Departamento de Engenharia Mecânica
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Análise da viabilidade de mudança dos sistemas de iluminação de um estabelecimento de ensino superior para outros mais eficientes

Nuno Goulart Macedo Medeiros Silva

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

Júri

Presidente: Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela
Orientador: Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Vogal: Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Setembro, 2011

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise da viabilidade de mudança dos sistemas de iluminação de um estabelecimento de ensino superior para outros mais eficientes

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

Autor

Nuno Goulart Macedo Medeiros Silva

Orientador

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo

Júri

Presidente **Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais **Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2011

“Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre; segundo, por imitação, que é o mais fácil; e terceiro, por experiência, que é o mais amargo.”

Confúcio

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao meu orientador Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo, pelas elevadas competências científicas que possui e que procurou transmitir-me ao longo da minha formação académica. Pela orientação, análise crítica, confiança e disponibilidade demonstradas ao longo deste trabalho.

Ao Sr. Bártolo Pereira, pela sua preciosa ajuda, disponibilidade e partilha de conhecimentos técnicos.

À empresa PLORAN, muito em especial ao seu departamento de engenharia, pelo profissionalismo, disponibilidade e celeridade empregues neste projecto.

Aos meus pais pelo apoio incondicional e carinho que sempre me deram e ao meu irmão Hugo pelos seus valiosíssimos conselhos.

À Carolina, o meu muito obrigado pelo seu precioso encorajamento e optimismo e, em particular, pela sua graciosa amizade.

Aos meus amigos de longa data, pelo carinho e incentivo em todos os momentos da minha vida e aos amigos com que Coimbra me presenteou, pela amizade, pela confiança demonstrada ao longo da minha formação académica e, sobretudo, por todos os momentos de companheirismo e alegre convívio. Boa sorte para vós.

Resumo

Os consumos de energia eléctrica em grandes edifícios devem-se essencialmente à climatização, à ventilação, à iluminação e ao funcionamento de equipamentos específicos. Em climas moderados, o consumo com a iluminação artificial nos edifícios de serviços é um dos mais significativos, representando cerca de 30 % do consumo global. Além disso, as perdas de energia eléctrica devido à baixa eficiência dos sistemas de iluminação levam a um agravamento em termos económicos e ambientais, dado que grande parte da produção de electricidade resulta na emissão de CO_2.

A regulamentação em vigor exige que os edifícios de serviços apresentem consumos energéticos abaixo de determinados valores limite. É assim, preponderante que um edifício apresente baixos consumos de energia, através da implementação de sistemas mais eficientes, nomeadamente na iluminação artificial. No caso dos edifícios de serviços existentes, a actualização dos sistemas de iluminação apresenta um potencial de poupança no consumo global de energia de cerca de 21 % (DGEG, 2005).

Este trabalho visa analisar a viabilidade técnica e económica da substituição de sistemas de iluminação actualmente instalados num edifício de um estabelecimento de ensino superior, por outros mais eficientes, quer a nível do consumo energético, quer a nível da qualidade de iluminação.

Numa primeira fase começar-se-á por efectuar o levantamento dos sistemas de iluminação existentes em todos os espaços do edifício, nomeadamente as salas de aula, os gabinetes, as circulações, os laboratórios, os auditórios, as instalações sanitárias, etc. O consumo de energia eléctrica será estimado através da potência instalada e dos perfis de utilização de cada espaço. A avaliação da qualidade de iluminação será efectuada pela via experimental, através de um luxímetro e por um programa de simulação numérica, o DIALux. De seguida, faz-se uma análise dos consumos de energia e do nível de qualidade da iluminação para cada um dos espaços. Dos resultados obtidos, verifica-se que os sistemas de iluminação instalados no edifício são energeticamente pouco eficientes e, nalguns casos, também não asseguram os níveis de iluminância recomendados (segundo a norma EN 12464-1), como é o caso dos auditórios, dos laboratórios e biblioteca. Segue-se

a avaliação técnica e económica da instalação de um novo sistema de iluminação em cada tipo de espaço, o qual deve corrigir os níveis de iluminação para os recomendados e ser energeticamente mais eficiente que o actual.

Com esta análise foi possível concluir que a qualidade de iluminação nos espaços que requerem maior destreza visual (e.g., ler e escrever) é fraca, quer em termos de iluminância no plano de trabalho, quer em termos da uniformidade da luz no espaço e que os sistemas actuais possuem grandes perdas de energia, pois operam com equipamentos magnéticos, que substituídos por electrónicos economizam em média 24 % do consumo. Realizando um investimento de 10 039 € com *PR* de 3,5 anos, na implementação dos sistemas recomendados, o edifício DEM-FCTUC passará a consumir cerca de 84 778 kWh por ano, levando a uma poupança anual de 2 853 € (redução no consumo de 25 %).

Palavras-chave: Iluminação artificial, Fotometria, Luminotecnia, DIALux, Sistema DALI.

Abstract

Electricity consumption in large buildings is essentially taken by cooling, ventilation, lighting and specific equipment. In moderate climates, electricity consumption of artificial lighting in office buildings is one of the most significant, representing about 30% of global consumption. In addition, energy losses caused by illumination systems with low efficiency are burdensome economically and environmentally, as most of the electricity production causes CO_2 emissions.

In Portugal, the current legislation requires office buildings to keep energy consumption below certain limits. It is crucial for buildings to keep low energy consumption, by implementing more efficient systems, especially with artificial lighting. Upgrading the existing lighting systems of office buildings presents a savings potential, in the overall energy consumption, around 21 % (DGEG, 2005).

This work aims to analyze the technical and economic viability of replacing lighting systems currently installed in a University building, with more efficient energy consumption and lighting quality.

