteriormente, as reduções são elevadas. Em 73% dos registos reduziu-se entre 50% e 75% e em 26% dos registos conseguiu-se reduzir entre 75% e 100%, tal como indicado na **Figura 61**. Estes resultados mostram que o potencial de poupança energética associada à iluminação quando esta está associada a um sistema de controlo inteligente é grande. Além disso, como foi referido, este sistema apresenta um erro médio de -9%, o que é indicativo que também é preciso.

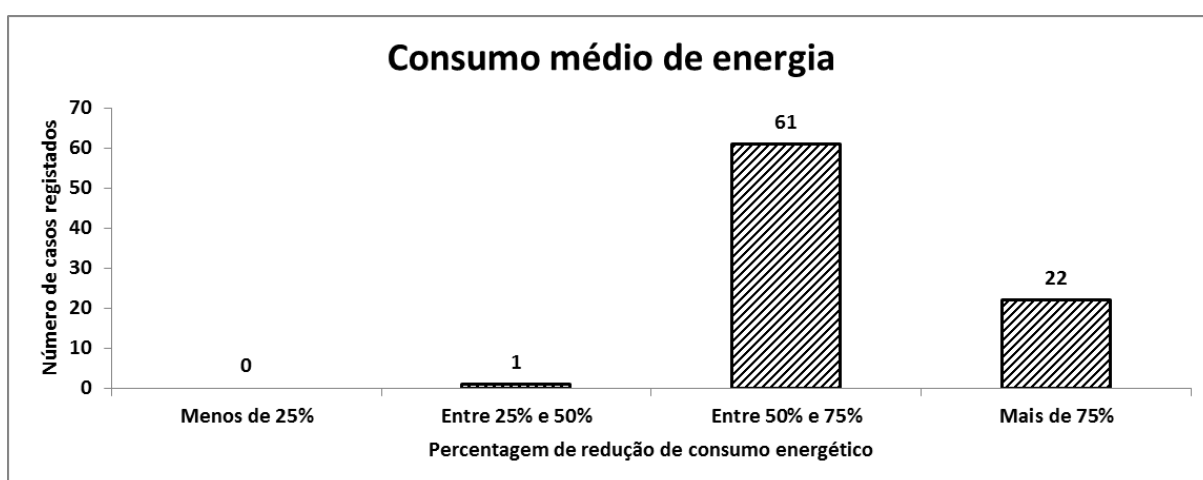


Figura 61 – Relação entre o número de casos registados e a poupança média possível

Considerando agora uma análise entre o nível de iluminação artificial no teto e a poupança de energia médios, pode-se concluir que na pior situação possível (quando os níveis de iluminância no teto não ultrapassam os 50 *lx*), as poupanças são de 53%. À medida que as condições de luz natural melhoram e portanto a iluminância medida no teto aumenta, as poupanças podem ascender até aos 75%. Na **Figura 62** está representada a relação entre a poupança energética média e a iluminação no teto.

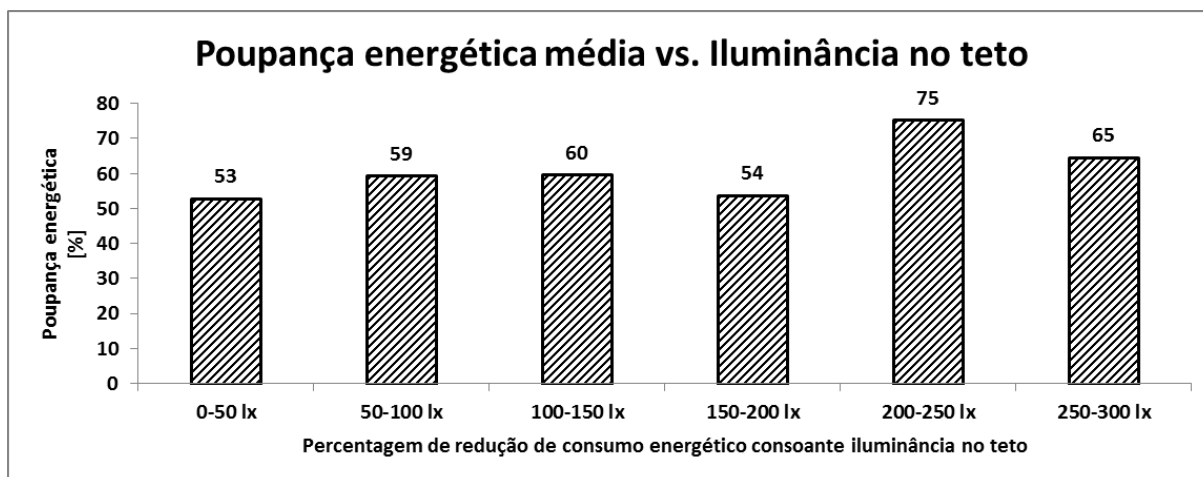


Figura 62 – Relação entre a poupança energética média e a iluminância no teto da sala

De um modo global, em termos de poupança energética, é impossível, baseando nos registos obtidos, estimar uma poupança energética anual. Contudo, os resultados mostrados nas duas figuras anteriores demonstram uma poupança média de 61% considerando todos os cenários de mais e menos luz estudados.

Nas **Figura 63 a Figura 65** estão representados alguns resultados do programa. Nas **Figura 64** estão representadas as contribuições da iluminação natural e artificial nos pontos de interesse definidos. Este resultado advém de um registo de iluminação no teto de 57 lx.

