



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Ivo Amaro da Silva Resende

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UM SISTEMA DE
CONTROLO ON-OFF E UM SISTEMA DE CONTROLO
AUTOMÁTICO DE FLUXO LUMINOSO**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na especialização de Energia, orientada pelo Professor Doutor Tony Richard de Oliveira de Almeida e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Abril de 2021



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UM SISTEMA DE
CONTROLO ON-OFF E UM SISTEMA DE CONTROLO
AUTOMÁTICO DE FLUXO LUMINOSO**

Ivo Amaro da Silva Resende

ORIENTADOR

Professor Doutor Tony Richard de Oliveira de Almeida

JÚRI

Presidente

Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge

Vogais

Professor Doutor Pedro Manuel Soares Moura
Professor Doutor Tony Richard de Oliveira de Almeida

Abril de 2021

*“Do what thou wilt shall be the whole of the Law”
– Aleister Crowley*

Agradecimentos

A realização desta dissertação representa o fim de um ciclo, que só foi possível concluir com a ajuda de várias pessoas, a quem eu deixo o meu sincero agradecimento.

Ao Professor Doutor Tony Richard de Oliveira de Almeida, pela inteira disponibilidade e colaboração na realização desta dissertação.

Ao Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge, por ter facultado algumas das informações necessárias para a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos, pela camaradagem e por todos os momentos partilhados ao longo destes anos.

À Daniela, por toda a cumplicidade, por estar sempre lá para me aconselhar e motivar e por acreditar sempre em mim.

Por fim, à minha família: à minha irmã e ao meu irmão pelo companheirismo e por todo o apoio. Aos meus pais, pelos conselhos, pelos sacrifícios e por todo o esforço para me proporcionarem sempre o melhor.

A todos, muito obrigado!

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre um controlo do tipo *on-off* e um controlo automático de fluxo luminoso (*dimnable*) para os sistemas de iluminação das salas de aula do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra.

Tendo como base as características do ambiente exterior e interior de cada sala, calculou-se o Fator de Luz de Dia Médio, o que permitiu obter o valor de iluminância exterior que garante uma iluminância interior ao nível do plano de trabalho de 500 lux (valor recomendado para edifícios educacionais para adultos). Procedendo de igual forma para diferentes valores de iluminância interior calculou-se o número de horas que a iluminação natural é insuficiente para garantir cada um desses valores.

Desta forma foi possível simular o comportamento de um sistema de controlo automático de fluxo luminoso, que incrementa o valor do fluxo em 10% sempre que a iluminância exterior diminui de tal maneira que provoca uma redução de 50 lux da iluminância interior.

No caso do controlo do tipo *on-off* ocorrem apenas duas situações: quando a luz natural é suficiente para garantir 500 lux ao nível do plano de trabalho, o sistema de iluminação permanece desligado; quando isto não se verifica o sistema é ligado.

Foram então calculados os consumos associados a cada um destes sistemas de controlo e desenvolveu-se uma ferramenta de simulação em MATLAB capaz de ilustrar graficamente os níveis de iluminância interior em três salas de aula com diferentes características.

Ficou demonstrado que nas três salas seria mais vantajosa a implementação de um sistema *dimnable* em detrimento de um sistema *on-off* pelas seguintes razões: o sistema *dimnable* apresenta consumos entre 32% e 49% daqueles que seriam os consumos do sistema *on-off*; o sistema *dimnable* mantém os níveis de iluminância em valores mais próximos do recomendado (500 lux).

Palavras-chave: Iluminação natural; Iluminância; Controlo *on-off*; Controlo automático do fluxo luminoso; Eficiência energética.

Abstract

The aim of this dissertation was to carry out a comparative analysis between an on-off control and a dimmable control of the lighting system in the classrooms at the Department of Electrical and Computer Engineering at the University of Coimbra.

Based on the characteristics of the interior and exterior environment of each room, the Average Daylight Factor was calculated so that one could obtain the exterior illuminance value that guaranteed a 500 lux interior illuminance in working area, which is the recommended value for educational buildings for adults. Proceeding in the same way for different values of interior illuminance, the number of hours that natural lighting is insufficient to guarantee each of these values was calculated.

This way it was possible to simulate the behavior of a dimmable system, which increased the flux value by 10% whenever the external illuminance decreased in such way that it caused a reduction of 50 lux of the interior illuminance.

Regarding the on-off control, there are only two situations: first, when natural light is sufficient to guarantee 500 lux in the work area, the lighting system remains off; second, when it does not, the system is turned on.

The consumption associated with each of these control systems was then calculated and a MATLAB simulation tool was developed to illustrate the levels of interior illuminance in three classrooms with different characteristics.

It was demonstrated that it would be more advantageous to implement a dimmable system in these three classrooms for the following reasons: first, the dimmable system consumes between 32% and 49% when compared to on-off system; moreover, the dimmable system keeps the illuminance levels closer to the recommended value (500 lux).

Keywords: Natural lighting; Illuminance; On-off control; Dimmable control; Energy efficiency.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xi
SIMBOLOGIA, SIGLAS E ACRÓNIMOS	xiii
Simbologia	xiii
Siglas e Acrónimos.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura	2
2. LUMINOTECNIA	5
2.1 Conceitos luminotécnicos.....	5
2.1.1 Grandezas luminotécnicas.....	5
2.1.2 Características das lâmpadas	6
2.2 Equipamento luminotécnico.....	8
2.2.1 Luminária	8
2.2.2 Balastro.....	9
2.2.3 Fontes de luz artificial.....	11
2.3 Métodos de projeto luminotécnico.....	15
2.3.1 Método das cavidades zonais.....	16
2.3.2 Método da densidade de potência específica por área.....	17
2.3.3 Método ponto a ponto.....	18
3. CONTROLO DE ILUMINAÇÃO.....	19
3.1 Controlo manual	19
3.2 Controlo com interruptores horários	19
3.3 Controlo com interruptores crepusculares	19
3.4 Controlo com sensores de presença.....	20
3.4.1 Sensor passivo de infravermelhos.....	20
3.4.2 Sensor ultrassónico.....	20
3.4.3 Sensor híbrido.....	20
3.5 Controlo automático de fluxo luminoso.....	20
3.5.1 Sistemas de controlo automático de fluxo luminoso.....	21
4. INTEGRAÇÃO DA LUZ NATURAL	23
4.1 Fator de Luz do Dia	23
4.2 Fator de Luz do Dia Médio.....	24

4.3	Caracterização dos ambientes exterior e interior	25
4.4	Metodologia de cálculo luminotécnico	26
5.	CÓDIGO DESENVOLVIDO E CASOS DE ESTUDO	31
5.1	Código desenvolvido em MATLAB	31
5.2	Casos de estudo	35
5.2.1	Sala T4.1.....	36
5.2.2	Sala T5.1.....	40
5.2.3	Sala T4.4.....	43
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
6.1	Conclusões	47
6.2	Propostas de trabalhos futuros	48
	BIBLIOGRAFIA	49
	ANEXO A	53
	ANEXO B.....	55
	ANEXO C.....	57
	ANEXO D	63
	ANEXO E.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Medidas de melhoria por âmbito de intervenção em 2019 [1].	1
Figura 1.2 - Medidas de melhoria por âmbito de intervenção 2014 a 2019 [1].	2
Figura 2.1 - Grandezas luminotécnicas [4].	5
Figura 2.2 - Iluminância vs Luminância [3].	6
Figura 2.3 - Temperatura de cor [6].	7
Figura 2.4 – Diferentes Índices de Reprodução de Cor [7].	7
Figura 2.5 - Exemplos de luminárias [9]–[14].	8
Figura 2.6 - a) Refletor [16]. b) Refrator [17]. c) Difusor [18].	9
Figura 2.7 - a) Balastro eletromagnético [20]. b) Balastro eletrónico [21].	10
Figura 2.8 - Lâmpada incandescente [24].	11
Figura 2.9 - Lâmpadas de halogéneo [26][27].	12
Figura 2.10 - Lâmpadas de descarga: a) Lâmpada de vapor de mercúrio [30]. b) Lâmpada de vapor de sódio a alta pressão [31]. c) Lâmpada tubular fluorescente [32]. d) Lâmpada fluorescente compacta [33].	12
Figura 2.11 - Lâmpada LED com difusor e com difusor removido [35].	13
Figura 2.12 - Esquema de uma junção P-N de semicondutor [35].	13
Figura 2.13 - Lâmpadas LED: a) Formato tradicional [37]. b) Com tecnologia de filamento LED visível [38]. c) Tubo LED [39].	14
Figura 2.14 - <i>Driver</i> LED [41].	15
Figura 2.15 - Método das cavidades zonais.	17
Figura 2.16 - Método ponto a ponto	18
Figura 3.1 - Esquema do sistema de controlo DALI [52].	21
Figura 4.1 - Método de cálculo do FLD [55].	23
Figura 4.2 - Componentes do FLD [57]	24
Figura 4.3 - Disponibilidade de luz natural em percentagem de horas de trabalho em função da latitude [60].	27
Figura 5.1 - Ferramenta de simulação da iluminância sobre o plano de trabalho	31

Figura 5.2 - Função "iSlider_Callback"	32
Figura 5.3 - Função "iText_Callback"	32
Figura 5.4 - Função "iluminanciaT41F"	32
Figura 5.5 - Função "iluminanciaT41F"	33
Figura 5.6 - Função "iluminanciaT41F"	33
Figura 5.7 - Função "iluminanciaT41F"	34
Figura 5.8 - Função "iluminanciat41F"	34
Figura 5.9 - Luminária TRLX 01 12024-07 [62].....	35
Figura 5.10 - Sala T4.1.....	36
Figura 5.11 - Iluminância na Sala T4.1. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 12081 lx; b) 0 lx.....	37
Figura 5.12 - Iluminância na Sala T4.1 com controlo <i>dimming</i> . x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 12081 lx; b) 8816 lx; c) 4163 lx.	39
Figura 5.13 - Iluminância na sala T5.1. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 10000 lx; b) 0 lx.....	40
Figura 5.14 - Iluminância na sala T5.1 com controlo <i>dimming</i> . x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 10000 lx; b) 7426 lx; c) 2693 lx.	42
Figura 5.15 - Sala T4.4.....	43
Figura 5.16 - Iluminância na sala T4.4. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 13795 lx; b) 0 lx;.....	44
Figura 5.17 - Iluminância na Sala T4.4 com controlo <i>dimming</i> . x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 13795 lx; b) 8734 lx; c) 5306 lx.	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - IRC e Temperatura de Cor de fontes luminosas tradicionais [5].....	8
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos balastros eletromagnético e eletrônico... 10	
Tabela 2.3 - Requisitos recomendados para iluminação interior [42].....	16
Tabela 4.1 - Características da sala exemplo.....	26
Tabela 4.2 – Valores de iluminância exterior, iluminância interior e número de horas em que a luz natural é insuficiente para um FLDM=5.11% e latitude = 40°.....	28
Tabela 4.3 - Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural.....	29
Tabela 5.1 - Características da sala T4.1.....	36
Tabela 5.2 - Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural.....	38
Tabela 5.3 – Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural.....	41
Tabela 5.4 – Características da Sala T4.4.....	43
Tabela 5.5 – Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural.....	45

SIMBOLOGIA, SIGLAS E ACRÓNIMOS

Simbologia

$\alpha_{\text{céu}}$ – Ângulo de céu visível

η_w – Eficiência luminosa

ρ – Coeficiente de reflexão médio

τ_j – Coeficiente de transmissão luminosa do envidraçado

Φ – Fluxo luminoso

A_j – Área da superfície envidraçada

A_t – Área total de todas as superfícies

E_{int} – Iluminância interior

E_{ext} – Iluminância exterior

Siglas e Acrónimos

CD – Componente Direta

CIE – Comissão Internacional de Iluminação

CDL – Curva de Distribuição Luminosa

CO₂ – Dióxido de Carbono

CRE – Componente Refletida Exterior

CRI – Componente Refletida Interior

DALI – *Digital Addressable Lighting Interface*

DMX – *Digital Multiplex Signal*

DPI – Densidade de Potência de Iluminação

EEE – Empresa de Equipamento Elétrico, S.A.

FLD – Fator de Luz de Dia

FLDM – Fator de Luz de Dia Médio

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional

IRC – Índice de Reprodução de Cores

KNX – *Konnex Networks*

LED – Díodo Emissor de Luz

RDM – Remote Device Management

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Na atualidade, as alterações climáticas e as consequências que estas podem vir a provocar ao planeta e ao ser humano estão na ordem do dia e é por isso cada vez mais importante o desenvolvimento e implementação de medidas que contrariem essas alterações.

Parte da geração de energia elétrica advém da queima de combustíveis, resultando na produção de gases poluentes. A redução do consumo de eletricidade, além de ter como vantagem para os consumidores a diminuição da fatura energética, vai diminuir a necessidade de geração, reduzindo assim a emissão destes gases.

No setor do comércio e serviços, no ano 2019, das medidas de melhoria propostas pelo Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, 36% foram ao nível da iluminação [1], como se pode constatar na Figura 1.1.

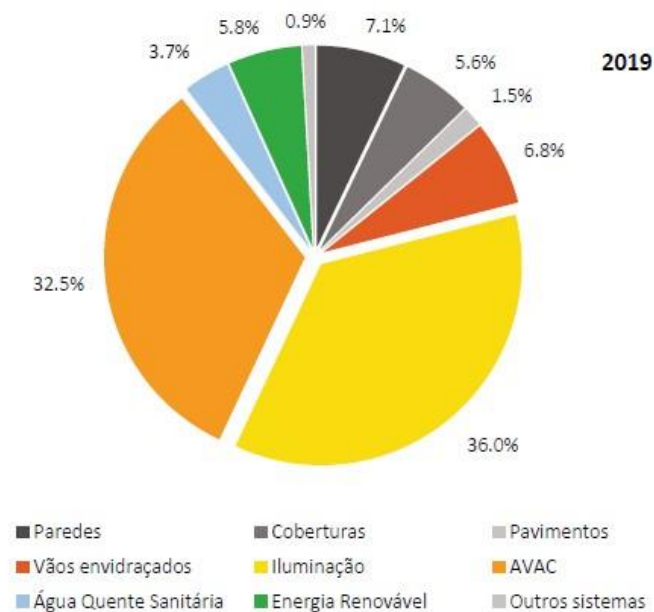


Figura 1.1 - Medidas de melhoria por âmbito de intervenção em 2019 [1].

Um maior número de medidas propostas direcionadas à iluminação, em detrimento de intervenções de outro âmbito já vem sendo habitual nos últimos anos (Figura 1.2). Isto deve-se ao facto de o consumo energético dos sistemas de iluminação artificial dos edifícios ser bastante significativo, e por isso uma utilização mais eficiente desses sistemas terá certamente um impacto considerável na redução da fatura energética. Além disso estas intervenções são relativamente fáceis de implementar [1].

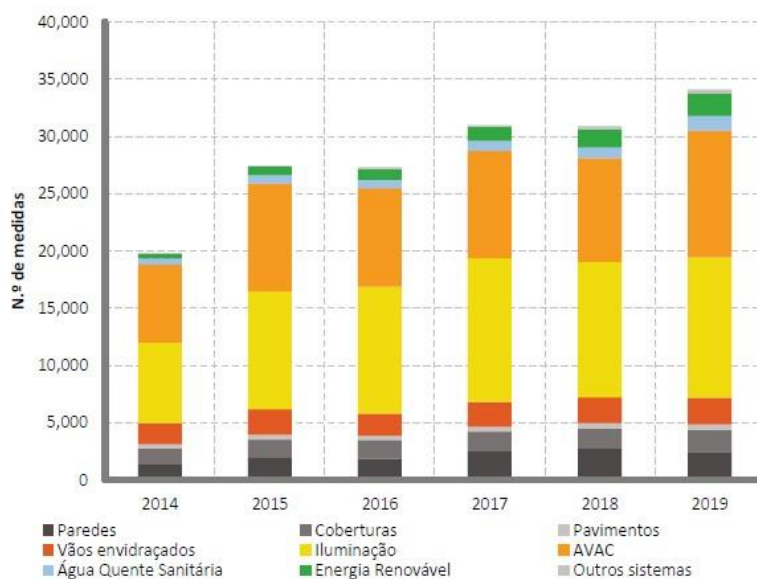


Figura 1.2 - Medidas de melhoria por âmbito de intervenção 2014 a 2019 [1].

É por isso importante o desenvolvimento e aplicação de sistemas de controlo inteligentes capazes de gerir a utilização da iluminação de uma forma eficiente, mas sem apresentar prejuízo para o conforto dos utilizadores.

1.2 Objetivos

Uma das formas de gestão de iluminação passa pela conjugação da luz artificial com a luz natural, através de sistemas capazes de ligar/desligar ou variar a intensidade de um conjunto de lâmpadas de forma automática conforme o nível de luz natural disponível.

Pretende-se então fazer uma análise comparativa a nível de consumo e eficiência entre um controlo do tipo *on-off* e um controlo *dimmbable* nas salas de aula do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra. Esta análise será feita através de simulação, sendo utilizada para esse efeito a ferramenta numérica MATLAB.

1.3 Estrutura

De forma a facilitar a compreensão do leitor, este documento divide-se em seis capítulos, constituindo a presente introdução o primeiro capítulo.

No segundo capítulo são apresentados os principais conceitos da luminotecnica, assim como equipamentos e métodos de cálculo de projeto luminotécnico.

No terceiro capítulo são descritos os vários tipos de controlo de iluminação, desde o controlo manual ao controlo automático de fluxo luminoso, identificando-se os sensores e sistemas de controlo existentes no mercado.

O quarto capítulo aborda a integração da luz natural. É neste capítulo que é apresentada a metodologia utilizada no trabalho desenvolvido.