In a first phase, a survey was performed on existing lighting systems, including all areas of the building, like classrooms, offices, circulations, laboratories, auditoriums, toilets, etc. The electricity consumption is estimated by power equipment values and usage profiles of each space. Assessing the quality of lighting will be done through trial, through a light meter and DIALux, a numerical simulation program. Then, an analysis of energy consumption and the level of quality lighting are performed for each space. From the obtained results, we verify that the lighting systems installed in the building are energy inefficient and in some cases do not provide recommended illuminance levels (according to EN 12464-1), as is the case of the auditoriums, laboratories and library. In a later stage comes the technical evaluation and economic viability of the installation of the new lighting system in each space, which should correct the lighting to recommended levels and provide more energy efficiency.

With this analysis it was concluded that the illumination of spaces that requires more visual effort (like reading and writing) is weak, both in terms of illuminance on the

work plan, and uniformity of light in space. The current systems have significant energy losses, because they operate using magnetic equipment, which replaced by electronic equipment save on average 24 % over present consumption. Performing an investment of 10 039 € and a payback of 3,5 years, in implementing the recommended systems the building DEM-FCTUC will consume about 84 778 kWh per year, leading to annual savings of 2 853 € (consumption reduced in 25 %).

Keywords Artificial light, Photometry, Luminotech, DIALux, DALI System.

Índice

Índice de Figuras viii
Índice de Tabelas xi
Simbologia e siglas xii
Simbologia xii
Siglas xiii
1. Introdução 1
2. Conceitos de Luminotecnia 4
2.1. Propriedades fotométricas 4
2.1.1. Potência e intensidade luminosas 4
2.1.2. Iluminância e luminância 5
2.1.3. A cor e a restituição cromática 6
2.2. Propriedades luminotécnicas 8
2.2.1. Potência total instalada 8
2.2.2. Eficiência luminosa 9
2.3. Equipamento luminotécnico 11
2.3.1. Fontes de luz artificial 11
2.3.2. Análise comparativa 11
2.3.3. Luminária 15
2.3.4. Comandos de circuitos de iluminação 17
3. Caracterização do Sistema Actual de Iluminação do Edifício 18
3.1. Inventário da iluminação existente 18
3.2. Medições experimentais 23
3.3. Consumo de energia pela iluminação actual 25
3.4. Avaliação da qualidade da iluminação actual 28
3.4.1. Parametrização no programa da iluminação dos espaços 28
3.4.2. Avaliação da iluminação de alguns espaços tipo 29
3.5. Análise crítica aos sistemas actualmente instalados 31
4. Propostas de Melhoria 33
4.1. Correcções a fazer ao sistema actual de iluminação 33
4.2. Alternativa 1 – Sistemas de baixo investimento inicial 34
4.3. Alternativa 2 – Sistemas de muito boa eficiência energética 38
4.4. Selecção dos sistemas mais recomendados 39
4.5. Avaliação da qualidade da iluminação proposta 40
4.6. Incorporação de sistemas de controlo 47
4.7. Medidas futuras de melhoria energética 48
5. Conclusões 49

Referências Bibliográficas 52
Anexo A – Conceitos Gerais de Iluminação 56
A.1. Iluminação – fundamentos 56
A.1.1. Radiação electromagnética e iluminação 56
A.1.2. Tipos de luminárias 58
A.1.3. Factor de depreciação 59
A.1.4. Vida de uma fonte de luz artificial 59
A.2. Tipos de lâmpadas 60
A.2.1. Lâmpadas de incandescência 60
A.2.2. Lâmpadas de descarga 62
A.2.3. Diodos emissores de luz – LEDs 68
A.2.4. Estudos de consumo 70
Anexo B – Ferramentas de Medição e de Cálculo 72
B.1. Características dos equipamentos de medida 72
B.2. Programa de simulação de iluminação – DIALux 73
B.3. Circuito de iluminação proposto 74
Anexo C – Auditoria luminotécnica do edifício do DEM - FCTUC 76
C.1. Descrição geral do edifício do DEM - FCTUC 76
C.2. Caracterização das luminárias actuais do edifício 77
C.3. Sistemas de iluminação instalados em cada espaço 78
C.4. Sistemas de comando da iluminação 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impacto da certificação energética no consumo de energia pelos edifícios de serviços (DGEG, 2005). 2
Figura 2. (a) Representação dos planos C0/180 e C90/270 numa luminária axialmente simétrica (Ganslandt & Hofmann, 1992). (b) Distribuição da luz de uma luminária axialmente simétrica em 3D (DIALux). 5
Figura 3. Ilustração das principais propriedades fotométricas. 6
Figura 4. Objecto iluminado por uma fonte de luz branca quente (a) *Tc* = 3 000 K, neutra (b) *Tc* = 4 000 K e fria (c) *Tc* = 5 600 K. Philips (2009). 7
Figura 5. Espectro visível das fontes de luz: (a) Luz solar. (b) Lâmpada incandescente. (c) Lâmpada fluorescente (cor 827). Osram (2009). 7
Figura 6. Sistemas principais de iluminação artificial. (a) Iluminação geral. (b) Iluminação localizada. (c) Iluminação de tarefa. 8
Figura 7. Aumento dos ganhos de eficiência luminosa da luminária com a diminuição do diâmetro das FT (Philips, 2007) ou com a solução Enersave LED. 10
Figura 8. Classificação das fontes de luz artificial. 12
Figura 9. Eficácia luminosa dos tipos de lâmpadas fabricadas pela *Osram*. Osram, 2006. 13
Figura 10. Quatro exemplos de luminárias existentes no edifício. 17
Figura 11. Luminárias existentes no edifício em função da tecnologia da lâmpada. 19
Figura 12. (a) Luminária F1 com protecção classe IP 44. (b) Luminária F3 com protecção classe IP 65. 21
Figura 13. Oxidação da luminária L7, devido a instalação deficiente (má estanquidade na base de contacto). 21
Figura 14. (a) Downligt com uma lâmpada FCI desajustada. (b) Lâmpada FCI reflectora, modelo mais indicado para o downlight. 22
Figura 15. Consumo global de energia activa do edifício. 26
Figura 16. Consumo global de energia activa pelo edifício no ano de 2010 e respectivo custo. 26
Figura 17. Consumo de energia eléctrica do sistema de iluminação do edifício em 2010. . 28
Figura 18. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente na sala pequena 3.4. 41
Figura 19. Iluminância ao nível do plano de trabalho da sala pequena 3.4, assegurada pelo sistema de iluminação artificial existente (a) e recomendado (b). 42
Figura 20. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente na sala grande 6.3. 42
Figura 21. Iluminância ao nível do plano de trabalho da sala grande 6.3, assegurada pelo sistema de iluminação artificial existente (a) e recomendado (b). 43