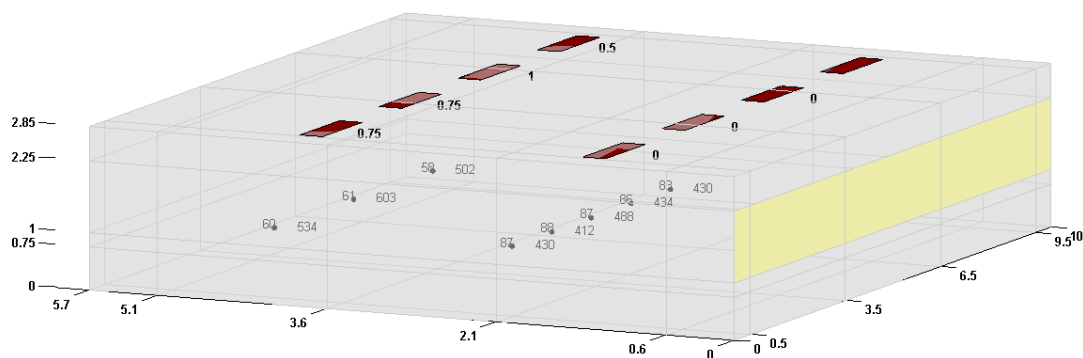


Figura 63 – Ilustração exemplificativa do *output* esperado do programa

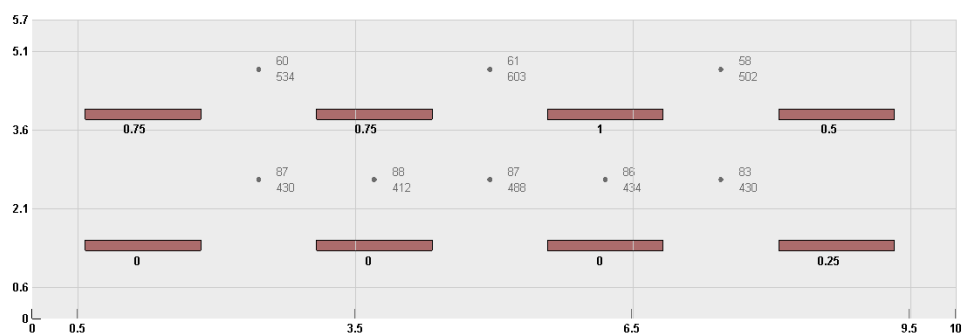


Figura 64 – Contribuição de iluminação natural (indicado em cima) e iluminação artificial (indicado em baixo), para *dimming* específico para registo de 57 lx (no teto)

Na **Figura 65** apresenta-se a distribuição de iluminação em duas fazes do compartimento (Face 4 e 6, respetivamente). Trata-se de um resultado opcional mas interessante para perceber o comportamento geral do mesmo.

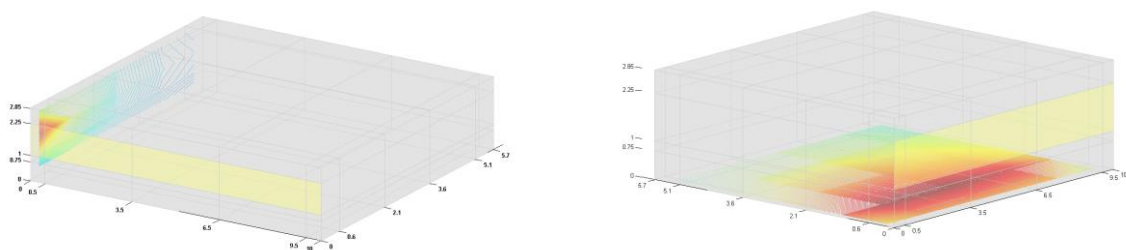


Figura 65 – Exemplo de cálculo de distribuição de iluminação natural

6. CONCLUSÕES

6.1. Síntese de resultados

No âmbito da eficiência energética da iluminação em edifícios de serviços, a presente tese propunha-se a desenvolver um sistema integrado de iluminação inteligente que conseguisse, de uma forma eficaz e autónoma, simular a distribuição de iluminação natural proveniente da janela de um espaço fechado (e.g. sala de aula) e complementá-la através de luminárias equipadas com sistemas de *dimming*.

Para se atingirem os objetivos definidos fez-se um estudo das várias tecnologias já existentes a nível da iluminação e também dos vários métodos de simulação luminotécnica. Após esse estudo, foi desenhado de raiz uma ferramenta universal para qualquer compartimento fechado onde exista uma janela. Através do método da radiosidade (para cálculo da iluminação natural) e do método ponto a ponto (para cálculo da iluminação artificial) foi então possível estimar a distribuição de luz em determinados pontos de interesse.

O modelo final foi testado e validado numa sala de aula pertencente ao Instituto Superior Técnico, sala essa cujas luminárias se encontravam equipadas com um sistema de controlo de *dimming* que podia ser interagido através de uma interface gráfica e/ou *Matlab*. Foi necessário fazer uma caracterização plena da sala em questão, quer ao nível da geometria (dimensões, disposição, cor das paredes, etc.), quer ao nível das luminárias (curva de eficiência, de potência, intensidade luminosa nominal, etc.).