No quinto capítulo descrevem-se o código desenvolvido e os casos de estudo, onde se apresentam os dados calculados – consumo, custos e iluminância – para os dois tipos de controlo, em três salas do departamento.

Por fim, no sexto capítulo evidenciam-se as principais conclusões do trabalho realizado e apresentam-se propostas para trabalhos futuros.

2. LUMINOTECNIA

Para uma melhor compreensão do trabalho realizado, apresentam-se neste capítulo grandezas, conceitos e equipamentos luminotécnicos, assim como métodos de projeto luminotécnico, entre os quais, o método ponto a ponto, utilizado neste trabalho.

2.1 Conceitos luminotécnicos

2.1.1 Grandezas luminotécnicas

Conforme se ilustra nas Figuras 2.1 e 2.2, as principais grandezas luminotécnicas são as seguintes [2] [3]:

- **Fluxo luminoso (Φ):** Quantidade de radiação visível emitida por uma fonte de luz em todas as direções por unidade de tempo, medido em lúmen (lm).
- **Intensidade luminosa (**I**):** Fluxo luminoso irradiado numa determinada direção. A sua unidade é a candela (cd).
- **Iluminância (**E**):** Fluxo luminoso que incide sobre uma determinada superfície a uma dada distância da fonte de luz. É expressa em lux (lx).
- **Luminância (**L**):** Intensidade luminosa refletida numa superfície, medida em cd/m^2 .
- **Curva de Distribuição Luminosa (CDL):** Representação gráfica da intensidade luminosa em todos os ângulos em que ela é direcionada num plano.

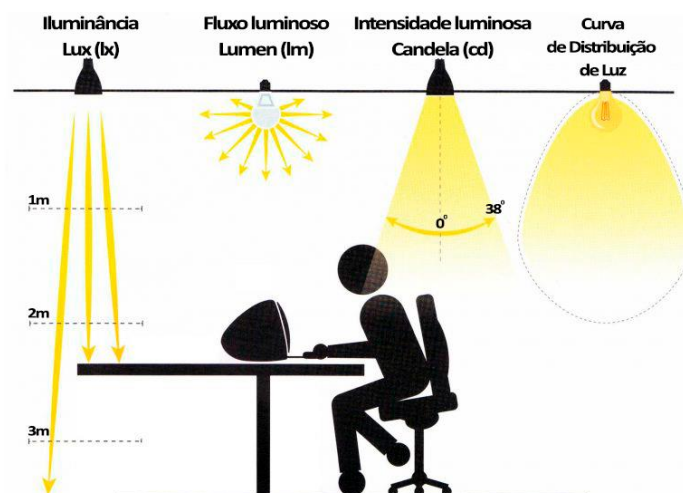


Figura 2.1 - Grandezas luminotécnicas [4].

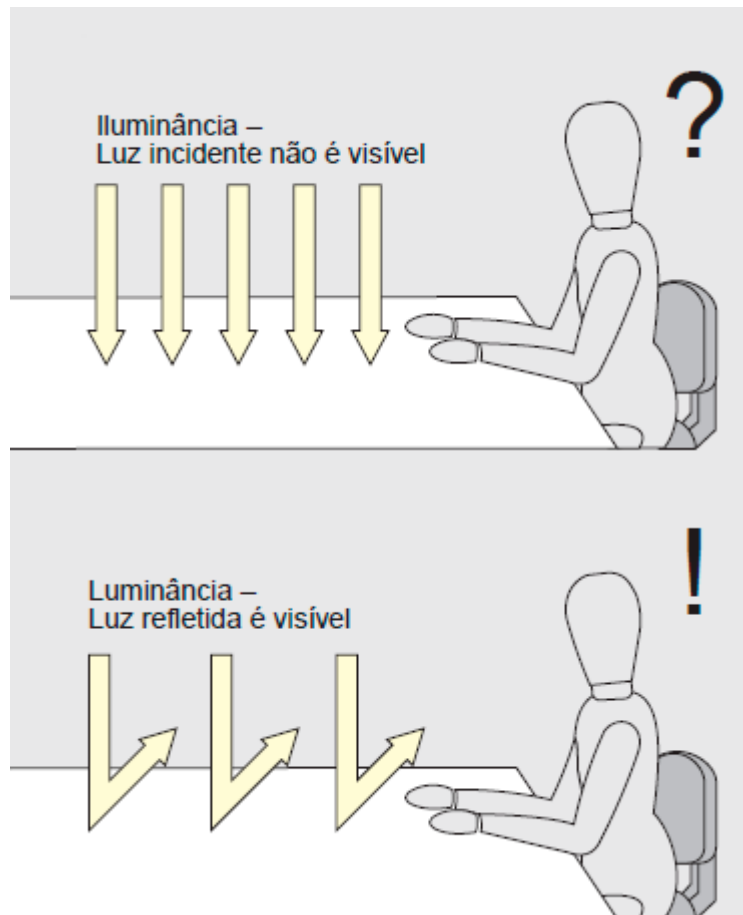


Figura 2.2 - Iluminância vs Luminância [3].

2.1.2 Características das lâmpadas

No que diz respeito às características das lâmpadas, é importante entender os conceitos listados de seguida [2] [3] [5]:

- **Temperatura de cor (T):** Indica a aparência da cor da luz emitida por uma lâmpada. Quanto mais clara é a tonalidade da luz, maior é a temperatura de cor. É expressa em Kelvin (K).
- **Índice de Reprodução de Cores (IRC):** Caracteriza o grau de fidelidade com que as fontes luminosas revelam as cores dos objetos iluminados em comparação à aparência dessas cores quando iluminadas pela luz natural do dia. É representado numa escala de 0 a 100, sendo 100 o valor ideal.
- **Eficiência Luminosa (η_w):** É a razão entre o fluxo luminoso e a potência consumida pela lâmpada. Quanto maior é a radiação emitida por watt, maior é a eficiência da lâmpada. A sua unidade é o lúmen por Watt (lm/W).

A iluminação de um espaço tem influência no estado emocional das pessoas que o frequentam, por isso deve-se escolher um sistema de iluminação com uma temperatura de cor adequada às atividades desenvolvidas nesse espaço. Por norma, a luz “quente” é utilizada em locais onde se pretende criar um ambiente aconchegante e relaxado, como em quartos e salas de estar. Já a luz “fria” é utilizada em espaços onde se pretende que os utilizadores estejam ativos e atentos, como em escritórios, fábricas, escolas, entre outros.

Na Figura 2.3 [6] observa-se uma gama das tonalidades da luz onde se constata que quanto mais clara (mais fria) é a tonalidade da luz, maior é a sua temperatura de cor.



Figura 2.3 - Temperatura de cor [6].

O Índice de Reprodução de Cores assume um papel de relevo na escolha de luminárias para utilizações onde a cor dos objetos iluminados é um fator importante, como em superfícies comerciais, museus, entre outros. Na Figura 2.4 [7] verifica-se o mesmo produto quando iluminado por quatro fontes luminosas com Índices de Reprodução de Cores diferentes. Quanto mais próximo de 100 – IRC da luz solar – for o IRC da lâmpada, maior é a fidelidade com que esta revela a cor do produto.



Figura 2.4 – Diferentes Índices de Reprodução de Cor [7].

Na Tabela 2.1 [5] apresentam-se o IRC e a Temperatura de Cor de algumas fontes luminosas.

Tabela 2.1 - IRC e Temperatura de Cor de fontes luminosas tradicionais [5].

Fonte luminosa	Temperatura de Cor (K)	IRC
Lâmpada de vapor de sódio a baixa pressão	1800	15
Lâmpada de vapor de mercúrio	6410	17
Lâmpada de vapor de sódio a alta pressão	2100	24
Lâmpada fluorescente branco quente	2940	51
Lâmpada fluorescente branco natural	4230	64
Lâmpada de iodetos metálicos	5400	96
Lâmpada incandescente	2700	90
Luz solar	5500	100

2.2 Equipamento luminotécnico

2.2.1 Luminária

A luminária é o equipamento onde a fonte de luz é acoplada e além de garantir a alimentação elétrica, esta deve dirigir o fluxo luminoso de modo a assegurar o conforto visual com a máxima eficiência. Tem também a função de proteger de agressões externas a fonte de luz e outros equipamentos elétricos e óticos nela contidos e a sua construção deve ter em vista a fácil substituição da fonte luminosa [8].

Uma vez que as lâmpadas produzem calor, o que diminui a eficiência e a duração das mesmas, algumas luminárias possuem um sistema de dissipação de calor, mitigando assim as duas situações referidas.

Consoante a finalidade funcional e/ou estética, as luminárias apresentam vários formatos, alguns deles demonstrados na Figura 2.5 [9]–[14].



Figura 2.5 - Exemplos de luminárias [9]–[14].

A distribuição do fluxo luminoso da lâmpada é garantida pelo sistema ótico, que pode incluir refletores, refratores, difusores e alhetas. Os refletores e as alhetas, através da reflexão, modificam a distribuição da luz, dirigindo-a para um determinado ângulo, orientando assim o fluxo luminoso na direção pretendida. Já os refratores orientam o fluxo

luminoso por meio da refração, aquando da passagem da luz por eles mesmos. São tradicionalmente de vidro ou acrílico e são eles que protegem o interior da luminária de ameaças externas, como choques mecânicos, poeiras, entre outros. Por fim, os difusores, geralmente de material opaco ou translúcido, além de protegerem o interior da luminária, evitam o ofuscamento, contribuindo para um maior conforto visual [15]. Na Figura 2.6 [16]–[18] ilustram-se exemplos destes três equipamentos.

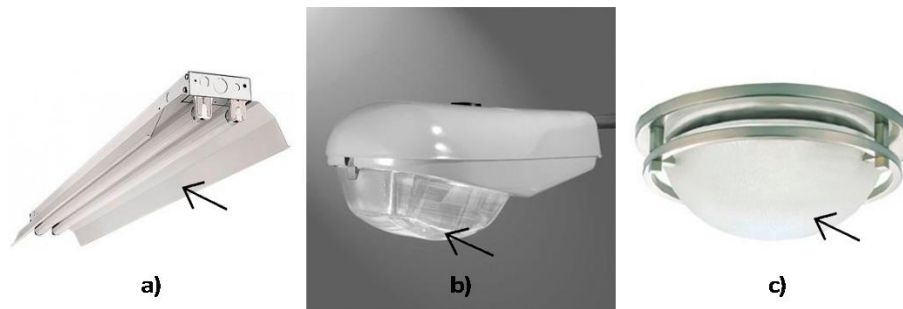


Figura 2.6 - a) Refletor [16]. b) Refrator [17]. c) Difusor [18].

2.2.2 Balastro

O balastro é um dispositivo inserido entre a rede e as lâmpadas de descarga e tem como funções principais produzir a tensão de arranque necessária e limitar a corrente para valores adequados ao normal funcionamento da lâmpada [19]. Em alguns casos o balastro também tem a capacidade de corrigir o fator de potência e/ou regular o fluxo luminoso da lâmpada [8].

Dependendo da sua constituição, os balastros podem ser classificados em dois tipos: eletromagnéticos ou eletrônicos. Os balastros eletromagnéticos são constituídos por uma bobine e um núcleo ferromagnético laminado. Estes equipamentos estão a cair em desuso devido às elevadas perdas: efeito de Joule, histerese e correntes de Foucault. Os balastros eletrônicos são essencialmente conversores de eletrónica de potência AC-DC-AC e além das funções principais comuns ao balastro magnético, estes equipamentos protegem o circuito em caso de avaria, limitam a distorção harmónica e a interferência eletromagnética e são capazes de fazer a correção do fator de potência para valores próximos da unidade [8].

De forma a facilitar ao leitor a compreensão das diferenças entre estes dois tipos de equipamentos, apresenta-se a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens dos balastros eletromagnético e eletrónico

	Vantagens	Desvantagens
Balastro eletromagnético	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo • Simples e robusto 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso elevado • Baixa fiabilidade na ignição • Baixo fator de potência • Rendimento reduzido • Risco de sobretensões, devido ao efeito de saturação • Variações de potência da lâmpada provocadas por variações da tensão na rede • Opera no máximo duas lâmpadas • Fenómeno de cintilação
Balastro eletrónico	<ul style="list-style-type: none"> • Peso reduzido • Maior rendimento • Elevado fator de potência • Em caso de anomalia, desliga as lâmpadas de forma automática • Pode operar mais de quatro lâmpadas em simultâneo • Estabiliza a potência da lâmpada em situações de variação da tensão na rede • Elimina o fenómeno de cintilação devido à alta frequência de operação • Silencioso 	<ul style="list-style-type: none"> • Preço elevado • Interferências elétricas • Maior poluição da rede, devido ao facto de funcionar a uma frequência igual ou superior a 20 kHz

Na Figura 2.7 [20][21] apresentam-se o balastro magnético e o balastro eletrónico.



Figura 2.7 - a) Balastro eletromagnético [20]. b) Balastro eletrónico [21].

2.2.3 Fontes de luz artificial

2.2.3.1 Lâmpada incandescente

A fabricação e importação de lâmpadas domésticas incandescentes convencionais foi suprimida na União Europeia inicialmente pela Diretiva 2005/32/CE. Esta lei foi entretanto repelida pela Diretiva 2009/125/CE relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de conceção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia [22]. A 1 de setembro de 2012 o fabrico e importação deste equipamento tornaram-se oficialmente proibidos em todos os países da União Europeia [23]. No entanto, não se pode deixar de referenciar esta que foi a primeira lâmpada elétrica comercializável e utilizada durante mais de um século, ilustrada na Figura 2.8 [24].



Figura 2.8 - Lâmpada incandescente [24].

O seu princípio de funcionamento baseia-se na passagem de corrente elétrica pelo filamento de tungsténio, tornando-o incandescente e gerando assim energia luminosa. Este filamento está inserido numa ampola de vidro que contém um gás inerte para que não ocorra nenhuma reação química com o filamento, o que diminuiria a sua vida útil.

Os aspetos que levaram à retirada desta lâmpada do mercado foram sobretudo o baixo rendimento – apenas 5% da energia consumida é transformada em luz, sendo os restantes 95% transformados em calor – e o reduzido tempo médio de vida útil que é de apenas mil horas [25].

Além das lâmpadas incandescentes convencionais, também as lâmpadas de halogéneo de alta intensidade e ineficientes foram descontinuadas na União Europeia, as quais deixaram de ser comercializadas a partir do dia 1 de setembro de 2018. O princípio de funcionamento deste tipo de lâmpadas é idêntico ao das lâmpadas incandescentes convencionais, no entanto, além do gás inerte existem também gases halogéneos dentro da ampola que reagem com as partículas de tungsténio libertadas do filamento. Esta reação combinada com a energia térmica dentro da lâmpada faz com que as partículas se

depositem novamente no filamento, criando o ciclo regenerativo do halogéneo. Como consequência a luz emitida é mais branca, brilhante e uniforme e a lâmpada apresenta maior eficiência energética comparativamente á lâmpada incandescente convencional [25].

Na Figura 2.9 [26][27] estão ilustrados três formatos da lâmpada de halogéneo.



Figura 2.9 - Lâmpadas de halogéneo [26][27].

2.2.3.2 Lâmpada de descarga

A produção de luz numa lâmpada de descarga deve-se à passagem de corrente elétrica através de um meio gasoso constituído por um gás nobre ou vapores de mercúrio ou sódio. A diferença de potencial aplicada entre os elétrodos da lâmpada gera uma descarga elétrica e os eletrões emitidos colidem com os átomos do gás presente no interior da lâmpada, provocando a excitação dos mesmos. Quando os átomos voltam ao seu estado de equilíbrio emitem maioritariamente radiação ultravioleta, invisível ao olho humano. Por isso mesmo a superfície interna da lâmpada é revestida por um pó fluorescente à base de compostos de fósforo que converte a radiação ultravioleta em luz visível [28] [29].

As lâmpadas de descarga mais comuns – ilustradas na Figura 2.10 [30]–[33] – são as seguintes: lâmpada de vapor de mercúrio, lâmpada de vapor de sódio a alta pressão, lâmpada tubular fluorescente e lâmpada fluorescente compacta e apresentam rendimentos e tempos de vida útil superiores às lâmpadas incandescentes.



Figura 2.10 - Lâmpadas de descarga: a) Lâmpada de vapor de mercúrio [30]. b) Lâmpada de vapor de sódio a alta pressão [31]. c) Lâmpada tubular fluorescente [32]. d) Lâmpada fluorescente compacta [33].

No que diz respeito às suas utilizações, a lâmpada de vapor de mercúrio e de vapor de sódio são usadas principalmente em espaços exteriores e armazéns, locais onde a restituição de cor não tem importância significativa. Já a lâmpada tubular fluorescente, devido ao seu rendimento, baixo custo e uma aceitável restituição cromática, é utilizada maioritariamente em escritórios, salas de aula, bibliotecas, corredores, cozinhas, entre outros. A lâmpada fluorescente compacta é mais indicada para uso doméstico, mas também para gabinetes e corredores [34].

2.2.3.3 Díodo emissor de luz – *Light Emitting Diode (LED)*

O díodo emissor de luz ou LED – acrónimo inglês para *Light Emitting Diode* – como é frequentemente conhecido, é um dispositivo optoeletrónico que transforma energia elétrica em luz. Na figura 2.11 [35] representa-se uma lâmpada constituída por dez LED.



Figura 2.11 - Lâmpada LED com difusor e com difusor removido [35].

Um LED é essencialmente um díodo semiconductor, e como tal, permite fluxo de corrente em apenas uma direção e é constituído por uma junção P-N, ilustrada de uma forma simplificada na Figura 2.12 [35].