Figura 22. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente no anfiteatro I. 43
Figura 23. Iluminância ao nível do plano de trabalho médio do anfiteatro I, assegurada pelo sistema de iluminação artificial: (a) Existente; (b) alternativa LED. 44
Figura 24. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial da sala oeste do laboratório de termodinâmica: (a) Existente; (b) Recomendado. 45
Figura 25. Iluminância ao nível do plano de trabalho da sala oeste do laboratório de termodinâmica, assegurada pelo sistema de iluminação artificial: (a) Existente; (b) Recomendado 45
Figura 26. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente no gabinete de docentes 28. 46
Figura 27. Iluminância ao nível do plano de trabalho do gabinete de docentes 28, assegurada pelo sistema de iluminação artificial: (a) Existente; (b) Recomendado. 46
Figura 28. Sistema de iluminação controlado por um sensor de luz. Adaptado de Teixeira (2006). 47
Figura A.1. Espectro da radiação electromagnética. 56
Figura A.2. Escala do índice de restituição cromática (Donsbulbs, 2011). 57
Figura A.3. Depreciação do fluxo luminoso ao longo da vida útil das fontes de luz artificial (U.S. Department of Energy, 2008). 59
Figura A.4. Componentes de uma lâmpada incandescente. 61
Figura A.5. (a) Cápsula. (b) Dicróica. (c) Linear. (d) Reflectora. Electrum Trofa, 2011. 62
Figura A.6. Equipamento auxiliar de uma lâmpada FCNI com base de dois pinos (26 W). 64
Figura A.7. Princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente (Ganslandt e Hofmann, 1992). 65
Figura A.8. Lâmpada fluorescente: (a) Tubular. (b) Compacta não integrada. Compacta integrada com tubos de descarga em forma de: (c) U. (d) Espiral. 66
Figura A.9. Lâmpadas de descarga: (a) Mercúrio a alta pressão. (b) Iodetos metálicos. (c) Sódio a baixa pressão. (d) Sódio a alta pressão. 68
Figura A.10. Sistema de reprodução de luz branca por um dispositivo de LEDs. (a) Sistema PC. (b) Sistema RGB. Figuras adaptadas de Navigant Consulting, et al. (2008). 69
Figura A.11. Evolução da eficácia luminosa η_W das fontes de luz artificial (Yukio Narukawa et al., 2010). 70
Figura A.12. Soluções LED existentes no mercado para a substituição de lâmpadas: (a) Lâmpadas de incandescência ou fluorescentes compactas integradas. (b) Halogéneo de 12 V. (c) e (d) Fluorescente tubular. 70
Figura A.13. (a) Custo acumulado de vários tipos de lâmpadas de base roscada E27 ao longo de 8 anos. (b) Poupança acumulada das lâmpadas alternativas à lâmpada incandescente. 71
Figura B.1. Interface de entrada de dados do programa DIALux. 73
Figura B.2. Planta do circuito de iluminação proposto para as oficinas. 74

Figura C.1. Vista de cima do edifício do DEM-FCTUC, destacando a área que apresenta as melhores condições para a instalação de painéis fotovoltaicos. Imagem retirada de Google Earth, 2011. 76

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Temperatura de cor emitida pelas fontes luminosas (exemplo de uma lâmpada fluorescente). Tabela retirada de Exporlux (2008) e imagem adaptada de Philips (2009). .. 6
Tabela 2. Conversão de energia eléctrica em energia radiante e calor para os vários tipos de funcionamento de fontes de luz artificial. U.S. Department of Energy (2008). 10
Tabela 3. Tipos de espaços onde são empregadas os vários tipos de lâmpadas. DG Industria. Energía y Minas (2006). 14
Tabela 4. Características principais das fontes de luz artificial. Philips (2009). 16
Tabela 5. Medição do consumo de energia eléctrica do equipamento auxiliar magnético (existente no edifico) e electrónico. 23
Tabela 6. Medição da obstrução/absorção de luz pelo difusor opalino das luminárias do tipo F1. 24
Tabela 7. Medição da iluminância das luminárias do tipo F12.2, antes e depois da sua limpeza. 25
Tabela 8. Resumo da avaliação do sistema actual de iluminação artificial do edifício. 32
Tabela 9. Sistemas de iluminação mais indicados para espaços relevantes do edifício. 40
Tabela 10. Características luminotécnicas dos espaços analisados com o *software* DIALux. 47
Tabela A.1. Valores recomendados para os espaços tipo, segundo a norma EN 12464-1:2002. 57
Tabela A.2. Efeitos psicológicos e visuais das cores usadas nos espaços, no Ser Humano. ISLA (2003). 58
Tabela A.3. Consumo de uma lâmpada fluorescente T8 de 36 W para as várias classes de balastro. EDF (2005). 64
Tabela A.4. Dados técnicos das lâmpadas considerados no cálculo do custo total. 71
Tabela B.1. Coeficientes de reflexão das superfícies, considerados no *software* DIALux. 73
Tabela B.2. Custo unitário dos dispositivos considerados na análise dos sistemas de iluminação recomendados (valores sem IVA). 75
Tabela C.1. Levantamento das luminárias existentes no edifício. 77
Tabela C.2. Distribuição dos sistemas de iluminação pelos espaços do edifício. 79
Tabela C.3. Programação dos interruptores horários do edifício. 89