Concluiu-se experimentalmente, através de 84 medições *in situ* que o modelo criado consegue complementar com sucesso a iluminação natural de um compartimento através da utilização de *dimming* em luminárias. Em 67% das observações estimou-se um valor de iluminância 17% abaixo do real e em 33% estimou-se um valor 11% acima do real. Estes resultados mostram, por um lado, que o modelo é preciso quanto basta para a aplicação proposta e por outro lado, que a maior parte das diferenças são conservadores, ou seja, a probabilidade de ter défice de iluminação global num determinado ponto de interesse é menor. Desta forma foi possível garantir que o conforto visual dos ocupantes da sala estava garantido na maior parte dos registos efetuados.

A nível da influência das lamelas de sombreamento na componente natural de iluminação da sala, observou-se que ao alterar a posição entre 0 e 100%, a luz é mais direcionada para o teto e chão, respetivamente e por isso a distribuição de iluminação não é uniforme em todos os pontos. Nos pontos mais próximos da janela observou-se uma maior dependência da posição das lamelas, fenómeno que se atribui ao facto da radiação que incide nestes pontos estar sujeita a menos reflexões do que aquela que atinge os pontos mais afastados. Apesar desta influência das lamelas, em média, o erro entre o valor real e o valor simulado é de até 25%.

Em relação à simulação da iluminação artificial, concluiu-se, através das medições, que a diferença média entre a iluminância estimada e a iluminância real proveniente das luminárias foi de 16 lx. Esta diferença média é indicadora que o método ponto a ponto aplicado consegue calcular bons resultados para este tipo de luminárias. Concluiu-se também que o comportamento real das luminárias tem uma grande influência na precisão dos resultados do modelo. Isto acontece porque tem que se dar à ferramenta como parâmetro de entrada o fluxo luminoso médio das luminárias quando sujeitas a um nível de *dimming* de 100% e para medir esses valores foi necessário medir a iluminância de todas as luminárias. Foi possível concluir que apesar de todas as luminárias terem lâmpadas da mesma marca e modelo instaladas, nem todas emitiam o mesmo fluxo luminoso quando sujeitas ao nível máximo de *dimming*. Este fenómeno foi comprovado através da medição com sensores de lux (luxímetros).

Demonstrou-se também que a poupança energética média associada a um sistema de controlo inteligente de iluminação artificial pode ir dos 53% até aos 75%, consoante haja menor ou maior transmissão de luz através da janela (luz natural), respetivamente. Estes níveis de poupança são estimados em relação à utilização de um sistema de *dimming* típico em que todas as luminárias estão ligadas com o mesmo nível.

De um modo geral os resultados obtidos cumprem os objetivos propostos pois foi possível criar, de raiz, uma ferramenta de gestão inteligente de iluminação que consegue manter os níveis de iluminação de uma sala, garantindo não só o conforto visual dos ocupantes como também poupanças elevadas.

6.2. Recomendações para trabalho futuro

Embora o modelo criado tenha sido validado e os resultados tenham sido promissores, propõem-se aqui um conjunto de futuras medidas que podem ser analisadas e estudadas com vista à melhoria desta ferramenta.

O modelo desenvolvido considera uma e apenas uma fonte de luz uniforme (ex: janela). Recomenda-se a implementação de uma funcionalidade que possibilite a introdução de mais do que uma fonte (ex: várias janelas em diferentes envolventes). Também deve ser analisada a possibilidade de, no âmbito da fonte de luz considerada, esta poder ser complementada com sistemas de sombreamento, por exemplo, lamelas de sombreamento, persianas venezianas ou outras. Contudo, há que ter em conta que um dos principais objetivos do modelo é poder ser aplicado de forma prática e portanto o utilizador final apenas deve introduzir as informações necessárias e suficientes para a estimativa. Nesse sentido, não se pretende um modelo rigoroso onde é detalhada, por exemplo, a variação da iluminação com o ângulo das persianas ou a variação da transmissividade do vidro consoante o ângulo de incidência.

Outra sugestão que se faz, e mais uma vez, com vista a tornar o modelo uma ferramenta mais prática, é o cálculo de estimativas da iluminação horizontal em locais de referência (ex: Lisboa, Porto) que tenham como variável a posição do Sol ao longo do dia. Com esta opção ativa não seria mais necessária a utilização de um sensor de luminosidade no teto para estimar a iluminação média interior, bastando, para isso, informações do dia, hora e minuto.

Por fim, sugere-se a aplicação do modelo a outros compartimentos que preencham os requisitos descritos através da automatização do mesmo utilizando por exemplo um *Arduino*. Esta automatização permitiria estudar durante um período de tempo mais alargado o funcionamento da ferramenta e perceber, efetivamente, qual o potencial económico da mesma.

7. REFERÊNCIAS

Aghemo et al, 2014. Building Automation and Control Systems. A Case Study to Evaluate the Energy and Environmental Performances of a Lighting Control System in Offices. *Automation in Construction*, 43, pp.10–22

Athienitis et al., A. et al., 2002. A Methodology for Simulation of Daylight Room Illuminance Distribution and Light Dimming for a Room with a Controlled Shading Device. *Solar Energy*, 72(Elsevier), pp.271–281

Coelho, P., 2013. Solar Radiation

Corvacho, H., 2013. Nova Regulamentação no Domínio da Térmica dos Edifícios

Coutinho, M.S., 2009. Avaliação das Condições de Iluminação Natural através de Simulações em Modelos Virtuais

Department of Energy, U.S., 2007. Thermal Management of White LEDs. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_feb07_2.pdf

Department of Energy, U.S., 2011a. U.S. Buildings Energy End-Use for 2010. Disponível em: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=1.1.4>