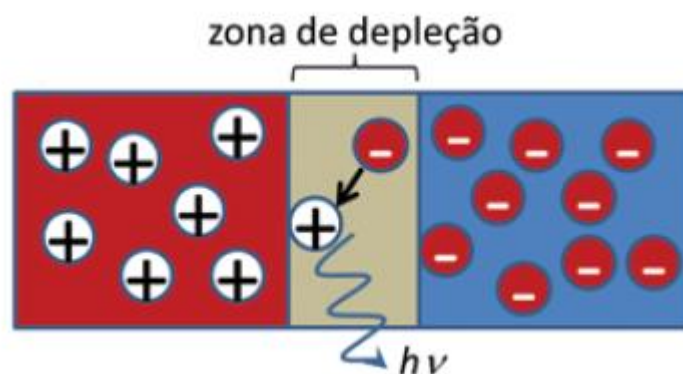


Figura 2.12 - Esquema de uma junção P-N de semiconductor [35].

A região P, denominada banda de valência, contém excesso de cargas positivas, também designadas por lacunas, enquanto a região N ou banda de condução contém excesso de cargas negativas, eletrões. Quando é aplicada uma tensão através da junção P-N os eletrões movem-se no sentido da banda de valência e as lacunas movem-se no sentido da banda de condução, recombinando-se na zona de depleção. Quando isto acontece a energia é libertada sob a forma de luz (emissão de fótons) [35].

Relativamente às outras fontes de luz artificial, o LED é a que apresenta maior eficiência luminosa – 95% da energia consumida é transformada em luz e apenas 5% em calor – e além disso possui muitas outras vantagens [36]:

- o seu tempo de vida útil ronda as 50000 horas, ou seja, admitindo que é utilizado em média 3 horas por dia, o LED terá uma duração de 45 anos, valor incomparável com os restantes tipos de lâmpadas;
- comutação *on-off* instantânea, sem perder vida útil;
- não possui substâncias nocivas, como por o exemplo o mercúrio;
- emissões reduzidas de CO₂;
- poupança na fatura de eletricidade devido aos seus baixos consumos;
- permite regulação da intensidade luminosa;
- versatilidade, pois é adequado para iluminação interior e iluminação pública, assim como para iluminação decorativa.

Devido às vantagens descritas, as lâmpadas LED têm vindo a substituir na última década as lâmpadas já referidas anteriormente neste documento, encontrando-se no mercado diversos formatos deste equipamento, alguns exemplificados na Figura 2.13 [37]–[39].

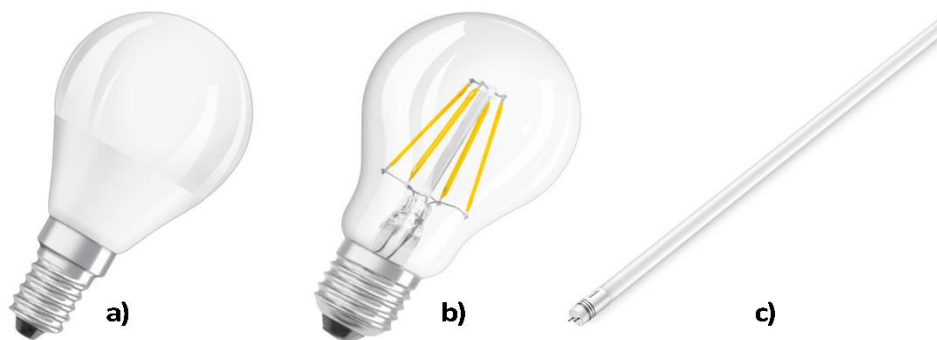


Figura 2.13 - Lâmpadas LED: a) Formato tradicional [37]. b) Com tecnologia de filamento LED visível [38]. c) Tubo LED [39].

Assim como qualquer diodo, “o LED possui uma relação exponencial entre a tensão aplicada aos seus terminais e a corrente que o atravessa (característica V-I)” [40]. Devido a esta característica, uma ligeira variação da tensão de alimentação pode levar a uma elevada variação da corrente, o que pode provocar a destruição do LED. Por este motivo, os LEDs são alimentados por fontes de alimentação de corrente constante (LED *Drivers*), que além de converterem a tensão alternada da rede em tensão contínua, evitam que a corrente alcance valores que possam danificar os LEDs e em alguns casos permitem a variação do fluxo luminoso. Um exemplo deste equipamento é ilustrado na Figura 2.14 [41].



Figura 2.14 - *Driver* LED [41].

2.3 Métodos de projeto luminotécnico

A norma EN12464-1:2011, Luz e Iluminação – Iluminação de locais de trabalho – Parte 1: Locais de trabalho interiores especifica recomendações para soluções de iluminação para a maioria dos locais de trabalho interiores, tendo em conta a quantidade e a qualidade de iluminação para pessoas com capacidade visual normal [42].

Na Tabela 2.3 [42] são apresentados os níveis recomendados de iluminância, encadeamento máximo¹, uniformidade da iluminância mínima² e o índice de restituição cromática por tipo de área, tarefa e atividade para que o conforto visual seja garantido.

¹ O índice de encadeamento varia de UGR_L 10 (sem efeito), passando por UGR_L 16 (desagradável), até UGR_L 28 (intrusivo) [42].

² Quando o requisito de iluminância é de 300 lux e o requisito de uniformidade da iluminância mínima é de 0.6, deve-se verificar uma iluminância de pelo menos 180 lux em qualquer ponto do plano de trabalho [42]. $0.6 \times 300 = 180 \text{ lux}$

Tabela 2.3 - Requisitos recomendados para iluminação interior [42].

Tipo de área, tarefa e atividade	Iluminância média mantida por área da tarefa (lx)	Encadeamento máximo (UGR_L)	Uniformidade da iluminância mínima (U_o)	IRC (Ra)
Escritório: Escrever, ler e processamento de dados	500	19	0.40	80
Escritório: Recepção	300	22	0.60	80
Loja comercial: Zona de vendas	30	22	0.40	80
Reuniões públicas: Halls de entrada	100	22	0.40	80
Reuniões públicas: Corredores	100	25	0.40	80
Reuniões públicas: Salas de conferência	500	19	0.60	80
Edifício educativo: Salas de aulas	300	19	0.60	80
Edifício educativo: Educação de adultos	500	19	0.60	80
Edifício educativo: Desenho técnico	750	16	0.70	80
Saúde: Iluminação geral nas enfermarias	100	19	0.40	80
Saúde: Análise de tratamento	1000	19	0.70	90

De forma a cumprir estes requisitos, os projetos luminotécnicos podem ser realizados utilizando diversos métodos, destacando-se aqui o método das cavidades zonais, o método da densidade de potência específica por área e o método ponto a ponto [43].

2.3.1 Método das cavidades zonais

O método das cavidades zonais é utilizado para calcular a iluminância média assumindo-se uma emissão luminosa uniforme, e divide o compartimento em estudo em três cavidades, ilustradas na Figura 2.15: cavidade do teto, cavidade da sala e cavidade do chão. A cavidade do teto é a distância entre a base das luminárias e o teto, sendo zero no caso em que as luminárias estão encastradas no teto. A cavidade da sala é a distância entre a base das luminárias e o plano de trabalho. A cavidade do chão é a distância entre o plano de trabalho e o chão, sendo zero quando o plano de trabalho é ao nível do chão.

Fazendo esta divisão, é possível calcular o fator de área (relação entre as dimensões do local). Cruzando o seu valor, através da análise de tabelas que acompanham

as fichas técnicas das luminárias, com os coeficientes de reflexão das superfícies da sala obtém-se o fator de utilização. Além disso, deve-se ter em conta o fator de depreciação, devido ao aparecimento de sujidade nas superfícies e nas luminárias, assim como ao desgaste das lâmpadas com o passar do tempo.

Com base nestes fatores, calcula-se por fim o número de luminárias necessárias para satisfazer as necessidades de iluminância para o compartimento.

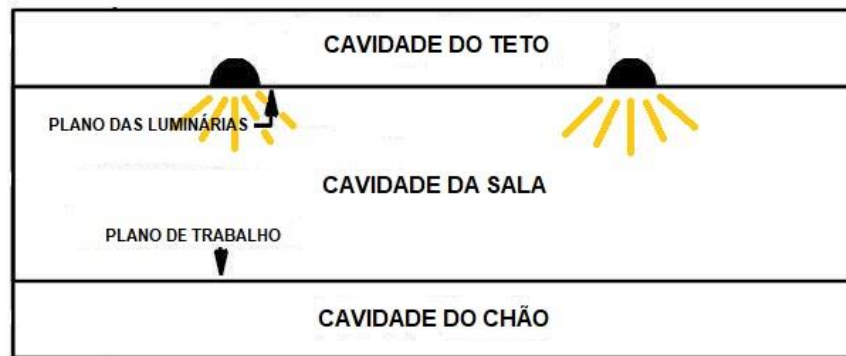


Figura 2.15 - Método das cavidades zonais.

2.3.2 Método da densidade de potência específica por área

O método da densidade de potência específica por área permite fazer uma distribuição da potência luminosa por metro quadrado, consoante o desejado para cada área. Baseia-se na divisão do edifício, tendo em conta o tipo de atividade a realizar em cada área (por exemplo: escritórios, corredores, salas de reuniões, entre outros), e calcula-se a densidade de potência para cada espaço de forma a cumprir os requisitos recomendados para a iluminação.

Na Equação 2.1 [44] é demonstrado o cálculo da densidade de potência de iluminação (DPI), onde P_n e P_c representam, respetivamente, a potência total das luminárias instaladas e a potência total dos equipamentos de controlo para as luminárias. F_o e F_D representam, respetivamente, o fator de controlo por ocupação e o fator de controlo por disponibilidade de luz natural, e A representa a área do compartimento em estudo.

Através da Equação 2.2 [44] é possível calcular a densidade de potência de iluminação por cada 100 lux, onde E_m representa a iluminância média do espaço em estudo.

$$DPI = \frac{(P_n F_o F_D) + P_c}{A} \quad (W/m^2) \quad (2.1)$$

$$DPI/100 \text{ lux} = \frac{DPI}{E_m} 100 \quad (W/m^2 \cdot 100 \text{ lux}) \quad (2.2)$$

2.3.3 Método ponto a ponto

Os métodos anteriores não permitem determinar a influência de uma luminária na iluminação de um determinado ponto. É possível fazer esse cálculo utilizando o método ponto a ponto, descrito na Equação 2.3 [3], onde E representa a iluminância (lx), I a intensidade luminosa (cd), h a distância (em metros) entre a luminária e o plano de trabalho e θ o ângulo formado entre a perpendicular à superfície onde se pretende calcular a iluminância e a reta que intersesta a fonte luminosa e o ponto em estudo, como se pode verificar na Figura 2.16.

$$E = I \cdot \frac{\cos^3 \theta}{h^2} \quad (2.3)$$

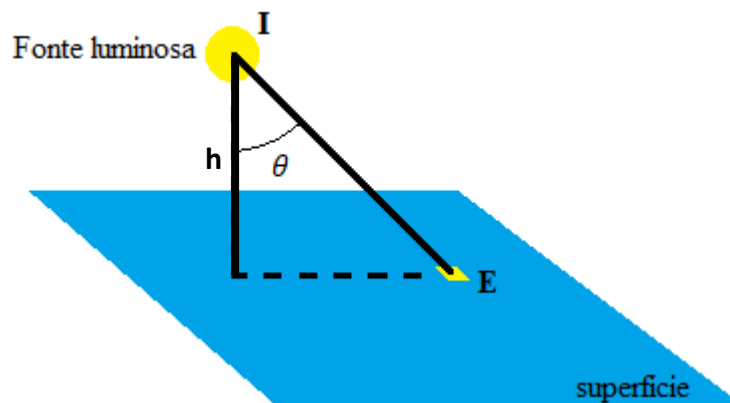


Figura 2.16 - Método ponto a ponto

O método ponto a ponto foi o método escolhido para a realização do modelo de simulação. Utilizando o MATLAB, é possível calcular a influência de cada luminária em cada ponto do plano de trabalho e assim obter uma imagem que traduza os níveis de iluminância do mesmo.

3. CONTROLO DE ILUMINAÇÃO

Em edifícios educativos grande parte da energia é consumida pelo sistema de iluminação. A utilização de lâmpadas mais eficientes, um bom planeamento da localização das mesmas, a correta segregação de circuitos, a escolha adequada do nível de iluminação para cada local e a utilização de sistemas de controlo de iluminação automáticos são medidas que têm um impacto significativo na redução do consumo energético [34][45].

Nesta secção são apresentados diferentes tipos de controlo de iluminação, desde o simples controlo manual ao controlo automático de fluxo luminoso.

3.1 Controlo manual

O controlo manual, por ser acionado pelo utilizador, é o controlo mais simples que existe e baseia-se num interruptor *on/off*. Com este tipo de sistema, a poupança energética depende única e exclusivamente do bom senso do utilizador que deverá ligar e desligar o sistema de iluminação consoante a disponibilidade de luz natural.

3.2 Controlo com interruptores horários

Interruptores horários permitem o controlo automático do circuito de iluminação de acordo com a programação efetuada pelo utilizador que escolhe o horário em que o sistema liga e desliga.

3.3 Controlo com interruptores crepusculares

Os interruptores crepusculares permitem o controlo da iluminação de acordo com a quantidade de luz natural disponível. A iluminância é medida por uma célula fotoelétrica e, caso o seu valor desça abaixo do valor definido pelo utilizador, o circuito de iluminação é ligado. Quando o nível de iluminância ultrapassa o valor definido o circuito é desligado.

3.4 Controlo com sensores de presença

Os sensores de presença permitem que a iluminação seja ligada apenas quando detetam movimento e encontram-se no mercado diversos tipos desta tecnologia, sendo descritos de seguida os mais utilizados.

3.4.1 Sensor passivo de infravermelhos

O sensor passivo de infravermelhos permite que a iluminação seja ligada quando deteta a radiação infravermelha emitida pelas pessoas. Este sensor é utilizado principalmente em espaços pequenos e fechados [46].

3.4.2 Sensor ultrassónico

O sensor ultrassónico emite sinais ultrassónicos a uma dada frequência e lê os sinais refletidos. Quando alguém passa no espaço de cobertura do sensor, a frequência do sinal refletido é diferente da frequência do sinal emitido. Ao verificar-se esta diferença o sistema de iluminação é ligado [46]. Este tipo de sensor é mais indicado para utilizações em espaços abertos.

3.4.3 Sensor híbrido

Existe ainda um sensor que se caracteriza por ser uma conjugação do sensor passivo de infravermelhos com o sensor ultrassónico. Para que a iluminação seja ligada, ambas as tecnologias devem detetar a presença de alguém, o que torna este sistema mais fiável do que os apresentados anteriormente [46]. Como apresentam um custo mais elevado, são apenas utilizados em ambientes onde é necessária essa elevada fiabilidade.

3.5 Controlo automático de fluxo luminoso

Os tipos de controlo acima referidos apenas permitem ligar ou desligar o sistema de iluminação (modo *on-off*). No entanto existem no mercado sistemas de controlo inteligentes que conjugam as tecnologias mencionadas e são capazes de ajustar o fluxo luminoso das luminárias de forma contínua ou até ligar e desligar as mesmas consoante a disponibilidade de luz natural, a presença de pessoas e a programação horária.

Uma das formas de implementar este tipo de controlo é através da utilização de sensores de luz por cima dos planos de trabalho, seja em escritórios, salas de aula ou em locais congéneres. Mediante os valores medidos pelos sensores, o sistema de controlo

varia de forma gradual (*dimming*) o fluxo luminoso das luminárias. Quando o nível de iluminância sobre o plano de trabalho é superior ao nível selecionado pelo utilizador, o sistema diminui o fluxo luminoso. Da mesma forma, quando o nível de iluminância é inferior, o sistema aumenta o fluxo luminoso das luminárias [47].

O controlo automático de fluxo só é aplicável a luminárias com balastros eletrónicos ou *LED Drivers*, pois são estes componentes que permitem variar a tensão/corrente das lâmpadas.

3.5.1 Sistemas de controlo automático de fluxo luminoso

Os sistemas de controlo automático de iluminação utilizam protocolos de comunicação em rede que possibilitam o envio de comandos de controlo e a troca de informação entre os controladores e as luminárias, destacando-se o *Digital Multiplex Signal (DMX)*, o *Remote Device Management (RDM)*, o *Konnex Networks (KNX)* e o *Digital Adressable Lighting Interface (DALI)*, sendo este último o mais utilizado pelos fabricantes de equipamentos e sistemas luminotécnicos [48].

O DALI é um protocolo de controlo digital que permite tanto o controlo coletivo como individual de cada dispositivo, sendo apenas necessário ajustar a sua configuração através de *software*, sem necessidade de alterações da cablagem, o que o torna bastante flexível [49]. A interface e o protocolo foram definidos pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) através da norma IEC 60929, e mais tarde modificados pela norma IEC 62386. Estas normas garantem a compatibilidade entre os dispositivos utilizados em todo o sistema, independentemente dos seus fabricantes [50][51].

Na Figura 3.1 [52] observa-se um exemplo esquemático de uma sub-rede de controlo de iluminação DALI.