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área [m^2]

A_p – Área aparente [m^2]

CDL – Curva de distribuição luminosa [cd/klm]

C_i – Consumo anual de electricidade derivado do sistema de iluminação [kWh/ano]

D – Densidade de potência [W/m^2]

d – Distância entre a fonte luminosa e a superfície iluminada [m]

D_r – Densidade de potência relativa [W/m^2.100 lx]

E – Iluminância [lx]

E_m – Iluminância média [lx]

E_{min} – Iluminância mínima [lx]

f – Frequência da onda de radiação electromagnética [Hz]

Fd – Factor de depreciação [-]

hpt – Altura do plano de trabalho [m]

i – Corrente eléctrica [A]

I – Intensidade luminosa [cd]

I_D – Iluminação disponível

I_{ND} – Iluminação não disponível

L – Luminância [cd/m^2]

n_i – Número de equipamentos instalados no sistema de iluminação

n_l – Número de lâmpadas

n_L – Número de luminárias

$n_{l,L}$ – Número de lâmpadas por luminária

P_d – Pé-direito [m]

P_D – Potência disponível [W]

P_e – Potência do equipamento auxiliar [W]

P_i – Potência do equipamento i [W]

P_l – Potência da lâmpada [W]

P_{le} – Potência da lâmpada com o equipamento auxiliar [W]

P_t – Potência total instalada [W]

Q – Energia térmica [J]

t – Tempo [s]

t_a – Tempo de utilização anual [h/ano]

Tc – Temperatura de cor [K]

t_d – Tempo de utilização diária [h/dia]

u_0 – Uniformidade da iluminação no plano de trabalho

W_{vis} – Energia luminosa [J]

α – Ângulo limite da CDL [º]

β – Ângulo do facho luminoso para metade dos valores da intensidade luminosa [º]

η_L – Eficiência luminosa da lâmpada [W]

η_R - Eficiência do recinto [-]

η_W – Eficácia luminosa da lâmpada [lm/W]

θ – Ângulo entre a superfície iluminada e a área aparente [º]

λ – Comprimento de onda da radiação electromagnética [m]

ρ – Coeficiente de reflexão [-]

φ – Ângulo de fase [º]

ϕ – Diâmetro [m]

Φ – Fluxo luminoso [lm]

Φ_l – Fluxo luminoso irradiado pela fonte de luz [lm]

Φ_L – Fluxo luminoso irradiado pela luminária [lm]

Ω – Ângulo sólido [sr]

Siglas

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar-condicionado

CCI – Comando do circuito de iluminação

CIE – Comissão Internacional de Iluminação

DALI – Digital Addressable Lighting Interface

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DGEG – Direcção-Geral de Energia e Geologia

EDP – Electricidade de Portugal

FCI – Lâmpada fluorescente compacta integrada

FCNI – Lâmpada fluorescente compacta não integrada

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FP – Factor de potência

FT5 – Lâmpada fluorescente tubular com diâmetro de 5’ (16 mm)

FT8 – Lâmpada fluorescente tubular com diâmetro de 8’ (26 mm)

H – Lâmpada de halogéneo

I – Lâmpada incandescente

IEE – Índice de eficiência energética

IESNA – Illuminating Engineering Society of North America

IRC – Índice de restituição cromática

IS – Instalação sanitária

IVA – Imposto sobre o valor acrescentado

l – Lâmpada

L – Luminária

LED – Light-emmiting diode (diodo emissor de luz)

PR – Período de retorno simples

PRE – Plano de Racionalização Energética

R_a – Índice de restituição cromática

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios

UGR – Unified Glare Rating

UTA – Unidade de tratamento de ar

VMH – Lâmpada de vapor de mercúrio a alta pressão

1. INTRODUÇÃO

A iluminação constitui um dos factores primordiais na criação de um ambiente laboral ou de lazer, influenciando a produtividade, a saúde e o bem-estar dos utilizadores.

Face à actual preocupação ambiental e energética, torna-se determinante a implementação de sistemas energeticamente eficientes, nomeadamente ao nível da iluminação. Nos grandes edifícios de serviços a iluminação chega a ser responsável por mais de 30% dos gastos energéticos. Além disso, a iluminação pode consumir a dobrar, visto que a energia eléctrica que não é convertida em luz é desperdiçada sob a forma de calor. A carga térmica assim resultante leva a valores de temperatura do ar superiores aos de conforto térmico e por isso, uma parte ou a totalidade do calor libertado pelos sistemas de iluminação tem de ser dissipado pelos equipamentos de refrigeração do ar interior. Em Portugal, país com clima moderado, isto acontece muito frequentemente nos centros comerciais. Aliás, é prática comum estes estabelecimentos não possuírem equipamentos de aquecimento do ar, dado que a elevada densidade de pessoas, somada à potência de iluminação das lojas, liberta calor mais do que suficiente para suprir as necessidades de aquecimento (mesmo no Inverno).

Conforme se pode constatar na Figura 1, em 2005 a DGEG (Direcção-Geral de Energia e Geologia) estimava que, em média, a substituição dos sistemas de iluminação de um edifício de escritórios por outros mais eficientes resultaria numa poupança de energia da ordem dos 21 % do consumo total do edifício. Aliás, identificam a substituição da iluminação por uma mais eficiente como a medida de eficiência energética com maior impacto em termos da diminuição de consumos por parte dos edifícios de serviços. Deste modo, a regulamentação em vigor do SCE (Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios) exige que os grandes edifícios de serviços, sejam eles novos ou existentes, apresentem consumos energéticos abaixo de determinados valores limite. É, assim, imperioso que um edifício de serviços apresente baixos consumos de energia, nomeadamente com a iluminação artificial. Em suma, um nível de iluminação adequado melhora o conforto e aumenta a produtividade.