Department of Energy, U.S., 2011b. U.S. Buildings Energy End-Use for 2015/2025/2035. Disponível em: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/TableView.aspx?table=1.1.5>

Design, R.L., 2012. Lighting Math - Methods to Calculate Light

ETAP Lighting, 2012. Dossier EN 12464-1

International Energy Agency, 2012. OCDE Totals: Balance for 2012. Disponível em: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?year=2012&country=OECDTOT&product=Balances>

Iverson, A. et al., 2013. *Daylight Calculations in Practice* 1st editio., Copenhagen: Danish Building Research Institute, Aalborg University

Lighting Research Center, 2013. Reflectance. Available at: <http://www.lrc.rpi.edu/education/learning/terminology/reflectance.asp>

Marques, P., 2012. Gestão Inteligente da Procura no IST – TagusPark

Ministério da Economia e do Emprego, 2013. *Decreto-Lei n.º 118/2013*

Ministério da Economia e do Emprego, 2006a. *Decreto-Lei n.º 79/2006*

Ministério da Economia e do Emprego, 2006b. *Decreto-Lei n.º 80/2006*

Moan, J., 2001. Visible Light and UV Radiation. *Scandinavian Science Publisher*, (Radiation at home, outdoors and in the workplace), pp.69–85.

Ozenc, S., Uzunoglu, M. & Guler, O., 2014. Experimental evaluation of the impacts of considering inherent response characteristics for lighting technologies in building energy modeling. *Energy and Buildings*, 77(Elsevier), pp.432–439

Radium Die Lichtmarke, 2015. General Specifications of T8 36W/840/G13 Lamp. Disponível em: <http://www.radium.de/en/products/fluorescent-lamp-spectralux%C2%AEplus-nl-t8-36w840g13>

Ryer, A., 1998. *Light Measurement Handbook*

Skylight, T., 1998. Lighting and Designing with Skylights. , pp.1–24

Universe, W. to, 2012. The Multispectral Sun. Disponível em: http://www.windows2universe.org/sun/spectrum/multispectral_sun_overview.html [Accessed November 4, 2014]

Westinghouse, 2015. Color Temperature. Disponível em <http://www.westinghouselighting.com/color-temperature.aspx> [Accessed May 12, 2015]

Yun, G.Y. et al., 2012. A field survey of visual comfort and lighting energy consumption in open plan offices. *Energy and Buildings*, 46(Elsevier), pp.146–151

ANEXOS

A. Fatores de forma

A sala 1.58 foi dividida em 130 elementos e cada um desses elementos tem uma relação de fator de forma com todos os restantes, resultando numa matriz F_{ij} de dimensão 130×130 . Por forma a facilitar a leitura dos fatores de forma calculados no caso de estudo, dividiram-se as superfícies do compartimento em zonas distintas.

- Descrição das superfícies

Descrição da superfície	Área [m ²]	Elementos	
		Descriminado	Total
Face 1.a – debaixo da janela	10,0	1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 17, 18	10
Face 1.b – janela	12,5	3, 7, 11, 15, 19	5
Face 1.b – acima da janela	6,0	4, 8, 12, 16, 20	5
Face 2	16,2	21 a 40	20
Face 3	28,5	41 a 60	20
Face 4	16,2	61 a 80	20
Face 5	57,0	81 a 105	25
Face 6	57,0	106 a 130	25

- Fatores de forma entre as várias superfícies

Fatores de forma da Face 1.a (debaixo da janela)								
F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	Soma
0,000	0,000	0,000	0,132	0,143	0,132	0,224	0,369	1

Fatores de forma da Face 1.b (janela)								
F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	Soma
0,000	0,000	0,000	0,142	0,147	0,142	0,302	0,268	1

Fatores de forma da Face 1.c (debaixo da janela)								
F31	F32	F33	F34	F35	F36	F37	F38	Soma
0,000	0,000	0,000	0,120	0,140	0,120	0,416	0,204	1

Fatores de forma da Face 2								
F41	F42	F43	F44	F45	F46	F47	F48	Soma
0,068	0,076	0,035	0,000	0,179	0,045	0,293	0,303	1

Fatores de forma da Face 3								
F51	F52	F53	F54	F55	F56	F57	F58	Soma
0,050	0,064	0,029	0,131	0,000	0,131	0,292	0,302	1

Fatores de forma da Face 4								
F61	F62	F63	F64	F65	F66	F67	F68	Soma
0,068	0,076	0,035	0,045	0,179	0,000	0,293	0,303	1