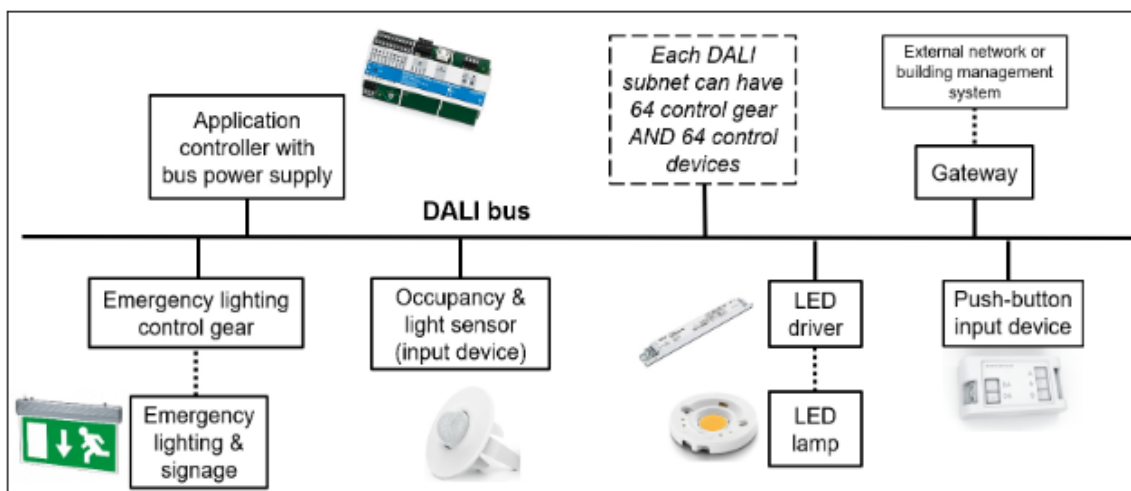


Figura 3.1 - Esquema do sistema de controlo DALI [52].

Numa sub-rede DALI a alimentação e o transporte de dados são feitos por apenas um par de cabos, o que torna o sistema bastante simples. Esta pode ser constituída por até 64 equipamentos de controlo, como balastros e LED *Drivers* e 64 dispositivos de controlo, como sensores e interruptores [49].

4. INTEGRAÇÃO DA LUZ NATURAL

Neste capítulo é estudada a integração da iluminação natural e como a sua disponibilidade pode ser aproveitada na busca de um sistema de iluminação mais eficiente, apresentando-se o método de cálculo luminotécnico usado neste trabalho.

4.1 Fator de Luz do Dia

O método do Fator de Luz do Dia (FLD) foi desenvolvido na Grã-Bretanha e é o método recomendado pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) para análise da influência da iluminação natural em interiores [53] [54].

O FLD é o quociente entre a iluminância natural interior num ponto do plano de trabalho e a iluminância exterior sobre uma superfície horizontal num ponto sem obstruções. Estes valores de iluminância são valores recebidos do mesmo céu, excluindo-se a luz direta proveniente do sol.

O método mais comum para obter estes valores baseia-se na utilização de dois luxímetros, um colocado no interior do compartimento no ponto de medição e outro colocado horizontalmente no exterior do edifício, como representado na Figura 4.1 [55]. As duas medições são efetuadas em simultâneo e obtém-se o FLD através da Equação 4.1, onde E_{int} é a iluminância interior num ponto do plano de trabalho e E_{ext} é a iluminância exterior simultânea num plano horizontal.

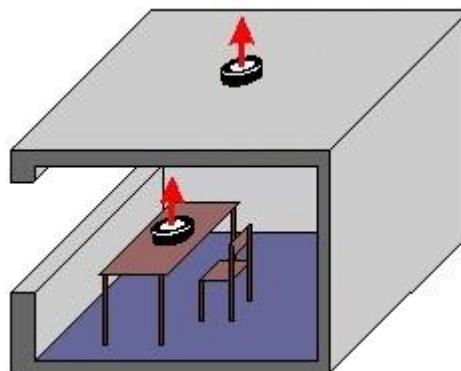


Figura 4.1 - Método de cálculo do FLD [55].

$$FLD (\%) = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \times 100 \quad (4.1)$$

O FLD pode ainda ser expresso como a soma de três componentes: a Componente Direta (*CD*), a Componente Refletida Exterior (*CRE*) e a Componente Refletida Interior (*CRI*) [56], representadas na Equação 4.2 e na Figura 4.2 [56].

$$FLD(\%) = CD(\%) + CRE(\%) + CRI(\%) \quad (4.2)$$

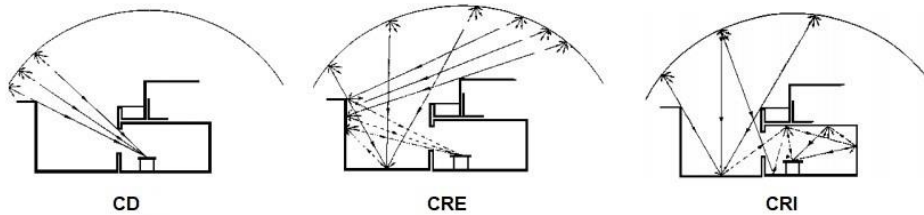


Figura 4.2 - Componentes do FLD [57]

4.2 Fator de Luz do Dia Médio

Como o cálculo do FLD é complexo, pois é calculado ponto a ponto e obriga a ter em consideração vários fatores, como as dimensões, a geometria dos espaços e a existência de obstruções, entre outros, impõe-se a necessidade de utilizar um método mais simples [56]. É através do cálculo do Fator de Luz do Dia Médio (FLDM) que de uma forma mais prática se consegue estimar o valor médio do FLD ao longo de um plano de trabalho [58].

O FLDM é o quociente entre a iluminância interior média, $\overline{E_{int}}$, e a iluminância horizontal exterior, E_{ext} , medidas em simultâneo, tal como apresentado na Equação 4.3.

$$FLDM (\%) = \frac{\overline{E_{int}}}{E_{ext}} \times 100 \quad (4.3)$$

Outra forma de calcular o FLDM é através da Equação 4.4, onde τ_j é o coeficiente de transmissão luminosa do envidraçado, A_j é a área da superfície envidraçada, $\alpha_{céu}$ é o ângulo de céu visível do envidraçado (em graus), A_t é a área total de todas as superfícies do espaço e ρ é o coeficiente de reflexão médio de todas as superfícies [59].

$$FLDM (\%) = \frac{\tau_j \times A_j \times \alpha_{céu}}{A_t \times (1 - \rho^2)} \quad (4.4)$$

O coeficiente de transmissão luminosa e o coeficiente de reflexão são valores tabelados e podem ser consultados no Anexo A.

4.3 Caracterização dos ambientes exterior e interior

No que diz respeito ao ambiente exterior, é necessário levar em conta a latitude do local em estudo e a existência de edifícios ou obstruções que influenciem o ângulo de céu visível das janelas.

Além do ambiente exterior, é necessário conhecer as características do ambiente interior:

- Dimensões do espaço;
- Número de janelas e as suas dimensões;
- Área das paredes, teto e chão, assim como os respectivos coeficientes de reflexão;
- Coeficiente de transmissão luminosa do vão envidraçado;
- Ângulo de céu visível do envidraçado.

É necessário também conhecer as necessidades e os requisitos de iluminação interior:

- Iluminância média recomendada;
- Número e disposição das luminárias;
- Tipo e potência das lâmpadas;
- Horário de funcionamento da sala;
- Número e disposição de circuitos.

4.4 Metodologia de cálculo luminotécnico

A título de exemplo, considera-se uma sala com as suas características expressas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características da sala exemplo.

Largura (m)	8
Comprimento (m)	8
Altura (m)	3
Largura do envidraçado (m)	6
Altura do envidraçado (m)	1.5
τ_j	0.9
$\alpha_{\text{céu}}$	90°
ρ	0.6
Latitude	40°
Horas de funcionamento/dia	8
Nº de luminárias	16
Potência por luminária (W)	30

A primeira etapa consiste em calcular o FLDM, através da Equação 4.4, apresentada anteriormente. Conhecido o seu valor, que neste caso seria de 5.11%, calcula-se, através da Equação 4.5, o valor da iluminância exterior que assegura a iluminância interior pretendida ao nível do plano de trabalho. Neste caso, estando em estudo um edifício educativo para adultos, o valor recomendado é de 500 lx, como indicado na Tabela 2.3, apresentada na página 16.

$$E_{\text{ext}} = \frac{E_{\text{int}}}{FLDM} = \frac{500}{0.0511} = 9785 \text{ lx} \quad (4.5)$$

Repete-se o processo para diferentes níveis de iluminância interior, como demonstrado na Tabela 4.2, de forma a possibilitar o estudo do controlo do fluxo luminoso das lâmpadas.

Considerando o diagrama disponibilizado pela CIE representado na Figura 4.3 [60], verifica-se que para a latitude de 40° e uma iluminância exterior de 9785 lx, o valor correspondente é de 85%. Isto significa que, nesta latitude, a percentagem média de horas de trabalho durante o ano em que se verifica uma iluminância exterior de 9785 lx (valor

que garante uma iluminância interior de 500 lx) é de 85%. Procede-se do mesmo modo para os restantes valores de iluminância exterior, representados na Tabela 4.2.

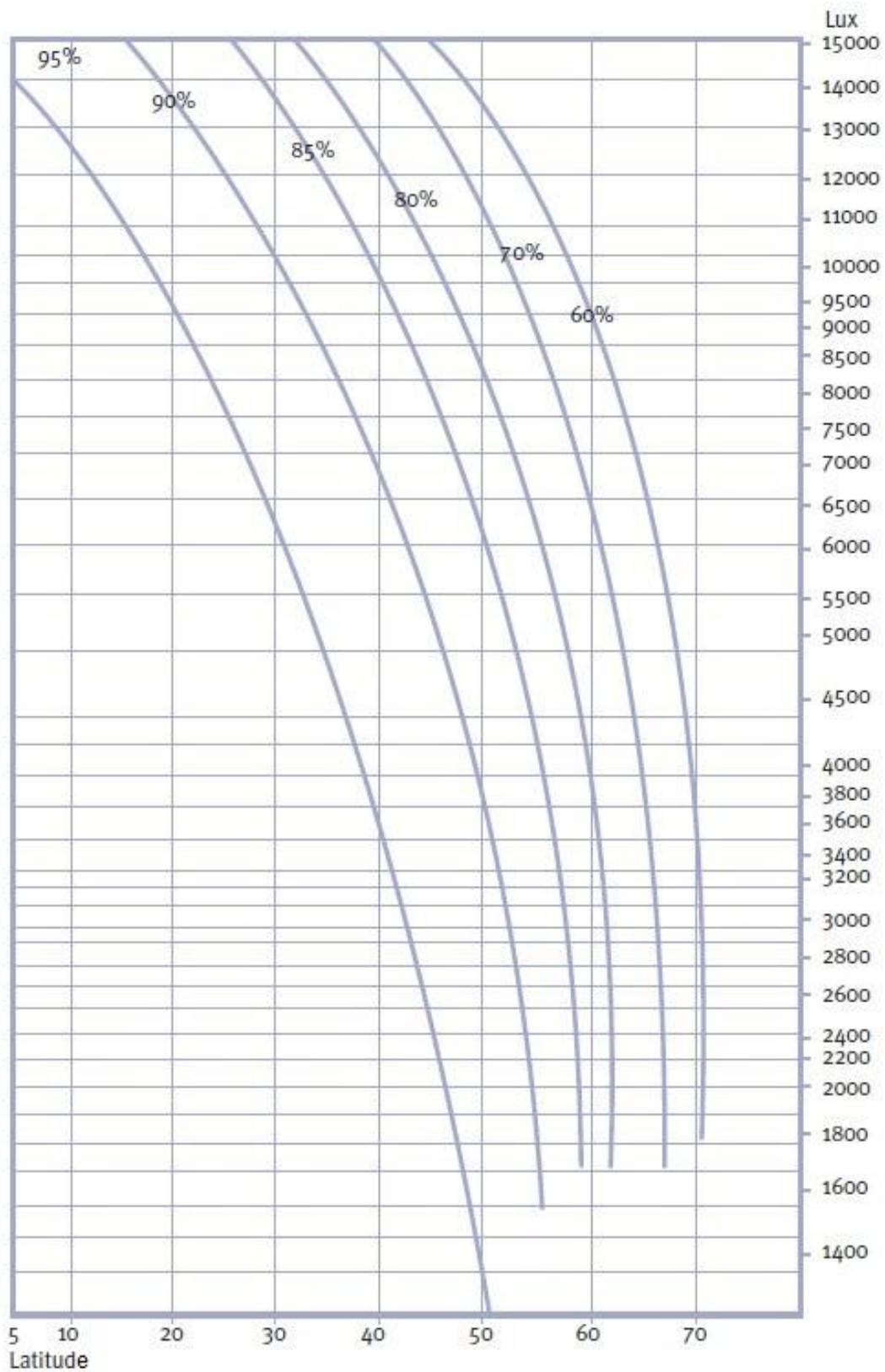


Figura 4.3 - Disponibilidade de luz natural em percentagem de horas de trabalho em função da latitude [60].

Supondo que a sala de aula é ocupada 8 horas por dia, 5 dias por semana, durante aproximadamente 8 meses por ano, conta-se um valor total de 1280h.

Posto isto, chega-se facilmente à conclusão de que o número médio de horas anuais em que a luz natural não é suficiente – e por isso as lâmpadas estarão ligadas com um determinado nível de fluxo luminoso – é obtido através da subtração do número de horas em que a luz natural é suficiente ao número de horas total. Os valores calculados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de iluminância exterior, iluminância interior e número de horas em que a luz natural é insuficiente para um FLDM=5.11% e latitude = 40°.

E_{int} (lux)	E_{ext} (lux)	Horas em que a luz natural é insuficiente (h)
500	9785	192
450	8806	166.4
400	7823	153.6
350	6849	128
300	5871	115.2
250	4892	89.6
200	3914	76.8
150	2935	51.2
100	1967	25.6
50	979	12.8
0	0	0

Utilizando um sistema de controlo automático de fluxo luminoso – baseado na utilização de um sensor fotoelétrico para medir a luz natural disponível – a variação do fluxo é controlada conforme as parametrizações escolhidas pelo utilizador. Como o processo de cálculo da iluminância exterior associada a diferentes valores de iluminância interior é repetitivo, considerou-se suficiente a subdivisão em onze patamares de iluminância interior associados a onze valores de fluxo luminoso. Desta forma, simula-se um incremento de 10% do fluxo luminoso sempre que a iluminância interior devida à luz natural diminui 50 lux.

Para se estudar a energia consumida é necessário conhecer a potência das luminárias associada a cada percentagem de fluxo luminoso, assim como o número de

horas em que estas estão ligadas. Com estes dados, calcula-se a energia consumida, como se pode verificar na Tabela 4.3.

Com base no trabalho de Roisin [61], considera-se uma proporcionalidade direta entre o fluxo luminoso e a potência consumida pelas lâmpadas. Despreza-se aqui o consumo do sistema de controlo por ser baixo relativamente ao consumo das luminárias para os dois casos de estudo.

Tabela 4.3 - Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural.

E_{int} (lux)	E_{ext} (lux)	Fluxo luminoso (%)	Potência (W)	Horas em funcionamento (h)	Energia consumida (kWh)
500	9785	0	0	1088	0
450	8806	10	48	25.6	1.229
400	7823	20	96	12.8	1.229
350	6849	30	144	25.6	3.686
300	5871	40	192	12.8	2.458
250	4892	50	240	25.6	6.144
200	3914	60	288	12.8	3.686
150	2935	70	336	25.6	8.602
100	1967	80	384	25.6	9.830
50	979	90	432	12.8	5.530
0	0	100	480	12.8	6.144
TOTAL					48.538

5. CÓDIGO DESENVOLVIDO E CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo são feitas simulações da energia consumida pelo circuito de iluminação de 3 salas da Torre T do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra a funcionar com os dois tipos de controlo:

- Controlo *on-off*, em que apenas se verificam dois estados – ligado ou desligado;
- Controlo automático de fluxo luminoso (controlo *dimmbable*), variando o fluxo luminoso das luminárias de forma gradual.

Para cada caso, é apresentada a distribuição dos níveis de iluminância, obtida de uma ferramenta de simulação desenvolvida em MATLAB ao longo deste trabalho, e descrita neste capítulo. O código completo pode ser consultado nos Anexos B, C e D.

Esta ferramenta calcula – utilizando o método ponto a ponto – os níveis de iluminância na sala, com base na quantidade de luz natural disponível.

5.1 Código desenvolvido em MATLAB

A representação gráfica da iluminância sobre a área de trabalho foi gerada através da Interface Gráfica do Utilizador do MATLAB (*Graphical User Interfaces – GUIs*). Como se pode observar na Figura 5.1, o utilizador pode escolher o valor da iluminância exterior, manipulando o *slide* à esquerda, ou introduzindo o valor desejado no campo de texto disponível debaixo do *slide*. Automaticamente é apresentado o valor da iluminância média garantida pela luz natural ao nível do plano de trabalho e gerada a representação gráfica da iluminância resultante da conjugação da luz natural com a iluminação artificial. É também possível inserir um valor de iluminância média ao nível do plano de trabalho e assim conhecer a iluminância exterior (luz natural) que garante esse valor.

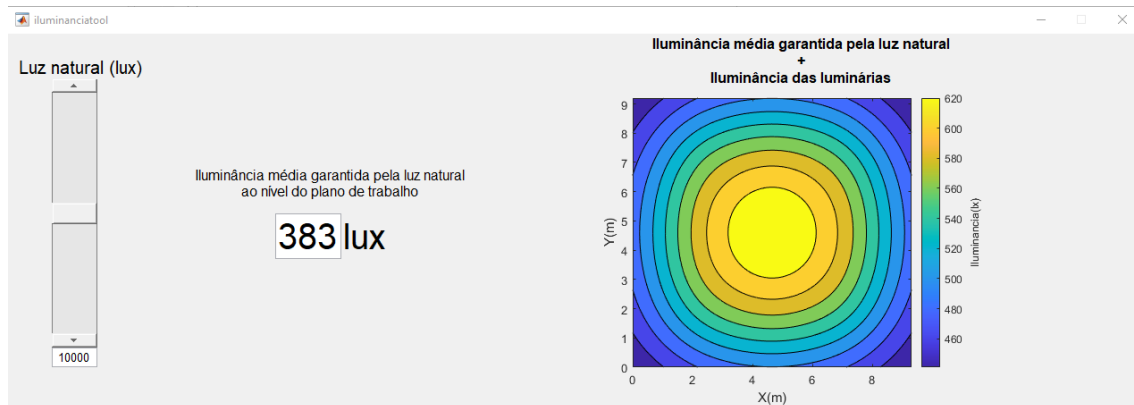


Figura 5.1 - Ferramenta de simulação da iluminância sobre o plano de trabalho

Com a criação da interface gráfica foi gerado um código que contém várias funções que gerem as componentes que constituem a interface. As duas funções principais para o funcionamento da ferramenta são descritas de seguida.