Figura 1. Impacto da certificação energética no consumo de energia pelos edifícios de serviços (DGEG, 2005).

Este trabalho tem como objectivo analisar a viabilidade técnica e económica da substituição dos sistemas de iluminação existentes num edifício de um estabelecimento de ensino superior por outros mais eficientes, quer em termos de consumo energético, quer em termos de iluminância. Seleccionou-se o edifício onde funciona o DEM – FCTUC (Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra) construído no ano de 1993 e com uma área de pavimento de 11 360 m^2.

A prossecução deste trabalho assenta nas seguintes etapas:

- Levantamento e caracterização detalhada dos sistemas de iluminação disponíveis no mercado.

- Levantamento e caracterização dos sistemas de iluminação instalados no DEM-FCTUC.

- Avaliação do consumo anual com a iluminação artificial existente no edifício (a partir da potência instalada e dos perfis de utilização).

- Estudo dos níveis de iluminação para os vários espaços (salas, gabinetes, laboratórios, circulações, etc.), conseguidos com os sistemas actualmente instalados e comparação com os níveis recomendados para esse tipo de espaços. Análise a efectuar com recurso a um luxímetro e através de um programa de simulação (DIALux).

- Avaliação técnica e económica dos sistemas de iluminação alternativos (alternativa 1 – sistemas de baixo investimento inicial e alternativa 2 – sistemas de muito boa eficiência energética), os quais devem corrigir os níveis de iluminação para os recomendados e serem energeticamente mais eficientes que o actual. Estudo a efectuar com o apoio do *software* DIALux.

2. CONCEITOS DE LUMINOTECNIA

Neste Capítulo descrevem-se alguns conceitos inerentes ao estudo da aplicação de sistemas de iluminação nos espaços, designadamente as grandezas fotométricas e as propriedades de cálculo luminotécnico. No Anexo A, afiguram-se esclarecimentos adicionais sobre os aspectos mais teóricos, como algumas definições luminotécnicas e características técnicas das lâmpadas e luminárias.

2.1. Propriedades fotométricas

Seguem-se algumas definições e termos normalmente utilizados para descrever as propriedades das fontes luminosas e os efeitos que estas produzem no Ser Humano.

2.1.1. Potência e intensidade luminosas

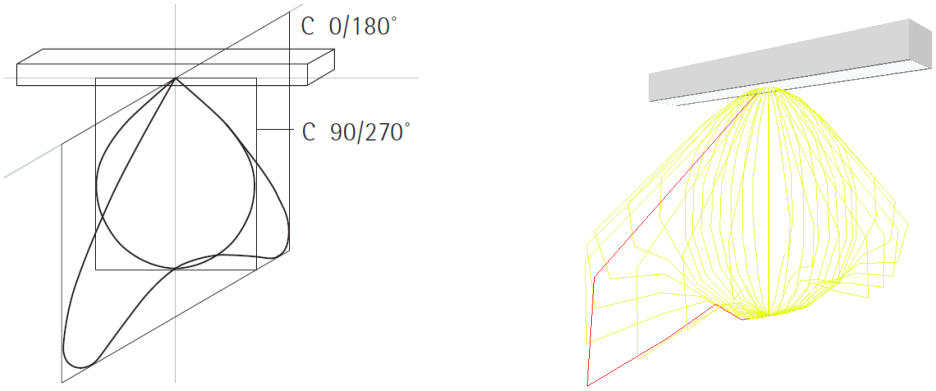
O fluxo luminoso ou potência luminosa Φ é a quantidade total de radiação visível (ou energia luminosa) W_{vis} [J] emitida por uma fonte de luz por unidade de tempo, sendo a sua unidade o Lúmen [lm].

$$\Phi = \frac{W_{\text{vis}}}{t} \tag{1}$$

A intensidade luminosa I é o fluxo luminoso irradiado por ângulo sólido Ω, i.e., irradiado numa determinada direcção. A sua unidade é o candela [cd = lm/sr].

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \tag{2}$$

A representação gráfica da intensidade luminosa em todos os ângulos é designada por curva de distribuição luminosa (CDL). As luminárias necessitam de pelo menos duas curvas para se conhecer a sua completa distribuição fotométrica, definida pelos planos C0/180 e C90/270, i.e., os planos transversal e longitudinal da luminária, respectivamente (Figura 2).



(a) **(b)**

Figura 2. (a) Representação dos planos C0/180 e C90/270 numa luminária axialmente simétrica (Ganslandt & Hofmann, 1992). (b) Distribuição da luz de uma luminária axialmente simétrica em 3D (DIALux).

2.1.2. Iluminância e luminância

Iluminância ou nível de iluminação E é o fluxo luminoso, irradiado por uma fonte luminosa, que incide sobre a área A de uma superfície. A sua unidade de medida é o Lux [lx]. Se a distância d entre a fonte luminosa e a superfície iluminada for, no mínimo, cinco vezes superior ao tamanho da fonte de luz (aproximando-se de uma fonte pontual), a iluminância também pode ser determinada em função da intensidade luminosa incidente na superfície, constatando-se que a iluminância é inversamente proporcional ao quadrado da distância.

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I}{d^2} \tag{3}$$

Por sua vez, a luminância define-se como a razão entre a intensidade luminosa produzida, reflectida ou transmitida por uma superfície e a área aparente dessa mesma superfície, A_p. A área aparente é a área projectada, i.e., aquela que é vista pelo observador, fazendo um ângulo de 90º com o eixo ocular deste. (Luz, J., 2010). A luminância tem a unidade [cd/m^2] e é dada por:

$$L = \frac{I}{A_p} = \frac{I}{A\cos\theta} \tag{4}$$

em que θ é o ângulo entre o plano de trabalho e a área aparente (Figura 3).