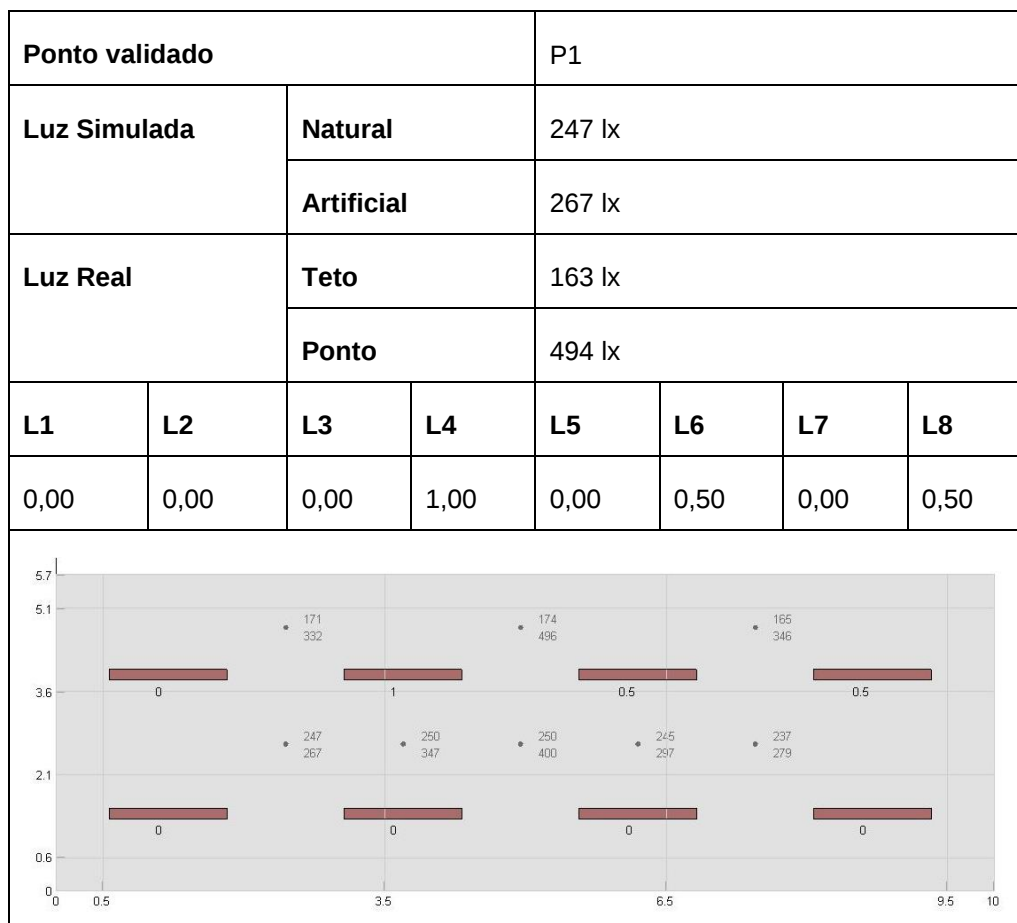
Fatores de forma da Face 5								
F71	F72	F73	F74	F75	F76	F77	F78	Soma
0,034	0,065	0,066	0,126	0,164	0,126	0,000	0,419	1

Fatores de forma da Face 6								
F81	F82	F83	F84	F85	F86	F87	F88	Soma
0,092	0,054	0,019	0,126	0,164	0,126	0,419	0,000	1

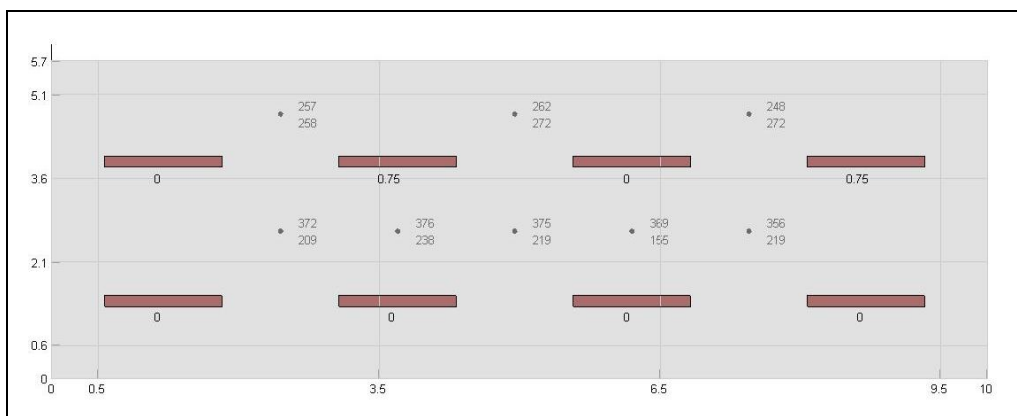
B. Exemplo de simulação

Exemplo de simulação de 7 pontos aleatório.