As funções “iSlider_Callback” e “iText_Callback” – ilustradas nas Figuras 5.2 e 5.3, respetivamente – são responsáveis pela obtenção do valor introduzido pelo utilizador com recurso ao *slide* ou ao campo de texto debaixo deste, sendo esse valor usado para determinar o valor da iluminância média ao nível do plano de trabalho.

```

79 function iSlider_Callback(hObject, eventdata, handles) %#ok<DEFNU,INUSL>
80 % hObject      handle to iSlider (see GCBO)
81 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
82 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
83 - luznat=get(handles.iSlider, 'Value');
84 - istr=num2str(luznat);
85 - set(handles.iText, 'String', istr);
86 - estr=num2str(round(luznat*0.0383));
87 - set(handles.eText, 'String', estr);
88 - iluminanciaT41F(handles);

```

Figura 5.2 - Função "iSlider_Callback"

```

106 function iText_Callback(hObject, eventdata, handles) %#ok<DEFNU,INUSL>
107 % hObject      handle to iText (see GCBO)
108 % eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
109 % handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
110 - istr=get(handles.iText, 'String');
111 - luznat=str2double(istr);
112 - set(handles.iSlider, 'Value', luznat);
113 - estr=num2str(round(luznat*0.0383));
114 - set(handles.eText, 'String', estr);
115 - iluminanciaT41F(handles);

```

Figura 5.3 - Função "iText_Callback"

Na Figura 5.4 está representada a primeira parte da função “iluminanciaT41F”, onde a variável *luznat* recebe o valor introduzido pelo utilizador através do *slide*. Este valor, multiplicado pelo FLDM, corresponde ao valor da iluminância média ao nível do plano de trabalho, que é guardado na variável *Eint*.

```

1 function iluminanciaT41F(handles)
2
3 - luznat=get(handles.iSlider, 'Value'); %slider simula variação da luz natural (iluminância exterior)
4 - Eint=luznat*0.0383; %Eint=Ext*FLDM
5 - i=1501; %intensidade luminosa de cada luminária
6
7 - sx=9.3; sy=9.2; sz=4; %dimensões da sala em metros
8
9 - h=3.20; %distância luminárias -> plano de trabalho

```

Figura 5.4 - Função "iluminanciaT41F"

Depois de definidas as posições das luminárias no plano xy, os vetores D1 a D12 representam as distâncias de todos os pontos do plano de trabalho a cada luminária, como se pode verificar na Figura 5.5.

```

33   %vetor distância de todos os pontos do plano de trabalho a cada luminária
34 - D1=sqrt((X-Xled1).^2+(Y-Yled1).^2+h^2);
35 - D2=sqrt((X-Xled2).^2+(Y-Yled2).^2+h^2);
36 - D3=sqrt((X-Xled3).^2+(Y-Yled3).^2+h^2);
37
38 - D4=sqrt((X-Xled4).^2+(Y-Yled4).^2+h^2);
39 - D5=sqrt((X-Xled5).^2+(Y-Yled5).^2+h^2);
40 - D6=sqrt((X-Xled6).^2+(Y-Yled6).^2+h^2);
41
42 - D7=sqrt((X-Xled7).^2+(Y-Yled7).^2+h^2);
43 - D8=sqrt((X-Xled8).^2+(Y-Yled8).^2+h^2);
44 - D9=sqrt((X-Xled9).^2+(Y-Yled9).^2+h^2);
45
46 - D10=sqrt((X-Xled10).^2+(Y-Yled10).^2+h^2);
47 - D11=sqrt((X-Xled11).^2+(Y-Yled11).^2+h^2);
48 - D12=sqrt((X-Xled12).^2+(Y-Yled12).^2+h^2);

```

Figura 5.5 - Função "iluminanciaT41F"

Através da fórmula trigonométrica *coseno* obtêm-se os vetores *coseno_phi1* a *coseno_phi12*, que representam os ângulos da intensidade luminosa referentes a cada luminária, para todos os pontos do plano de trabalho, como ilustrado na Figura 5.6.

```

50   %vetor que contém o ângulo da iluminância em cada ponto para todas as
51   %luminárias
52 - coseno_phi1=h./D1;
53 - coseno_phi2=h./D2;
54 - coseno_phi3=h./D3;
55 - coseno_phi4=h./D4;
56 - coseno_phi5=h./D5;
57 - coseno_phi6=h./D6;
58 - coseno_phi7=h./D7;
59 - coseno_phi8=h./D8;
60 - coseno_phi9=h./D9;
61 - coseno_phi10=h./D10;
62 - coseno_phi11=h./D11;
63 - coseno_phi12=h./D12;

```

Figura 5.6 - Função "iluminanciaT41F"

Na Figura 5.7 está representada uma parte do código onde é calculada a iluminância resultante de cada luminária. Esse cálculo é efetuado utilizando o método ponto a ponto.

A variável *a* representa a percentagem de fluxo luminoso das luminárias, que varia de 0% (*a*=0) a 100% (*a*=1), tendo em conta o nível de iluminância média no plano de trabalho (*E_{int}*). No caso do controlo *on-off*, verificam-se apenas duas situações: *a*=0, quando *E_{int}* é superior a 500 lux; *a*=1, quando *E_{int}* é inferior a 500 lux. No caso do controlo *dimmbabel* – como explicado no capítulo 4.2 – sempre que a iluminância interior diminui 50 lux o fluxo luminoso aumenta 10% e por isso: *a*= [0, 0.1, 0.2, ..., 1].

```

65      %contributo de cada luminária para a iluminância total
66 -    if Eint>=500
67
68 -        a=0;
69
70 -        E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
71 -        E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
72 -        E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));
73
74 -        E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
75 -        E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
76 -        E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));
77
78 -        E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
79 -        E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
80 -        E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));
81
82 -        E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
83 -        E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
84 -        E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));
85
86 -    else if (450<=Eint) && (Eint<500)
87
88 -        a=0.1;
89
90 -        E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
91 -        E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
92 -        E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

```

Figura 5.7 - Função "iluminanciaT41F"

A variável E é o resultado da soma da iluminância resultante da iluminação artificial (E1 a E12) com a iluminância resultante da luz natural (Eint), como se pode ver na Figura 5.8.

```

298      %iluminância total
299 -    E=E1+E2+E3+E4+E5+E6+E7+E8+E9+E10+E11+E12+Eint;

```

Figura 5.8 - Função "iluminanciat41F"

5.2 Casos de estudo

Relembra-se o leitor que está em estudo um edifício educativo para adultos, onde a iluminância interior recomendada é de 500 lux e assumiu-se que as salas de aula são ocupadas 8 horas por dia, 5 dias por semana, durante aproximadamente 8 meses por ano, ou seja, durante 1280 horas.

O valor do coeficiente de transmissão do envidraçado, assim como o valor do coeficiente de reflexão médio foram obtidos através da plataforma interativa ROOM, da Universidade de Bath, Reino Unido [58].

Considerou-se um modelo de luminária *LED* do catálogo da empresa EEE (Empresa de Equipamento Elétrico, S.A) – apresentada na Figura 5.9 [62] – próprio para sala de aula e com *driver* eletrônico para regulação de fluxo luminoso, com as seguintes características: Fluxo luminoso – 2478 lm; Potência – 20.24 W; Eficiência luminosa – 122 lm/W Temperatura de cor – 4000 K.



Figura 5.9 - Luminária TRLX 01 12024-07 [62].

5.2.1 Sala T4.1

A primeira sala estudada foi a sala T4.1. Por ser uma das mais utilizadas, uma intervenção nesta sala do piso 4 terá um maior impacto na redução do consumo. A disposição das luminárias está representada na Figura 5.10 e as suas características na Tabela 5.1.

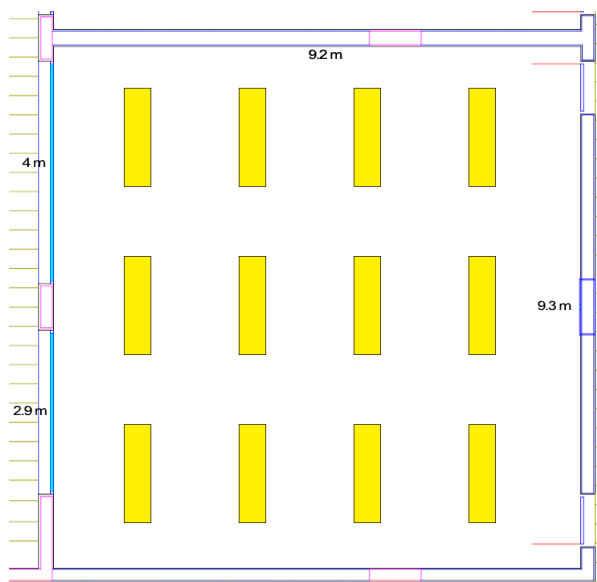


Figura 5.10 - Sala T4.1.

Tabela 5.1 - Características da sala T4.1.

Largura (m)	9.3
Comprimento (m)	9.2
Pé direito (m)	4
Altura do plano de trabalho (m)	0.8
Largura do envidraçado (m)	6.9
Altura do envidraçado (m)	2
τ_j	0.9
$\alpha_{\text{céu}}$	51°
ρ	0.7
Latitude	40°
Horas de funcionamento/dia	8
Nº de luminárias	12
Potência por luminária (W)	20.24

Com base na metodologia apresentada no capítulo anterior, calculou-se o FLDM, obtendo-se o valor 3.83%, sendo 13055 lux o valor da iluminância exterior que assegura uma iluminância interior de 500 lux ao nível do plano de trabalho.

5.2.1.1 Controlo ON-OFF

Neste caso, a iluminação permanece desligada quando a luz natural disponível apresenta um valor igual ou superior a 13055 lux, garantindo uma iluminância interior de, no mínimo, 500 lux. Isto acontece durante 985.6 horas anuais, como descrito no Anexo E. Quando esta situação não se verifica, a iluminação é ligada, verificando-se um consumo anual de 71.50 kWh referente a 294.4 horas, com um custo de 9.30€³.

Na Figura 5.11 ilustra-se a iluminância da sala para os casos em que a luz natural apresenta valores de 12081 lux e 0 lux. É facilmente perceptível que no primeiro caso se verificam níveis de iluminância bastante superiores ao recomendado e que no segundo caso esses níveis são mais adequados.

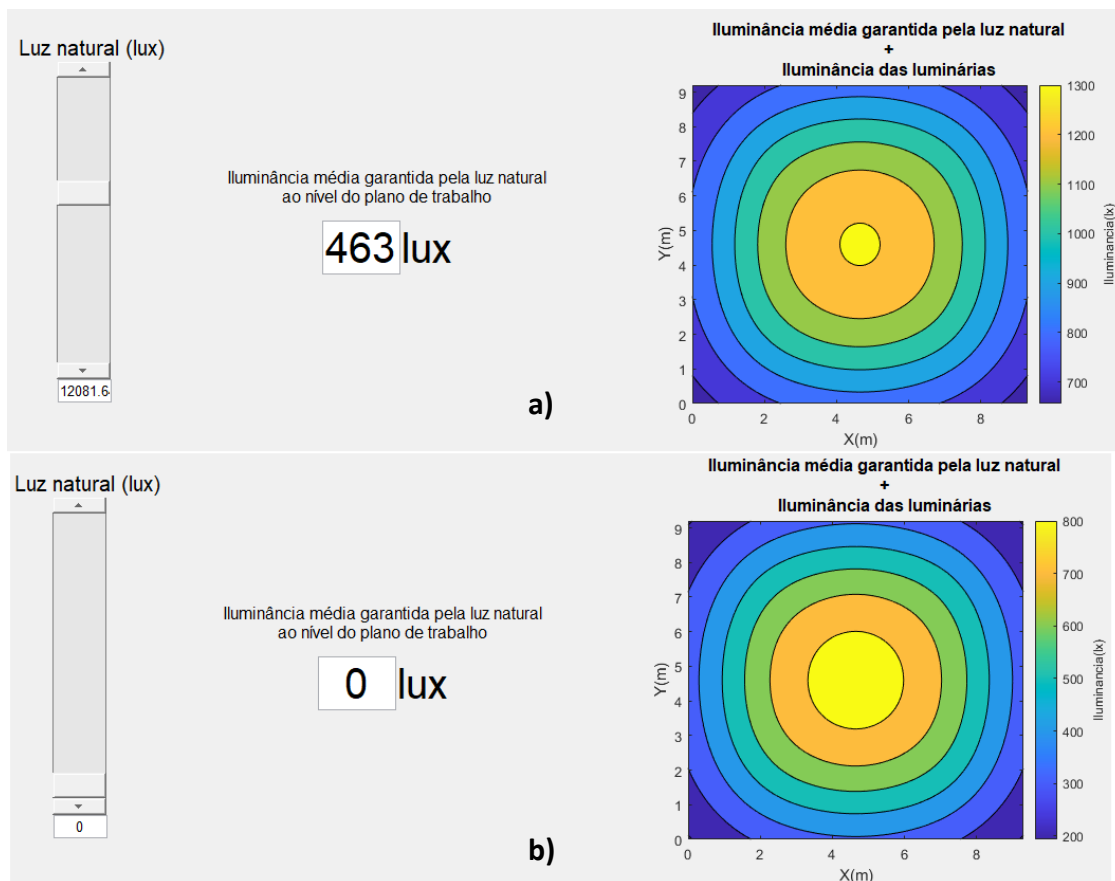


Figura 5.11 - Iluminância na Sala T4.1. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 12081 lx; b) 0 lx.

³ Preço médio do kWh: 0.13€/kWh

5.2.1.2 Controlo automático de fluxo luminoso

Assim como no controlo *on-off*, quando a luz natural disponível é igual ou superior a 13055 lux, as luminárias permanecem desligadas. Quando isto não se verifica o fluxo varia de uma forma controlada, aumentando 10% sempre que a iluminância interior devida à luz natural diminui 50 lux. A Tabela 5.2 ilustra esse processo, assim como o consumo anual e o Anexo E apresenta os cálculos dos valores que compõem a tabela em mais detalhe.

Tabela 5.2 - Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural.

E_{int} (lux)	E_{ext} (lux)	Fluxo luminoso (%)	Potência (W)	Horas em funcionamento (h)	Energia consumida (kWh)
500	13055	0	0	985.6	0
450	11749	10	24.29	64	1.55
400	10444	20	48.58	25.6	1.24
350	9138	30	72.86	25.6	1.87
300	7833	40	97.15	25.6	2.49
250	6527	50	121.44	32	3.89
200	5222	60	145.73	25.6	3.73
150	3916	70	170.02	25.6	4.35
100	2611	80	194.30	32	6.22
50	1305	90	218.59	38.4	8.39
0	0	100	242.88	0	0
TOTAL					33.73

Com este sistema, verificar-se-ia um consumo anual de 33.73 kWh, com um custo de 4.39€, o que representa uma poupança de 53% comparativamente ao sistema *on-off*.

Na Figura 5.12 estão representados os níveis de iluminância na sala para 3 situações de disponibilidade de luz natural: a) 12081 lx; b) 8816 lx; c) 4163 lx. Sendo o fluxo luminoso ajustado automaticamente conforme a disponibilidade de luz natural, os valores de iluminância tornam-se mais ajustados ao espaço. Desta forma diminui-se o desperdício energético, já que as luminárias não estarão sempre ligadas à potência máxima.