Enquanto a iluminância indica a quantidade de fluxo luminoso que incide sobre a superfície receptora, a luminância descreve o brilho ou sensação de claridade produzida por uma superfície produtora/reflectora. Ou seja, a luminância é a quantidade de luz

dirigida para os olhos, através da envolvente (fontes de luz, paredes, chão, tecto, mobílias, etc.), sendo a única grandeza fotométrica que o olho humano interpreta.

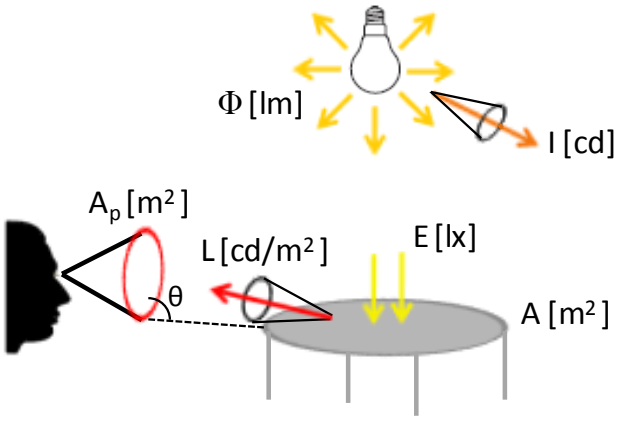


Figura 3. Ilustração das principais propriedades fotométricas.

2.1.3. A cor e a restituição cromática

A temperatura de cor ou tonalidade de cor, *Tc*, expressa a aparência de cor da luz branca emitida por uma fonte luminosa. Cada tonalidade de cor corresponde a um espectro de comprimentos de onda. Existe uma correlação entre a temperatura de uma fonte luminosa e a cor que transmite. Quanto maior for a temperatura de cor, mais clara é a tonalidade de cor da luz branca. A tonalidade de cor da luz branca é distinguida em três grupos, conforme se demonstra na Tabela 1.

Tabela 1. Temperatura de cor emitida pelas fontes luminosas (exemplo de uma lâmpada fluorescente). Tabela retirada de Exporlux (2008) e imagem adaptada de Philips (2009).

Luz branca quente	*Tc* < 3 300 K	2500 K 2700 K 3000 K
Luz branca neutra	3 300 K < *Tc* < 5 300 K	4000 K 4500 K
Luz branca fria	*Tc* > 5 300 K	5600 K 6500 K 8000 K

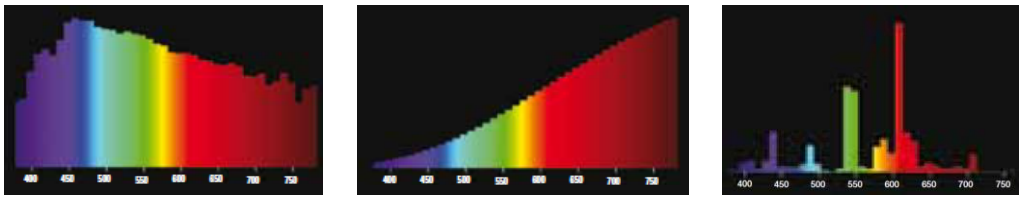
A tonalidade de cor transmite um efeito psicofísico no Homem. Deste modo, a luz branca quente (luz suave) proporciona ambientes de tranquilidade, conforto e intimidade,

sendo indicada para restaurantes, salas de estar e quartos/hotéis. Por outro lado, a luz branca neutra transmite vitalidade e concentração, sendo indicada para ambientes produtivos e de consumo, tais como, restaurantes *fast-food*, centros comerciais, cozinhas e instalações sanitárias. A luz branca fria (luz brilhante) é indicada para ambientes onde se pretende dar a sensação de um ambiente mais limpo ou mais fresco como, p. ex., os hospitais.

(a) (b) (c)

Figura 4. Objecto iluminado por uma fonte de luz branca quente (a) *Tc* = 3 000 K, neutra (b) *Tc* = 4 000 K e fria (c) *Tc* = 5 600 K. Philips (2009).

O índice de reprodução de cor ou índice de restituição cromática (*IRC* ou *Ra*) mede a fiabilidade com que uma fonte de luz artificial reproduz a cor das superfícies iluminadas, em comparação com uma fonte luminosa de referência com temperatura de cor similar à cor do objecto (U.S. Department of Energy, 2008). Este índice é representado numa escala que vai de 0 (muito mau) a 100 (muito bom). A norma EN 12464-1, referente à iluminação de interiores, não recomenda valores de *IRC* inferiores a 80. A escolha dos valores das grandezas *IRC* e *Tc* é importante, pois influencia a beleza e o conforto luminoso apropriado para o espaço. Apresenta-se na Figura 5 os *IRC*s da luz solar, de uma lâmpada incandescente e de uma fluorescente de cor 827 (1º digito significa *IRC* de 80 e 2º e 3º dígitos *Tc* de 2 700 K).



(a) (b) (c)

Figura 5. Espectro visível das fontes de luz: (a) Luz solar. (b) Lâmpada incandescente. (c) Lâmpada fluorescente (cor 827). Osram (2009).

2.2. Propriedades luminotécnicas

Um sistema de iluminação artificial divide-se em três grupos: o sistema principal; o sistema secundário; e o sistema terciário. O sistema principal, que visa garantir as necessidades de conforto luminoso tem, por isso, um carácter mais funcional. Neste sistema insere-se a iluminação geral, a localizada e a de tarefa, apresentadas na Figura 6. O sistema secundário é responsável pela criação do ambiente sendo, por isso, de uma abordagem mais criativa e livre, e.g., a luz decorativa e arquitectónica. O terceiro sistema de iluminação é o de segurança que, em caso de emergência ou de avaria da iluminação normal, indica o caminho para o exterior e permite a intervenção de equipas de socorro.