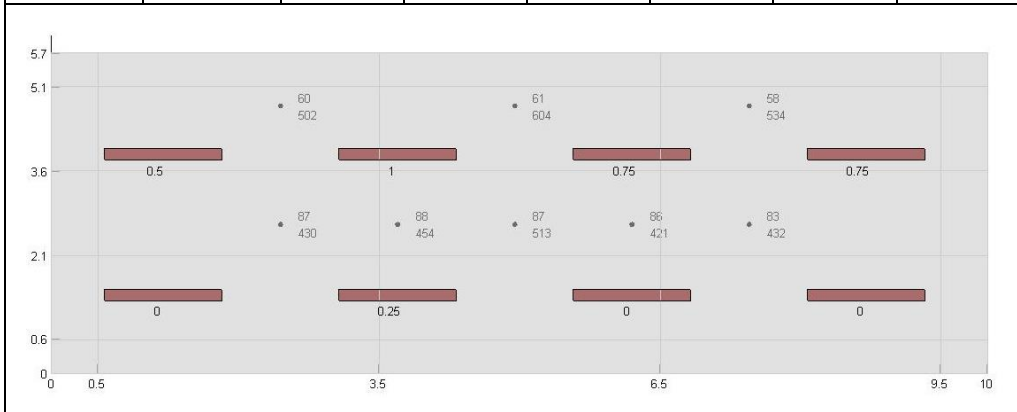
- Exemplo de *output*



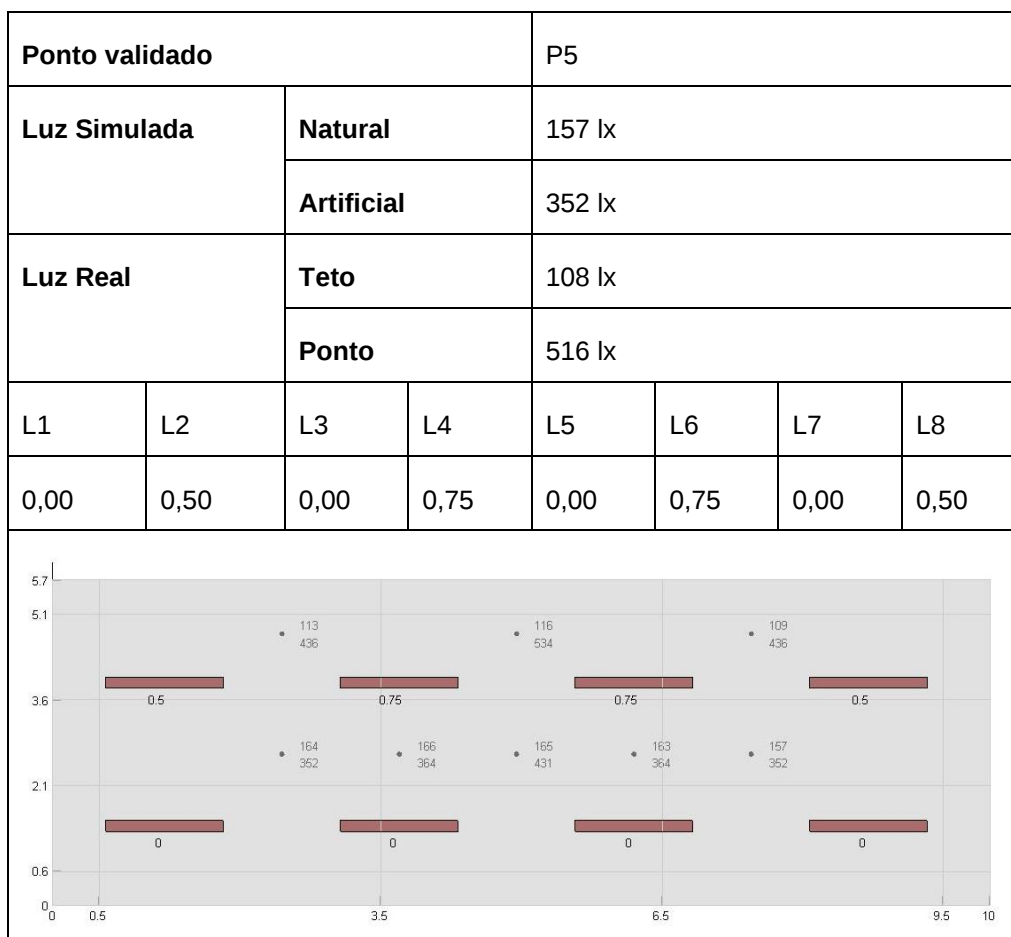
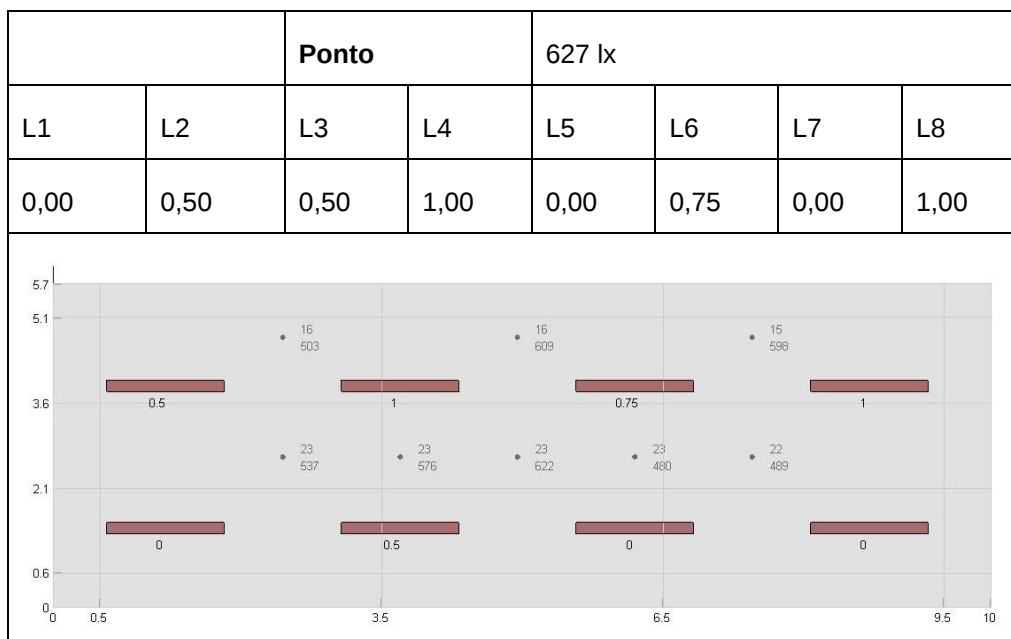
Ponto validado				P2			
Luz Simulada		Natural		376 lx			
		Artificial		238 lx			
Luz Real		Teto		245 lx			
		Ponto		574 lx			
L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75