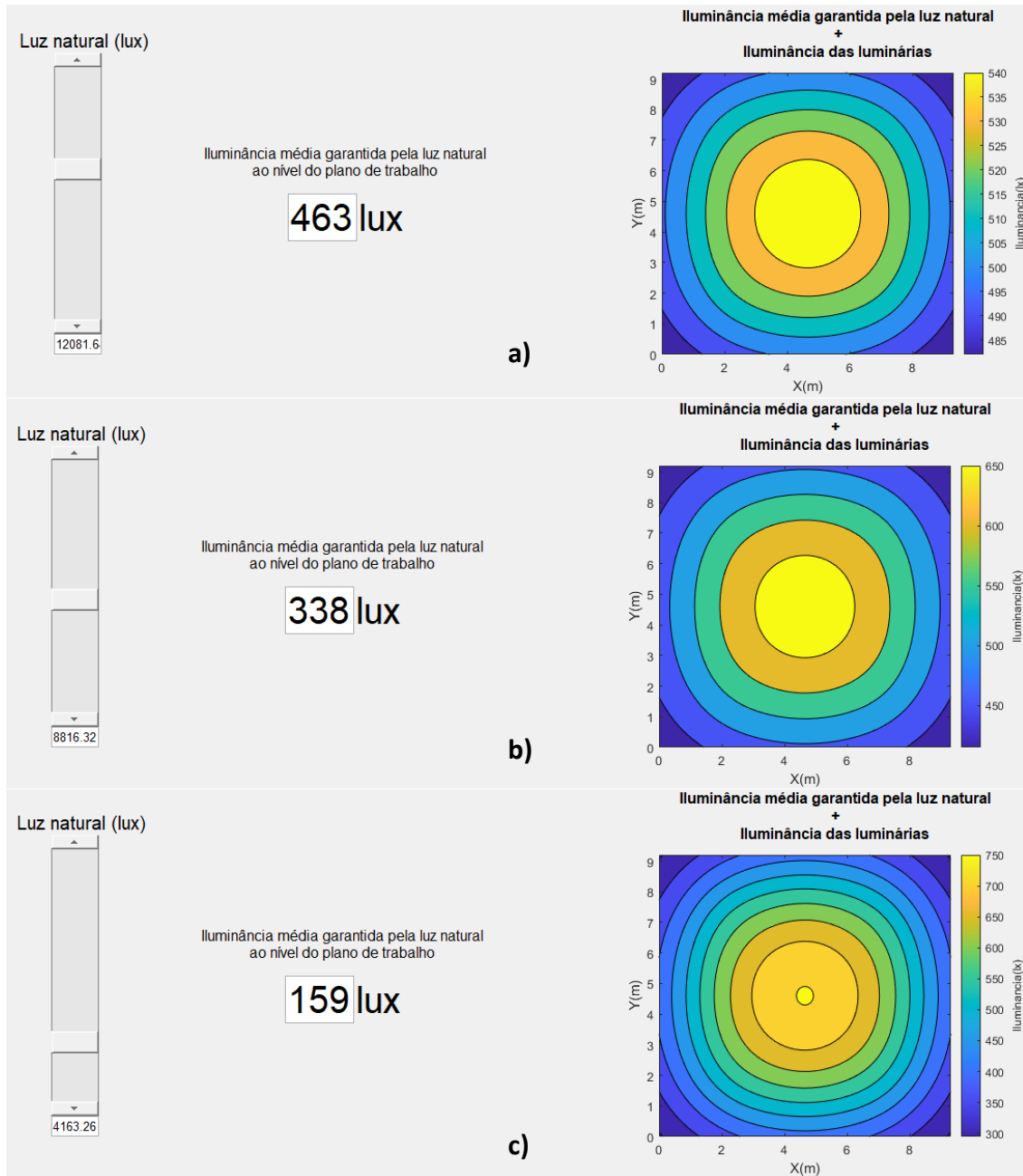


Figura 5.12 - Iluminância na Sala T4.1 com controlo *dimming*. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 12081 lx; b) 8816 lx; c) 4163 lx.

5.2.2 Sala T5.1

A sala T5.1 possui as mesmas características da sala T4.1, no entanto está no piso 5, apresentando por isso um ângulo de céu visível maior do que a T4.1, já que a obstrução provocada pela torre S será menor: $\alpha_{\text{céu}} = 62^\circ$. Por isso mesmo, o FLDM será também maior: FLDM = 4.75%.

5.2.2.1 Controlo ON-OFF

Utilizando este tipo de controlo, esta sala apresenta um consumo anual de 52.85 kWh, com um custo de 6.87€.

Estes valores são obviamente inferiores aos calculados para a sala T4.1, já que esta sala está mais exposta à luz natural e por isso o sistema de iluminação estará ligado menos tempo. No entanto, os níveis de iluminância quando a luz natural disponível é elevada são também elevados comparativamente ao valor recomendado, como se pode ver na Figura 5.13.

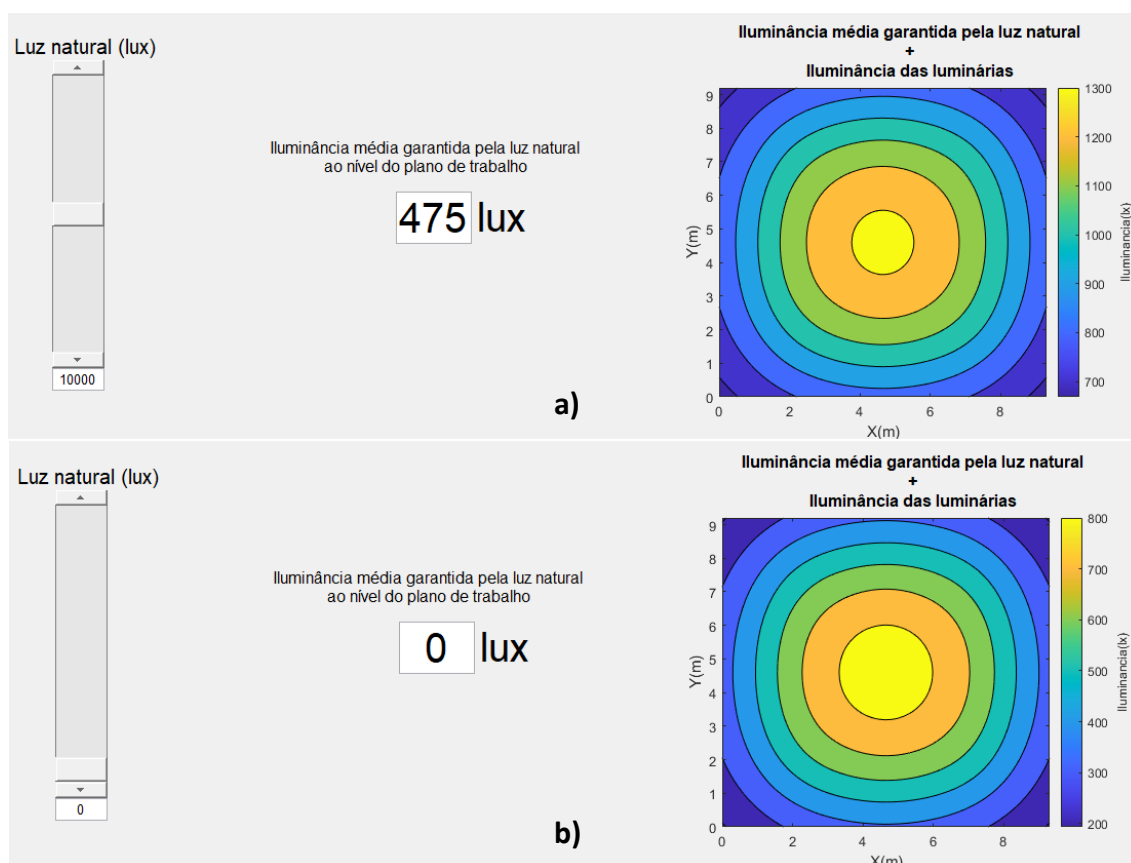


Figura 5.13 - Iluminância na sala T5.1. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 10000 lx; b) 0 lx.

5.2.2.2 Controlo automático de fluxo luminoso

Com a implementação de um sistema *dimming* verificar-se-ia um consumo anual de 25.80 kWh (Tabela 5.3), com um custo de 3.35€, constituindo uma poupança de 51% em relação ao controlo *on-off*.

Tabela 5.3 – Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural

E_{int} (lux)	E_{ext} (lux)	Fluxo luminoso (%)	Potência (W)	Horas em funcionamento (h)	Energia consumida (kWh)
500	10526	0	0	1062.4	0
450	9474	10	24.29	38.4	0.93
400	8421	20	48.58	19.2	0.93
350	7368	30	72.86	19.2	1.40
300	6316	40	97.15	25.6	2.49
250	5263	50	121.44	19.2	2.33
200	4211	60	145.73	19.2	2.80
150	3158	70	170.02	25.6	4.35
100	2105	80	194.30	25.6	4.97
50	1053	90	218.59	25.6	5.60
0	0	100	242.88	0	0
TOTAL					25.80

Assim como o que se verificou nos resultados referentes à sala T4.1, com este tipo de controlo diminui-se o consumo do sistema de iluminação, sendo os níveis de iluminância mais ajustados ao espaço, o que se pode confirmar observando a Figura 5.14.

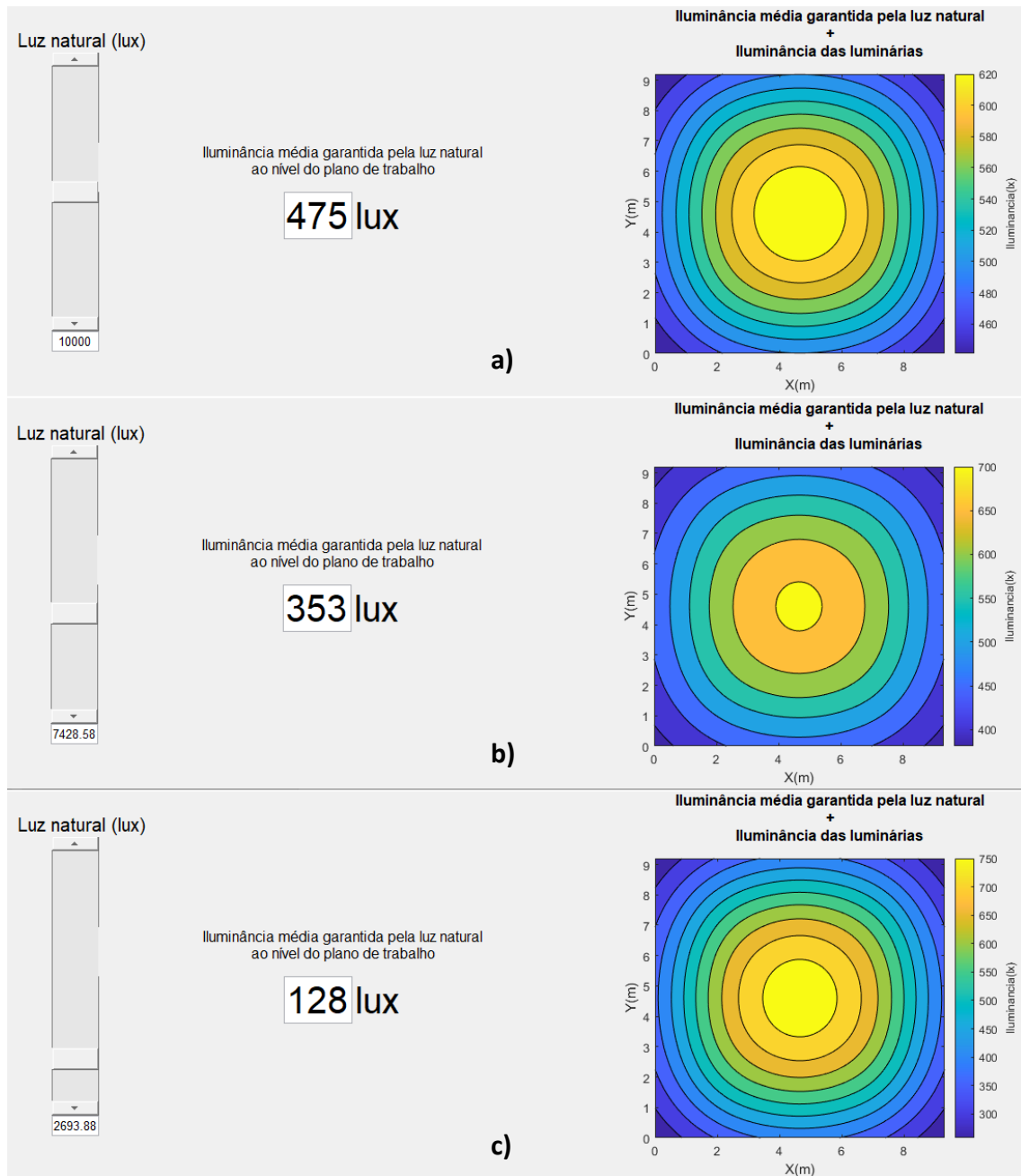


Figura 5.14 - Iluminância na sala T5.1 com controlo *dimming*. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 10000 lx; b) 7426 lx; c) 2693 lx.

5.2.3 Sala T4.4

A sala T4.4 situa-se no piso 4, tal como a T4.1, no entanto é uma sala maior e com menos área de envidraçado, estando por isso menos exposta à luz natural. A disposição das luminárias está ilustrada na Figura 5.15 e as características da sala na Tabela 5.4.

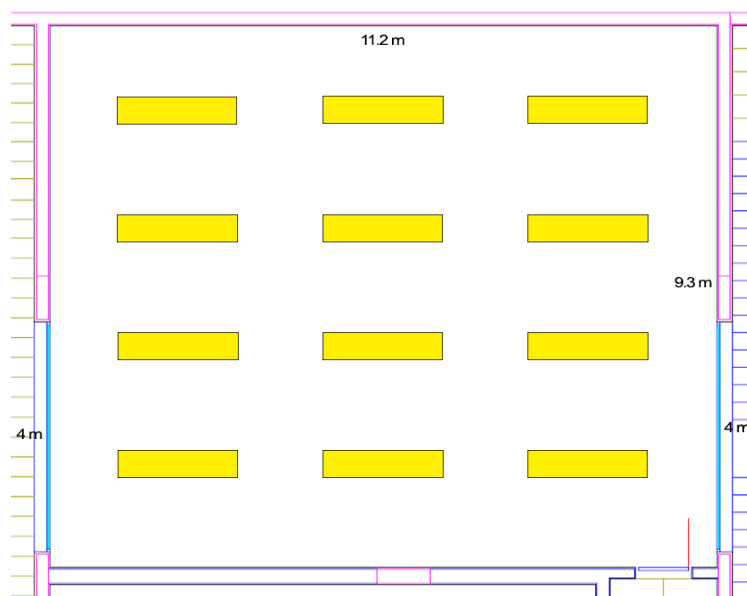


Figura 5.15 - Sala T4.4

Tabela 5.4 – Características da Sala T4.4

Largura (m)	11.2
Comprimento (m)	9.3
Pé direito (m)	4
Altura do plano de trabalho (m)	0.8
Largura do envidraçado 1 (m)	4
Altura do envidraçado 1 (m)	2
Largura do envidraçado 2 (m)	4
Altura do envidraçado 2 (m)	1
τ_j	0.9
$\alpha_{\text{céu1}}$	50°
$\alpha_{\text{céu2}}$	41°
ρ	0.7
Latitude	40°
Horas de funcionamento/dia	8
Nº de luminárias	12
Potência por luminária (W)	20.24

Calculado o FLDM, chegou-se ao valor de 2.68%, o valor mais baixo das três salas estudadas. Neste caso, o valor de iluminância exterior que assegura uma iluminância interior de 500 lux é 18657 lux.

5.2.3.1 Controlo *ON-OFF*

Ao contrário do que acontece nas duas salas anteriores, a iluminação estará ligada aproximadamente 70% do tempo, já que apenas em 30% desse tempo a luz natural disponível é, no mínimo, 18657 lux.

Com um controlo *on-off*, verifica-se um consumo anual de 242.88 kWh, com um custo de 28.29€.

Observa-se também neste caso uma iluminância elevada para elevados valores de luz natural (Figura 5.16).

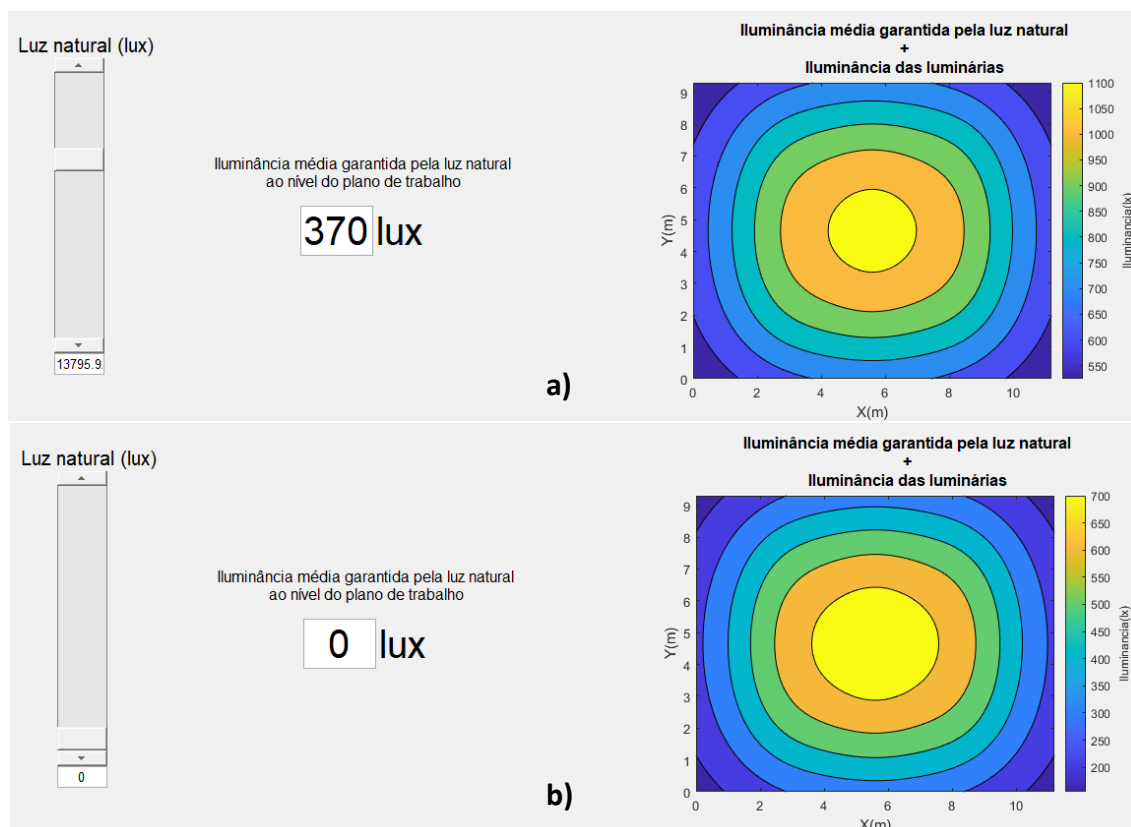


Figura 5.16 - Iluminância na sala T4.4. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 13795 lx; b) 0 lx;

5.2.3.2 Controlo automático de fluxo luminoso

Utilizando um sistema de controlo automático de fluxo, esta sala apresenta um consumo anual de 70.73 kWh (Tabela 5.5), com um custo de 9.19€. Verifica-se assim uma poupança de 68% relativamente ao controlo *on-off*.