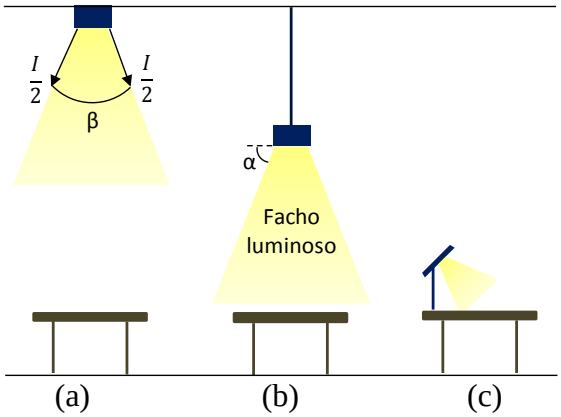


Figura 6. Sistemas principais de iluminação artificial. (a) Iluminação geral. (b) Iluminação localizada. (c) Iluminação de tarefa.

Na Figura 6, o α representa o ângulo limite da CDL (*cut-off angle*) e β o ângulo do facho luminoso para metade dos valores de intensidade luminosa (*beam spread*).

2.2.1. Potência total instalada

Potência total instalada ou fluxo energético, P_t, é a potência de todos os equipamentos instalados que fazem parte do sistema de iluminação, nomeadamente as fontes de luz, o equipamento auxiliar e os comandos de circuitos de iluminação. A sua unidade é o Watt [W] e é definida por:

$$P_t = \sum_{i=1}^{n} n_i \times P_i \tag{5}$$

em que n_i é a quantidade de equipamentos instalados do tipo i no sistema de iluminação e P_i [W] a potência destes. A densidade de potência, D, indica a potência total instalada

consumida por metro quadrado de espaço. A sua unidade é o Watt por metro quadrado [W/m^2] e é definida por:

$$D = \frac{P_t}{A} \tag{6}$$

em que A é a área de pavimento do espaço. Esta grandeza é frequentemente utilizada para os cálculos de dimensionamento de sistemas de ar-condicionado e de projectos eléctricos de uma instalação.

Quando é necessária a comparação entre dois espaços em que não existe o mesmo nível de iluminação, utiliza-se a densidade de potência relativa D_r que é a densidade de potência total instalada por cada 100 lx de iluminância (produzidos no espaço). A sua unidade é o Watt por metro quadrado por 100 lx [W/(m^2.100 lx)] e é dada por:

$$D_r = \frac{D}{E_m/100} = \frac{P_t \times 100}{A \times E_m} \tag{7}$$

sendo A a área total de pavimento do espaço e E_m a iluminância média nesse espaço [lx].

2.2.2. Eficiência luminosa

Utiliza-se o termo "eficácia" quando o numerador e o denominador apresentam unidades diferentes, enquanto a eficiência é adimensional e com valores entre 0 e 1.

A eficácia luminosa de uma fonte de luz artificial η_w é o fluxo luminoso produzido por cada Watt de energia eléctrica consumido. A sua unidade é o lúmen por Watt [lm/W].

$$\eta_w = \frac{\Phi_l}{P_l} \tag{8}$$

Para produzir energia luminosa as fontes de luz artificial necessitam de consumir energia. Actualmente, esta energia é fundamentalmente eléctrica. No entanto, neste processo, as fontes de luz também convertem a energia eléctrica noutras formas de energia, nomeadamente em energia radiante e energia térmica. As percentagens resultantes da conversão de energia eléctrica em outras formas de energia, inerentes ao processo de funcionamento das fontes de luz artificial, apresentam-se na Tabela 2.

Tabela 2. Conversão de energia eléctrica em energia radiante e calor para os vários tipos de funcionamento de fontes de luz artificial. U.S. Department of Energy (2008).

	Incandescente	Fluorescente tubular	Iodetos metálicos	LED
Radiação visível (luz)	8%	21%	27%	15-25%
IV	73%	37%	17%	0%
UV	0%	0%	19%	0%
Energia total radiante	81%	58%	63%	15-25%
Energia térmica (condução + convecção)	19%	42%	37%	75-85%
Total	100%	100%	100%	100%

A eficiência luminosa de uma luminária η_L é dada pela razão entre o fluxo luminoso que sai da luminária (Φ_L) e o fluxo luminoso produzido pela fonte de luz dessa luminária (ou seja, pela lâmpada).

$$\eta_L = \frac{\Phi_L}{\Phi_l} \tag{9}$$

A título de exemplo apresenta-se na Figura 7 a influência do diâmetro das lâmpadas fluorescentes tubulares (FT) e da luz hemisférica da lâmpada LED na eficiência luminosa de uma luminária.

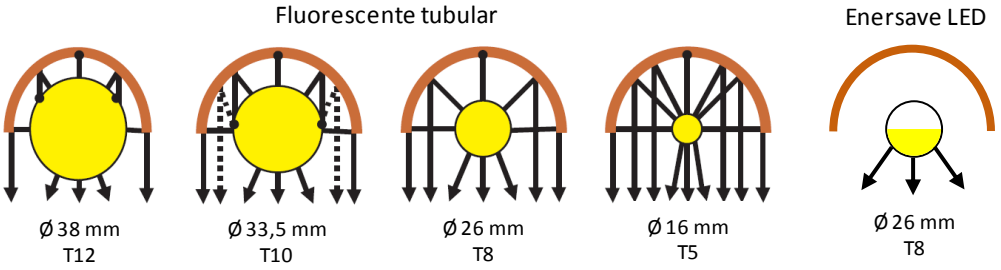


Figura 7. Aumento dos ganhos de eficiência luminosa da luminária com a diminuição do diâmetro das FT (Philips, 2007) ou com a solução Enersave LED.