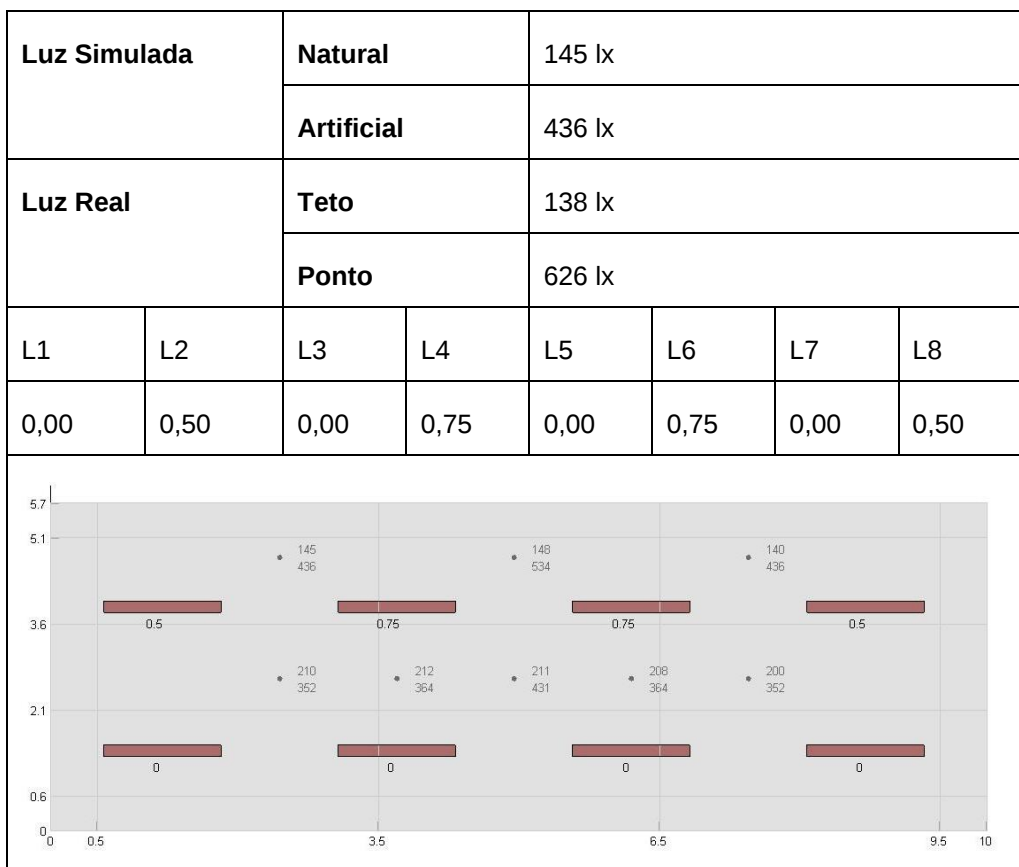
Ponto validado				P3			
Luz Simulada		Natural		87			
		Artificial		513			
Luz Real		Teto		57 lx			
		Ponto		582 lx			
L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
0,00	0,50	0,25	1,00	0,00	0,75	0,00	0,75



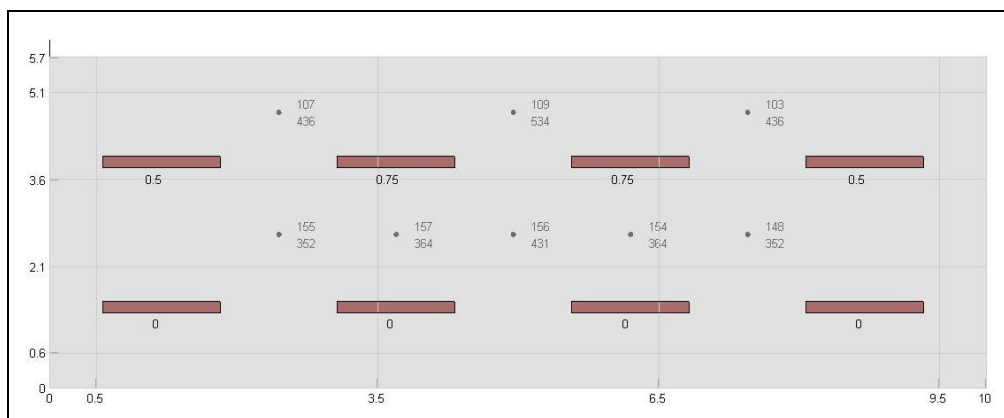
Ponto validado				P4			
Luz Simulada		Natural		23 lx			
		Artificial		480 lx			
Luz Real		Teto		15 lx			



Ponto validado	P6
-----------------------	----



Ponto validado				P8			
Luz Simulada		Natural		103 lx			
		Artificial		436 lx			
Luz Real		Teto		102 lx			
		Ponto		616 lx			
L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50



C. Casos validados

Foram feitos 84 registos para validação do modelo, 52 dos quais sequenciais e 32 esporádicos.