Tabela 5.5 – Comportamento do circuito de iluminação e respetivo consumo em função da luz natural

E_{int} (lux)	E_{ext} (lux)	Fluxo luminoso (%)	Potência (W)	Horas em funcionamento (h)	Energia consumida (kWh)
500	18657	0	0	384	0
450	16791	10	24.29	320	7.77
400	14925	20	48.58	179.2	8.70
350	13060	30	72.86	102.4	7.46
300	11194	40	97.15	70.4	6.84
250	9328	50	121.44	51.2	6.22
200	7463	60	145.73	25.6	3.73
150	5597	70	170.02	44.8	7.62
100	3731	80	194.30	38.4	7.46
50	1866	90	218.59	25.6	5.60
0	0	100	242.88	38.4	9.33
TOTAL					70.73

Implementando este sistema, a iluminância torna-se mais adequada para as diferentes condições de iluminação natural, como se pode observar na Figura 5.17.

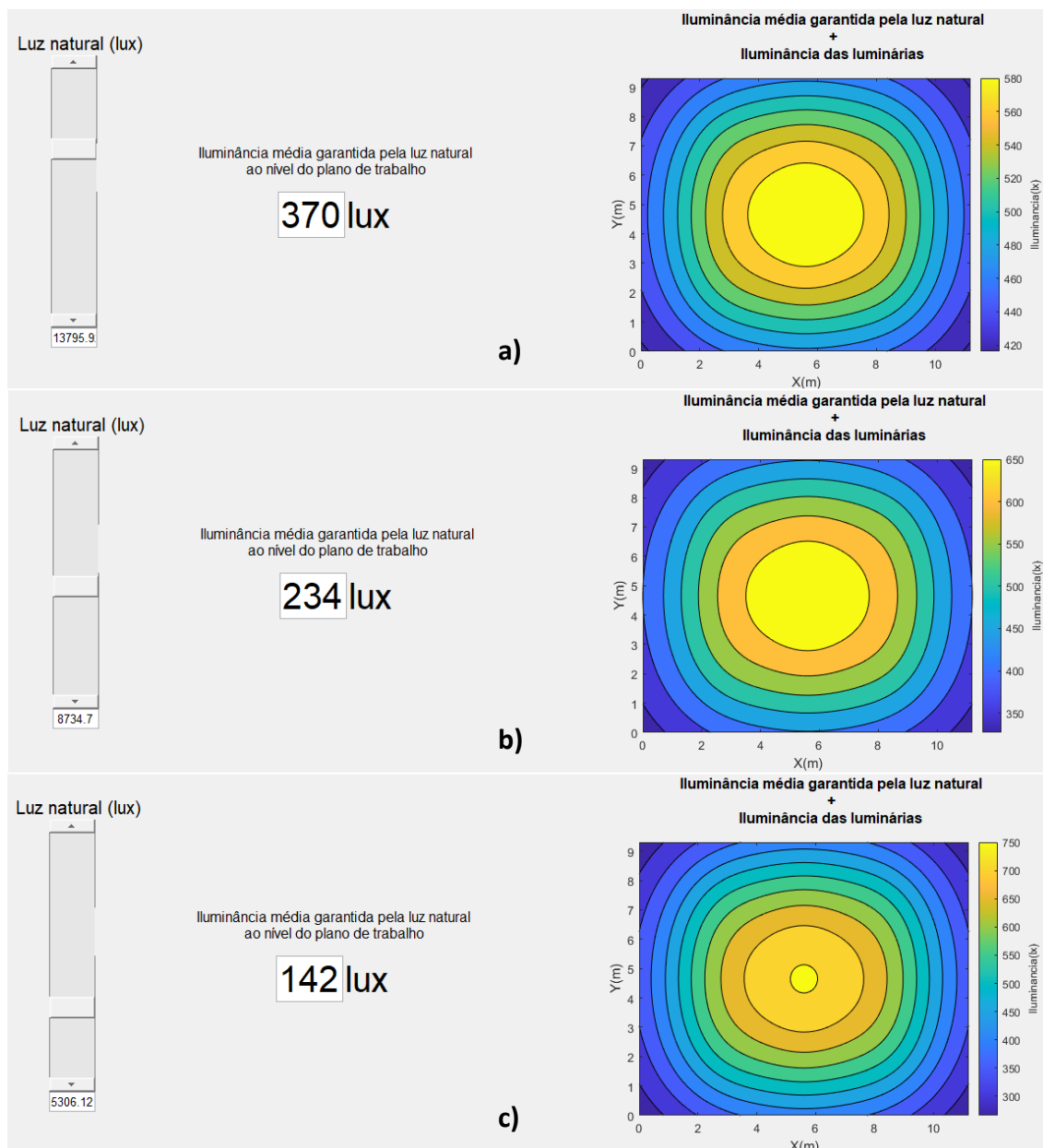


Figura 5.17 - Iluminância na Sala T4.4 com controlo *dimming*. x = largura; y = comprimento. Luz natural: a) 13795 lx; b) 8734 lx; c) 5306 lx.

Dos resultados obtidos para os cenários considerados, é então possível observar que um sistema de controlo *dimnable*, além de garantir uma considerável poupança energética em relação ao controlo *on-off*, permite também que a iluminação ao nível do plano de trabalho assuma valores mais uniformes ao longo do tempo, proporcionando um maior conforto visual para os utilizadores.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo fazer um estudo comparativo a nível de consumo, custos e eficiência entre o controlo de iluminação do tipo *on-off* e do tipo *dimnable* em três salas do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra. Para isso, realizaram-se simulações que permitiram calcular os consumos e os respetivos custos para cada caso. Foi também desenvolvida uma ferramenta em MATLAB que ilustra graficamente os níveis de iluminância nas salas, com base no comportamento do sistema de iluminação.

Através do cálculo do Fator de Luz de Dia Médio, foi possível conhecer os valores de iluminância exterior e os respetivos valores de iluminância interior para cada uma das salas, o que permitiu calcular o número de horas em que a iluminação natural é insuficiente para proporcionar determinada iluminância interior.

Assumiu-se que, utilizando um sistema de controlo *on-off*, o circuito de iluminação seria ligado quando a luz natural não fosse suficiente para proporcionar 500 lux de iluminância média ao nível do plano de trabalho. Por outro lado, utilizando um sistema de controlo *dimnable*, o circuito de iluminação seria ligado também quando a luz natural não fosse suficiente para proporcionar 500 lux de iluminância interior, mas apenas com um fluxo luminoso de 10%. Este sistema aumenta o fluxo em 10% sempre que a iluminância interior devida à luz natural diminui 50 lux.

Posteriormente, calculou-se o consumo anual, assim como os custos associados a cada sistema, concluindo-se que o sistema *dimnable* é o que garante um menor consumo energético por parte do circuito de iluminação das três salas em estudo. O sistema *dimnable* permite um consumo de 47% em relação ao sistema *on-off* na sala T4.1. Na sala T5.1 esse valor é de 49% e na sala T4.4 é 32%. Adotando este sistema, a redução do consumo é bastante significativa nas três salas, sendo a sala T4.4 onde se verifica uma maior poupança. Isto acontece por ser a sala menos exposta à luz natural e por essa mesma razão, com um sistema *on-off* implementado, a iluminação estaria ligada 70% do tempo.

Por forma a estudar a variação da iluminância nas salas de aula para cada tipo de controlo de iluminação desenvolveu-se em MATLAB uma ferramenta capaz de simular essa variação. Com os resultados obtidos demonstrou-se que, utilizando um controlo *on-off* verificar-se-iam valores de iluminância bastante superiores aos recomendados durante

um tempo significativo, pois, assim que a luz natural não garantisse os 500 lux de iluminância interior, a iluminação seria ligada a 100%. O valor de iluminância interior só se aproximaria do recomendado para níveis muito baixos de iluminância exterior. Com um sistema *dimmable*, sendo o fluxo ajustado automaticamente em função da luz natural, verificar-se-iam níveis de iluminância próximos ao recomendado a todo o momento, diminuindo assim o desperdício energético do sistema de iluminação.

Concluiu-se assim que a implementação de um sistema de controlo *dimmable* nos sistemas de iluminação das três principais salas de aula do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores seria mais vantajosa do que a instalação de um sistema *on-off*, possibilitando uma significativa poupança energética e garantindo o conforto visual aos utilizadores das salas.

6.2 Propostas de trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo de integração da luz natural também com sistema de controlo automático de fluxo luminoso, mas levando em consideração a segregação das fileiras de luminárias, para que sejam reguladas de forma independente umas das outras.

Seria também interessante fazer um estudo do impacto da implementação de sistemas capazes de gerir a iluminação dos corredores e espaços comuns, conjugando a integração da luz natural com a utilização de sensores de presença.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Observatório da Energia, DGEG e ADENE, “Energia em Números, Edição 2020”, 2020. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/media/43zf5nvd/energia-em-numeros-edicao-2020.pdf>. [Accessed: 18-Dec-2020].
- [2] Á. Gomes, “Utilização Eficiente de Energia em Iluminação”, *FCTUC*, Slides GEE, [Online]. Available: <http://lge.deec.uc.pt/ensino/gee/aulas-teoricas/iluminacao.PDF>. [Accessed: 20-Nov-2019].
- [3] OSRAM, *Manual Luminotécnico Prático*.
- [4] Armasul, “Fluxo Luminoso, Intensidade Luminosa ou Iluminância?” [Online]. Available: <http://www.armsul.com/fluxo-luminoso-luminancia-ou-iluminancia/>. [Accessed: 10-Feb-2021].
- [5] Brilumen, “Índice de reprodução cromática” [Online]. Available: <https://www.brilumen.com/conceitos/Indice-de-Reproducao-Cromatica-CRI>. [Accessed: 25-Nov-2019].
- [6] Plug Design, “Como escolher a temperatura de cor ideal para a sua luminária?” [Online]. Available: <https://plugdesign.com.br/temperatura-cor/>. [Accessed: 21-Nov-2019].
- [7] Arquitetura do Abraço “Entenda como escolher as lâmpadas para sua casa” [Online]. Available: <https://arquiteturadoabraco.com.br/2017/12/14/entenda-como-escolher-as-lampadas-para-sua-casa/>. [Accessed: 10-Feb-2021].
- [8] EDP Distribuição e ISR-UC, *Manual de Iluminação Pública*, 2016.
- [9] Super Bright LEDs, “T8 Vapor Tight LED Linear Fixture for 4 LED T8 Tubes” [Online]. Available: <https://www.superbrightleds.com/moreinfo/led-strip-fixtures/t8-vapor-tight-led-light-fixture-for-4-led-t8-tubes-industrial-led-light-4-long/3728/8063/>. [Accessed: 02-Dec-2019]
- [10] PHILIPS, “ESPIMAS sigle spot chrome”. [Online]. Available: <https://www.lighting.philips.pt/consumer/p/myliving-foco-com-casquilho-de-rosca/5013511P1> [Accessed: 02-Dec-2019]
- [11] PHILIPS, “Hydrate wall lamp chrome” [Online]. Available: <https://www.lighting.philips.pt/consumer/p/mybathroom-aplique/340811116>. [Accessed: 02-Dec-2019]
- [12] Lumel, “Luminária Industrial LY 30” [Online]. Available: <https://lumeliluminacao.com.br/iluminacao/luminaria-industrial-ly-30/>. [Accessed: 02-Dec-2019]
- [13] O Electricista - Revista Técnico-Profissional “Luminárias LED” [Online]. Available: <https://www.oelectricista.pt/2016/12/29/luminarias-viarias-led-a4u/>. [Accessed: 02-Dec-2019]
- [14] EEE, “BIM V” [Online]. Available: <http://www.eee.pt/conteudos/produtos/detalhe.aspx?title=bimv&idcont=482&idioma=pt>. [Accessed: 02-Dec-2019]
- [15] J. Moraes, M. Castro e L. Morais, “Design de Luminárias: estudo dos componentes constituintes visando recomendações de projeto”
- [16] Relightdepot, “2 lamp 32W T8 industrial strip with white steel reflector” [Online]. Available: <https://relightdepot.com/2-lamp-32w-t8-industrial-strip-with-white-steel-reflector.html> [Accessed: 02-Dec-2019]
- [17] Border States, “Cooper Utility Lighting OVZ Series Cobra Head Roadway Light Fixtures” [Online]. Available: <https://www.borderstates.com/All->

- Products/Lighting/Lighting-Fixtures-%26-Components/Outdoor-Lighting/Area-%26-Roadway-Lights-%26-Accessories/Area-%26-Roadway-Lights/Cooper-Utility-Lighting-OVZ-Series-Cobra-Head-HPS-Roadway-Light-Fixtures/Cooper-Utility-Lighting-OVZ-Series-Cobra-Head-Roadway-Light-Fixtures-150-W-HPS-Slipfitter-Gray/p/138148 [Accessed: 02-Dec-2019]
- [18] Westside, “Sea Gull Lighting 74114-962” [Online]. Available: <https://www.westsidewholesale.com/sea-gull-lighting-75114-962.html>. [Accessed: 02-Dec-2019]
- [19] Rensselaer Polytechnic Institute, “What is a ballast?” [Online]. Available: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightinganswers/adaptableballasts/ballast.asp>. [Accessed: 27-Dec-2019].
- [20] Wikimedia Commons, “Helvar ballast L36AT” [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Helvar_ballast_L36AT.jpg. [Accessed: 27-Dec-2019]
- [21] Wikimedia Commons, “EVG-ghtaubeo50410” [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EVG-ghtaube050410.jpg>. [Accessed: 27-Dec-2019]
- [22] Parlamento Europeu e do Conselho, “Directiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 21 de Outubro de 2009, relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia”, *Jornal Oficial da União Europeia*, L285, pp. 10-35, 2009.
- [23] S. Fonseca, “Lâmpadas convencionais proibidas a partir de sexta-feira” *Diário de Notícias*, 2012. [Online]. Available: <https://www.dn.pt/economia/lampadas-convencionais-proibidas-a-partir-de-sexta-feira-2743803.html>. [Accessed: 14-Jan-2020].
- [24] Wikimedia Commons, “Gluehlampe 01 KMJ”. [Online]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gluehlampe_01_KMJ.jpg. [Accessed: 15-Jan-2020]
- [25] Ministério da Economia e da Inovação, “Portaria n.º 54/2008 de 18 de janeiro”, *Diário da República*, n.º 13/2008, Série I de 2008-01-18.
- [26] Wikimedia Commons “Wolfram-Halogenglühlampe” [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wolfram-Halogenglühlampe.png>. [Accessed: 17-Jan-2020]
- [27] Wikimedia Commons “Lampg4” [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lampg4.jpg>. [Accessed: 17-Jan-2020]
- [28] DGEG, “Lâmpadas de descarga” [Online]. Available: <http://www.dgeg.gov.pt/pagina.aspx?f=1&lws=1&mcna=0&inc=8626AAAAAAAAAAAAAAAA&parceiroid=0&codigoms=0&codigono=750579477949AAAAAAAAAAAA>. [Accessed: 19-Jan-2020].
- [29] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, “Light Sensitivity”, 2008 [Online]. Available: https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_019.pdf. [Accessed: 19-Jan-2020].
- [30] CAJAF, “Lâmpadas Vapor de Mercúrio” [Online]. Available: https://www.cajaf.pt/category.php?id_category=573. [Accessed: 19-Jan-2020]
- [31] Electronica PT, “Lâmpadas” [Online]. Available: <https://www.electronica-pt.com/luzes/lampadas>. [Accessed: 19-Jan-2020]
- [32] MTecnologia, “Lâmpada Fluorescente Linear T5” [Online]. Available: https://www.mtecnologia.pt/index.php?id_product=1635&id_product_attribute=0&rewrite=la

- mpada-fluorescente-linear-t5-30cm-8w765-865-330lm-osram&controller=product.
[Accessed: 19-Jan-2020]
- [33] FNAC, “Lâmpada Fluorescente Walimex” [Online]. Available:
<https://www.fnac.pt/mp9402121/Lampada-Fluorescente-Walimex-12803-25W>.
[Accessed: 19-Jan-2020]
- [34] RNAE - Associação das Agências de Energia e Ambiente, “Iluminação interior”, 2014.
- [35] K. Lorenz, J. Marques e T. Monteiro, “Díodos emissores de luz e iluminação” *Gazeta de Física*, vol. 39, N.1/2, pp. 50–54, 2015.
- [36] Brilumen, “Vantagens da iluminação LED” [Online]. Available:
<https://www.brilumen.com/noticia/vantagens-iluminacao-led>. [Accessed: 30-Jan-2020].
- [37] Ledvance, “Parathom Classic P Dim” [Online]. Available:
<https://www.ledvance.pt/produtos/lampadas/lampadas-de-led/lampadas-de-led-para-uso-profissional-formato-classico/parathom-classic-p-dim/index.jsp>. [Accessed: 30-Jan-2020]
- [38] Ledvance “LED Retrofit Classic A Dim” [Online]. Available:
<https://www.ledvance.pt/produtos/lampadas/lampadas-de-led/lampadas-led-para-o-consumidor-com-tecnologia-de-filamento-led-visivel/led-retrofit-classic-a-dim/index.jsp>.
[Accessed: 30-Jan-2020]
- [39] PHILIPS, “CorePro tubo LED Universal T8” [Online]. Available:
<https://www.lighting.philips.pt/prof/lampadas-e-tubos-led/tubos-led/corepro-tubo-led-universal-t8#p-image-1>. [Accessed: 30-Jan-2020]
- [40] E. L. Garrido, “Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública”, *FEUP*, 2010 [Online]. Available:
https://paginas.fe.up.pt/~ee03096/index_ficheiros/Page851.htm. [Accessed: 04-Feb-2020].
- [41] OSRAM “OPTOTRONIC Intelligent - DALI LT2 NFC” [Online]. Available:
[https://www.osram.com/ecat/OPTOTRONIC Intelligent - DALI LT2 NFC-Constant Current Compact - Dimmable-Constant Current Compact - Indoor-LED Drivers-Digital Systems/com/en/GPS01_2955534/PP_EUROPE_Europe_eCat/](https://www.osram.com/ecat/OPTOTRONIC%20Intelligent%20-%20DALI%20LT2%20NFC-Constant%20Current%20Compact%20-%20Dimmable-Constant%20Current%20Compact%20-%20Indoor-LED%20Drivers-Digital%20Systems/com/en/GPS01_2955534/PP_EUROPE_Europe_eCat/). [Accessed: 04-Feb-2020]
- [42] Energy Piano, “Iluminação LED para interiores: Iluminação interior no setor público e privado”, *Guia de Orientação*, 2017.
- [43] Electrical Knowhow, “Interior lighting design methods” [Online]. Available:
<http://www.electrical-knowhow.com/2012/12/interior-lighting-design-methods-part.html>. [Accessed: 25-Aug-2020].
- [44] Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social, “Portaria n.º 349-D/2013, de 2 de dezembro,” *Diário da República*, n.º 233/2013,Série I de 2013-12-02.
- [45] L. Martirano, “Lighting systems to save energy in educational classrooms” *10th International Conference Environment and Electrical Engineering*, 2011.
- [46] Lutron, “Occupancy/Vacancy Sensor: Design and Application Guide”, 2014.
- [47] PHILIPS, “Sistemas de Controlo de Iluminação”.
- [48] G. K. Adam, “DALI LED driver control system for lighting operations based on raspberry Pi and kernel modules”, 2019.
- [49] Digital Illumination Interface Alliance, “Introducing DALI” [Online]. Available:
<https://www.digitalilluminationinterface.org/dali/>. [Accessed: 01-Mar-2020].

- [50] International Electrotechnical Commission, “IEC 60929:2011+A1:2015,” 2015. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/23568>. [Accessed: 01-Mar-2020].
- [51] International Electrotechnical Commission, “IEC 62386-201:2015,” 2015. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/22534>. [Accessed: 01-Mar-2020].
- [52] Digital Illumination Interface Alliance, “DALI-2 systems & components” [Online]. Available: <https://www.dali-alliance.org/systems/>. [Accessed: 01-Mar-2020]
- [53] R. G. Hopkinson, P. Petherbridge and J. Longmore, *Iluminação Natural*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1980
- [54] Commission Internationale de L'éclairage, “Daylight recommendations for the Calculation of Natural Light” 1970.
- [55] New Learn, “Comfortable Low Energy Architecture” [Online]. Available: https://www.new-learn.info/packages/clear/visual/daylight/analysis/hand/daylight_factor.html. [Accessed: 01-Sep-2020]
- [56] A. J. C. Santos, “Desenvolvimento de uma metodologia de caracterização das condições de iluminação natural nos edifícios baseada na avaliação ‘in situ’”, Tese de Mestrado, LNEC, 2001.
- [57] edisciplinas.usp.br “Avaliação de Iluminação Natural em Edifícios” [Online]. Available: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4136446/mod_resource/content/1/AUT274_Procedimentos_Cálculo_Ilum_2017-Aula_Joana.pdf. [Accessed: 01-Sep-2020]
- [58] P. Littlefair, “Average daylight factor: A simple basis for daylight design”, BRE IP 15/88, 1988.
- [59] University of Bath, “ROOM” [Online]. Available: <https://people.bath.ac.uk/zw305/ROOM/daylightfactortab.php>. [Accessed: 15-Sep-2020].
- [60] Comité Español de Iluminación, “Guía Técnica - Aprovechamiento de la luz natural de edificios”, Madrid, 2015.
- [61] B. Roisin, M. Bodart, A. Deneyer and P. D’Herdt, “Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption”, *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 4, pp. 514–523, 2008.
- [62] EEE “TRLX” [Online]. Available: <http://www.eee.pt/conteudos/produtos/detalhe.aspx?title=trlx&idcont=569&idioma=pt>. [Accessed: 20-Nov-2020]

ANEXO A

Coeficientes de transmissão luminosa

Vidro	Tipo	Espessura vidro (mm)	Espessura câmara de ar (mm)	Coeficiente de transmissão luminosa	Fator Solar	Transmitância (W/m ² .K)
Simples	Claro	3		0.90	0.89	5.85
		4		0.89	0.85	5.8
		6		0.89	0.85	5.7
Duplo	Claro-Claro	4	6	0.79	0.77	3.3
		4	12	0.79	0.77	2.9
		4	18	0.79	0.77	2.7
		6	6	0.88	0.72	3.4
		6	8	0.88	0.72	3.2
		6	12	0.88	0.72	3.0
Duplo refletivo	Claro	6	12	0.55	0.30	1.8
	Prata	6	12	0.30	0.32	1.8
	Verde	6	12	0.23	0.21	1.8
	Verde escuro	6	12	0.23	0.18	1.8
	Bronze	6	12	0.18	0.23	1.8
	Azul	6	12	0.16	0.20	1.8
	Cinzentos	6	12	0.14	0.21	1.8
Duplo de baixa emissividade	Claro	4	6	0.77	0.65	2.5
		4	12	0.77	0.65	1.8
		4	18	0.77	0.65	1.5
		6	6	0.67	0.52	2.4
		6	8	0.67	0.52	2.3
		6	12	0.67	0.52	1.8
	Refletivo	4	6	0.75	0.54	2.5
		4	12	0.75	0.54	1.6
		4	18	0.75	0.54	2.4
Triplo	Claro	6	6			2.4
		6	8			2.3
		6	12			2.2

Coeficientes de reflexão

Materiais	%	Cores	%
Rocha	60	Branco	70..80
Tijolos	5..25	Creme claro	70..80
Cimento	15..40	Amarelo claro	55..65
Madeira clara	40	Rosa	45..50
Esmalte branco	65..75	Verde claro	45..50
Vidro transparente	6..8	Azul celeste	40..45
Madeira aglomerada	50..60	Cinza claro	40..45
Azulejos brancos	60..75	Bege	25..35
Madeira escura	15..20	Amarelo escuro	25..35
Gesso	80	Marrom claro	25..35
		Verde oliva	25..35
		Laranja	20..25
		Vermelho	20..35
		Cinza médio	20..35
		Verde escuro	10..15
		Azul escuro	10..15
		Vermelho escuro	10..15
		Cinza escuro	10..15
		Azul marinho	5..10
		Preto	5..10

ANEXO B

Controlo *On-Off*

```
function iluminanciaT41F(handles)

luznat=get(handles.iSlider, 'Value'); %slider simula variação da luz natural (iluminância exterior)
Eint=luznat*0.0383; %Eint=Ext*FLDM
i=1501; %intensidade luminosa de cada luminária

sx=9.3; sy=9.2; sz=4; %dimensões da sala em metros

h=3.20; %distância luminárias -> plano de trabalho

%posição das luminárias
Xled1=sx/4; Yled1=sy/5;
Xled2=2*sx/4; Yled2=sy/5;
Xled3=3*sx/4; Yled3=sy/5;

Xled4=sx/4; Yled4=2*sy/5;
Xled5=2*sx/4; Yled5=2*sy/5;
Xled6=3*sx/4; Yled6=2*sy/5;

Xled7=sx/4; Yled7=3*sy/5;
Xled8=2*sx/4; Yled8=3*sy/5;
Xled9=3*sx/4; Yled9=3*sy/5;

Xled10=sx/4; Yled10=4*sy/5;
Xled11=2*sx/4; Yled11=4*sy/5;
Xled12=3*sx/4; Yled12=4*sy/5;

%grelha que simula a sala
x=0:0.01:sx;
y=0:0.01:sy;
[X,Y]=meshgrid(x,y);

%vetor distância de todos os pontos do plano de trabalho a cada luminária
D1=sqrt((X-Xled1).^2+(Y-Yled1).^2+h^2);
D2=sqrt((X-Xled2).^2+(Y-Yled2).^2+h^2);
D3=sqrt((X-Xled3).^2+(Y-Yled3).^2+h^2);

D4=sqrt((X-Xled4).^2+(Y-Yled4).^2+h^2);
D5=sqrt((X-Xled5).^2+(Y-Yled5).^2+h^2);
D6=sqrt((X-Xled6).^2+(Y-Yled6).^2+h^2);

D7=sqrt((X-Xled7).^2+(Y-Yled7).^2+h^2);
D8=sqrt((X-Xled8).^2+(Y-Yled8).^2+h^2);
D9=sqrt((X-Xled9).^2+(Y-Yled9).^2+h^2);

D10=sqrt((X-Xled10).^2+(Y-Yled10).^2+h^2);
D11=sqrt((X-Xled11).^2+(Y-Yled11).^2+h^2);
D12=sqrt((X-Xled12).^2+(Y-Yled12).^2+h^2);

%vetor que contém o ângulo da iluminância em cada ponto para todas as
%luminárias
coseno_phi1=h./D1;
coseno_phi2=h./D2;
coseno_phi3=h./D3;
coseno_phi4=h./D4;
coseno_phi5=h./D5;
coseno_phi6=h./D6;
coseno_phi7=h./D7;
```

```
coseno_phi8=h./D8;
coseno_phi9=h./D9;
coseno_phi10=h./D10;
coseno_phi11=h./D11;
coseno_phi12=h./D12;

%contributo de cada luminária para a iluminancia total
if Eint>=500

    a=0;

    E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
    E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
    E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

    E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
    E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
    E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

    E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
    E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
    E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

    E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
    E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
    E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else

    a=1;

    E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
    E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
    E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

    E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
    E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
    E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

    E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
    E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
    E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

    E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
    E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
    E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

end

%iluminância total
E=E1+E2+E3+E4+E5+E6+E7+E8+E9+E10+E11+E12+Eint;

%contour plot
contourf(handles.contourfAxes,x,y,E);
xlabel('X(m)');
ylabel('Y(m)');
c2=colorbar;
ylabel(c2,'Iluminancia(lx)');
```

ANEXO C

Controlo *dimmbable*

```
function iluminanciaT41F(handles)

luznat=get(handles.iSlider, 'Value'); %slider simula variação da luz natural (iluminância exterior)
Eint=luznat*0.0383; %Eint=Ext*FLDM
i=1501; %intensidade luminosa de cada luminária

sx=9.3; sy=9.2; sz=4; %dimensões da sala em metros

h=3.20; %distância luminárias -> plano de trabalho

%posição das luminárias
Xled1=sx/4; Yled1=sy/5;
Xled2=2*sx/4; Yled2=sy/5;
Xled3=3*sx/4; Yled3=sy/5;

Xled4=sx/4; Yled4=2*sy/5;
Xled5=2*sx/4; Yled5=2*sy/5;
Xled6=3*sx/4; Yled6=2*sy/5;

Xled7=sx/4; Yled7=3*sy/5;
Xled8=2*sx/4; Yled8=3*sy/5;
Xled9=3*sx/4; Yled9=3*sy/5;

Xled10=sx/4; Yled10=4*sy/5;
Xled11=2*sx/4; Yled11=4*sy/5;
Xled12=3*sx/4; Yled12=4*sy/5;

%grelha que simula a sala
x=0:0.01:sx;
y=0:0.01:sy;
[X,Y]=meshgrid(x,y);

%vetor distância de todos os pontos do plano de trabalho a cada luminária
D1=sqrt((X-Xled1).^2+(Y-Yled1).^2+h^2);
D2=sqrt((X-Xled2).^2+(Y-Yled2).^2+h^2);
D3=sqrt((X-Xled3).^2+(Y-Yled3).^2+h^2);

D4=sqrt((X-Xled4).^2+(Y-Yled4).^2+h^2);
D5=sqrt((X-Xled5).^2+(Y-Yled5).^2+h^2);
D6=sqrt((X-Xled6).^2+(Y-Yled6).^2+h^2);

D7=sqrt((X-Xled7).^2+(Y-Yled7).^2+h^2);
D8=sqrt((X-Xled8).^2+(Y-Yled8).^2+h^2);
D9=sqrt((X-Xled9).^2+(Y-Yled9).^2+h^2);

D10=sqrt((X-Xled10).^2+(Y-Yled10).^2+h^2);
D11=sqrt((X-Xled11).^2+(Y-Yled11).^2+h^2);
D12=sqrt((X-Xled12).^2+(Y-Yled12).^2+h^2);

%vetor que contém o ângulo da iluminância em cada ponto para todas as
%luminárias
coseno_phi1=h./D1;
coseno_phi2=h./D2;
coseno_phi3=h./D3;
coseno_phi4=h./D4;
coseno_phi5=h./D5;
coseno_phi6=h./D6;
coseno_phi7=h./D7;
```

```
coseno_phi8=h./D8;
coseno_phi9=h./D9;
coseno_phi10=h./D10;
coseno_phi11=h./D11;
coseno_phi12=h./D12;

%contributo de cada luminária para a iluminância total
if Eint>=500

    a=0;

    E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
    E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
    E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

    E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
    E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
    E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

    E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
    E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
    E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

    E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
    E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
    E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (450<=Eint) && (Eint<500)

    a=0.1;

    E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
    E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
    E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

    E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
    E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
    E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

    E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
    E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
    E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

    E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
    E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
    E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (400<=Eint) && (Eint<450)

    a=0.2;

    E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
    E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
    E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

    E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
    E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
    E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

    E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
    E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
```

```
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (350<=Eint) && (Eint<400)

a=0.3;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (300<=Eint) && (Eint<350)

a=0.4;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (250<=Eint) && (Eint<300)

a=0.5;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));
```



```

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (200<=Eint) && (Eint<250)

a=0.6;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (150<=Eint) && (Eint<200)

a=0.7;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (100<=Eint) && (Eint<150)

a=0.8;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

```



```

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (50<=Eint) && (Eint<100)

a=0.9;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

else if (0<=Eint) && (Eint<50)

a=1;

E1=(a.*(i*coseno_phi1.^3)./(h.^2));
E2=(a.*(i*coseno_phi2.^3)./(h.^2));
E3=(a.*(i*coseno_phi3.^3)./(h.^2));

E4=(a.*(i*coseno_phi4.^3)./(h.^2));
E5=(a.*(i*coseno_phi5.^3)./(h.^2));
E6=(a.*(i*coseno_phi6.^3)./(h.^2));

E7=(a.*(i*coseno_phi7.^3)./(h.^2));
E8=(a.*(i*coseno_phi8.^3)./(h.^2));
E9=(a.*(i*coseno_phi9.^3)./(h.^2));

E10=(a.*(i*coseno_phi10.^3)./(h.^2));
E11=(a.*(i*coseno_phi11.^3)./(h.^2));
E12=(a.*(i*coseno_phi12.^3)./(h.^2));

end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

end

%iluminância total
E=E1+E2+E3+E4+E5+E6+E7+E8+E9+E10+E11+E12+Eint;

%contour plot
contourf(handles.contourfAxes,x,y,E);
xlabel('X(m)');
ylabel('Y(m)');
c2=colorbar;
ylabel(c2,'Iluminancia(lx)');

```


ANEXO D

Ficheiro GUIDE

```

function varargout = iluminanciatool(varargin)
% ILUMINANCIATOOL MATLAB code for iluminanciatool.fig

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @iluminanciatoool_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @iluminanciatoool_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before iluminanciatoool is made visible.
function iluminanciatoool_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

% Choose default command line output for iluminanciatoool
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

iluminanciaT41F(handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = iluminanciatoool_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on slider movement.
function islider_Callback(hObject, eventdata, handles)

luznat=get(handles.islider,'Value');
istr=num2str(luznat);
set(handles.iText, 'String', istr);
estr=num2str(round(luznat*0.0383));
set(handles.eText, 'String', estr);
iluminanciaT41F(handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function islider_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

function iText_Callback(hObject, eventdata, handles)

istr=get(handles.iText, 'String');
luznat=str2double(istr);
set(handles.islider, 'Value', luznat)
estr=num2str(round(luznat*0.0383));
set(handles.eText, 'String', estr);
iluminanciaT41F(handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function iText_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function eText_Callback(hObject, eventdata, handles)

istr=get(handles.eText, 'String');
eint=str2double(istr);
luznat=eint/0.0383;
luznatstr=num2str(luznat);
set(handles.islider, 'Value', luznat);
set(handles.iText, 'String', luznatstr);
iluminanciaT41F(handles);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function eText_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```


ANEXO E

FLDM 0,0383

Controlo automático de fluxo luminoso										
Horas total		1280		Potência luminária		20,24 W		Potência total		242,88 W
(12 luminárias)										
Eint	Eext	Horas em que Eext é insuficiente		Horas em funcionamento		Fluxo	Potência (W)	Energia Consumida (kWh)		
500	13055	23%	294,4	1280-294,4	985,6	0%	0	0,00		
450	11749	18%	230,4	294,4-230,4	64	10%	24,288	1,55		
400	10444	16%	204,8	230,4-204,8	25,6	20%	48,576	1,24		
350	9138	14%	179,2	204,8-179,2	25,6	30%	72,864	1,87		
300	7833	12%	153,6	179,2-153,6	25,6	40%	97,152	2,49		
250	6527	9,5%	121,6	153,6-121,6	32	50%	121,44	3,89		
200	5222	7,5%	96	121,6-96	25,6	60%	145,728	3,73		
150	3916	5,5%	70,4	96-70,4	25,6	70%	170,016	4,35		
100	2611	3%	38,4	70,4-38,4	32	80%	194,304	6,22		
50	1305	0%	0	38,4-0	38,4	90%	218,592	8,39		
0	0	0%	0	0-0	0	100%	242,88	0,00		
									33,73	

Controlo ON-OFF			
Fluxo	Horas funcionamento	Potência (W)	Energia consumida (kWh)
0,0%	985,6	0	0
100,0%	294,4	242,88	71,50
			71,50