- Registos sequenciais

Ponto	Real		Simulado			Erro	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
	Teto	Ponto	Nat.	Art.	Total									
	[lx]		[lx]			[%]								
p6	167	507	175	338	513	-1	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p6	168	510	176	338	514	-1	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p1	163	494	247	273	520	-5	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p2	159	626	244	297	541	14	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	1,00	0,00	0,00
p8	148	621	150	340	490	21	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,00
p6	138	626	145	436	581	7	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
p1	123	560	187	352	539	4	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
p2	114	623	175	306	481	23	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
p8	102	616	103	436	539	13	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p3	57	582	87	488	575	1	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	1,00	0,25	0,50
p5	44	560	64	455	519	7	0,00	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,00	0,75
p4	35	618	53	462	515	17	0,00	0,75	0,25	0,75	0,00	1,00	0,00	0,75
p6	216	570	226	275	501	12	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
p1	232	659	352	219	571	13	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
p2	245	574	376	155	531	7	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
p3	255	795	391	219	610	23	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
p4	275	695	414	128	542	22	0,00	0,25	0,00	0,50	0,00	0,25	0,00	0,50
p5	270	775	392	210	602	22	0,00	0,50	0,00	0,25	0,00	0,75	0,00	0,00
p8	248	589	251	258	509	14	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
p8	15	485	15	503	518	-7	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p6	15	635	16	598	614	3	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p1	15	434	23	489	512	-18	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p2	15	499	23	480	503	-1	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p3	15	509	23	622	645	-27	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p4	15	627	23	576	599	4	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p5	15	462	22	537	559	-21	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p8	15	496	15	503	518	-4	0,00	1,00	0,00	0,75	0,50	1,00	0,00	0,50
p6	145	624	152	336	488	22	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,75	0,00	0,50
p6	103	530	108	436	544	-3	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p1	109	476	165	352	517	-9	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p2	112	618	172	364	536	13	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50

(Continuação)

Ponto	Real		Simulado			Erro	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
	Teto	Ponto	Nat.	Art.	Total									
	[lx]					[%]								
p3	112	598	172	431	603	-1	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p4	108	632	163	364	527	17	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p5	108	516	157	352	509	1	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p8	108	521	109	436	545	-5	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p6	108	596	113	436	549	8	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p6	162	545	170	338	508	7	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p1	165	683	251	273	524	23	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p2	169	707	260	250	510	28	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p3	173	803	265	279	544	32	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p4	176	791	265	250	515	35	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p6	114	630	119	429	548	13	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p6	162	618	184	323	507	18	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,50
p6	114	648	130	429	559	14	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,50
p6	179	706	204	304	508	28	0,00	0,25	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,25
p6	20	680	23	598	621	9	0,00	0,75	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,75
p1	273	601	414	219	633	-5	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
p2	277	557	462	155	617	-11	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
p2	213	719	355	315	670	7	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,00
p3	231	860	384	417	801	7	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,00
p3	243	923	404	417	821	11	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,00
p8	251	643	276	548	824	-28	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,75	0,00	0,00

- Registos esporádicos

Ponto	Real		Simulado			Erro	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
	Teto	Ponto	Nat.	Art.	Total									
	[lx]					[%]								
P1	11	420	17	476	507	-21	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P1	265	688	402	336	738	-7	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P1	121	494	184	336	520	-5	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P1	215	597	326	196	522	13	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P2	11	523	17	515	536	-2	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P2	121	476	186	294	480	-1	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P2	265	785	407	294	701	11	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P2	215	812	330	223	553	32	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P3	11	501	17	668	683	-36	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P3	121	507	185	342	527	-4	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P3	265	912	406	342	748	18	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P3	215	757	329	205	534	29	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P4	11	606	17	591	604	0	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P4	121	700	182	320	502	28	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P4	215	695	324	145	469	33	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P4	265	1150	399	320	719	37	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P5	11	450	16	535	545	-21	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P5	215	539	312	205	517	4	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P5	121	694	176	332	508	27	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P5	265	1030	385	332	717	30	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P6	265	556	278	416	694	-25	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P6	11	622	12	582	611	2	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P6	121	564	127	416	543	4	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P6	215	835	225	242	467	44	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P7	11	648	12	669	683	-5	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P7	265	750	284	425	709	6	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P7	121	614	129	425	554	10	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P7	215	614	230	255	485	21	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75
P8	11	470	11	503	511	-9	0,00	0,75	0,00	1,00	0,50	1,00	0,00	0,50
P8	121	601	122	412	534	11	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P8	265	825	268	412	680	18	0,00	0,75	0,00	0,50	0,00	0,75	0,00	0,50
P8	215	625	217	255	472	25	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,75

D. Valores típicos de DPI, FO e FD

Tipo de espaço segundo a função	DPI		Fator de controlo	
	[(W/m ₂)/100 lx]			
	Entrada em vigor	31 Dez 2015	Ocupação FO	Disponibilidade de luz natural FD
Escritórios com mais de 6 pessoas, salas de desenho	2,5	2,1	0,9	0,9
Escritório individual 1-6 pessoas	2,8	2,4	0,9	0,9
Show room e salas de exposição, museus	2,8	2,4	1,0	1,0
Salas de aula, salas de leitura, bibliotecas, salas de trabalho de apoio, salas de reuniões/conferências/auditórios	2,8	2,4	0,9	0,8
Laboratórios, salas de exames/tratamento, blocos operatórios	2,8	2,4	1,0	1,0
Salas de pré e pós-operatório	4,0	3,4	0,8	0,8
Cozinhas, armazéns, arquivos, polidesportivos/ginásios e similares, salas técnicas (centros de dados, fotocópias e similares), parques de estacionamento interiores	4,0	3,4	0,9	1,0
Plataformas de transportes e similares	4,0	3,4	1,0	1,0
Lojas de comércio e serviços, retalhistas em geral - zona de público, espaços fabris em geral	4,0	3,4	1,0	1,0
Hall/Entradas, corredores, escadas, salas de espera, instalações sanitárias, enfermarias e quartos individuais de clínicas e hospitais, salas de refeições (exceto restaurantes)	4,5	3,8	0,8	0,9