Para determinar a eficiência energética de um sistema de iluminação deve ser levado em consideração o aproveitamento da luz natural, a eficácia luminosa das fontes de luz artificial, a eficiência luminosa das luminárias e a eficiência do recinto.

A eficiência do recinto, η_R, relaciona a CDL (curva de distribuição luminosa) de uma luminária com o coeficiente de reflexão ρ das paredes, tecto, chão e com o índice do recinto. O índice do recinto K_r é a relação entre as dimensões do local e é dada por:

$$K_{rd} = \frac{a \times b}{h(a+b)} \tag{10}$$

para iluminação directa e por:

$$K_{ri} = \frac{3 \times a \times b}{2 \times h'(a+b)} \tag{11}$$

para iluminação indirecta. Nas equações anteriores a representa o comprimento do recinto [m], b a largura [m], h o pé direito útil [m] e h' é a distância do tecto ao plano de trabalho [m]. É possível constatar que quanto maior for o espaço, menor é a eficiência luminosa do recinto.

2.3. Equipamento luminotécnico

O funcionamento dos sistemas de iluminação requer vários tipos de equipamentos, nomeadamente as fontes de luz, o equipamento auxiliar (quando aplicável), as armaduras e os comandos de circuitos de iluminação.

2.3.1. Fontes de luz artificial

As fontes de luz artificial são classificadas em função do processo tecnológico de geração de luz (Figura 8), distinguindo-se as lâmpadas de incandescência (que produzem luz através do aquecimento de um filamento até atingir a incandescência), as lâmpadas de descarga (que geram luz através da excitação de vapores metálicos) e os LEDs (dispositivos semi-condutores com uma junção P-N, que emitem luz quando é aplicada uma diferença de potencial eléctrico).

2.3.2. Análise comparativa

As lâmpadas incandescentes apresentam como vantagens, um excelente *IRC* (≈ 100 %), devido ao espectro contínuo que produzem e permitem a dimerização sem acréscimo de equipamento, possuindo como maior desvantagem a baixa eficácia luminosa (≤ 15 lm/W) e uma duração curta (até 1 000 horas). As lâmpadas de halogéneo, em comparação com as incandescentes, emitem uma luz mais branca e brilhante, devido ao aumento da temperatura de 2 700 K para 3 000 K. Por operarem nesta gama de temperatura, estas lâmpadas apenas produzem luz branca quente. Devido ao facto de as lâmpadas de incandescência possuírem muito baixa eficácia luminosa, a União Europeia

publicou uma Directiva (Directiva 2005/32/CE) e um Regulamento (Regulamento 2009/244/CE) para a eliminação progressiva do uso das lâmpadas incandescentes e das de halogéneo. Actualmente em Portugal a comercialização deste tipo de lâmpadas está muito condicionada e sujeita a taxas elevadas (Decreto-Lei 108/2007, Portaria 54/2008, Portaria 63/2008).

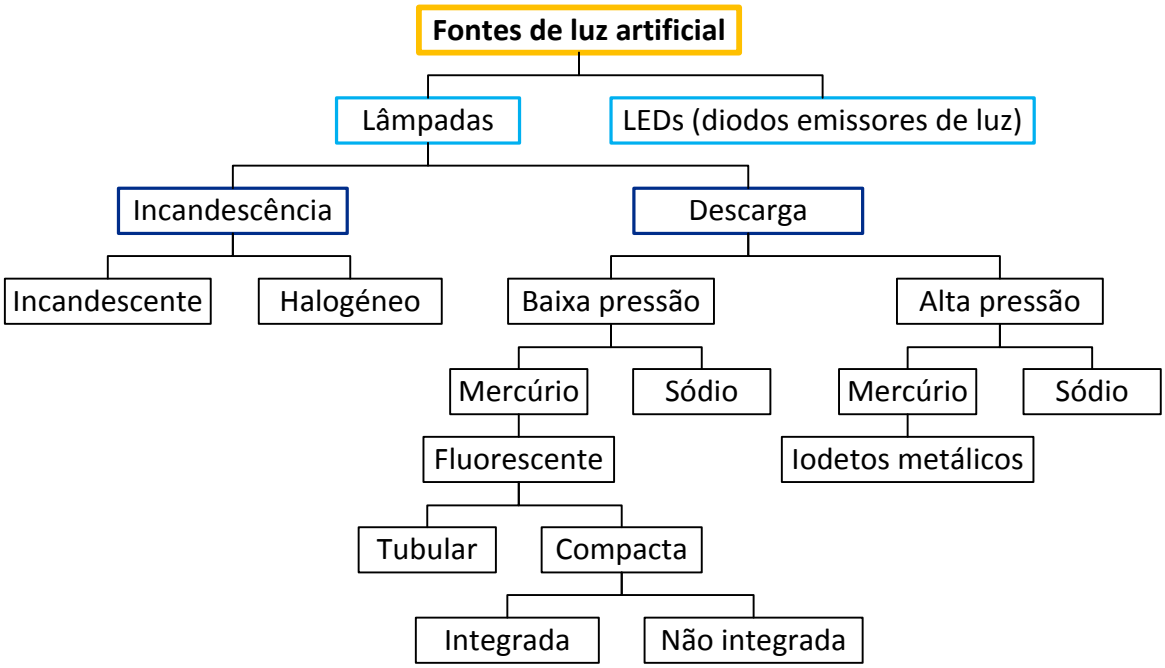


Figura 8. Classificação das fontes de luz artificial.

As lâmpadas de descarga apresentam como desvantagens, perante as lâmpadas de incandescência, um *IRC* menor e necessitam de equipamento auxiliar (balastro), possuindo como vantagens, um maior fluxo luminoso, maior eficácia luminosa, uma vida mais longa e produzem mais tonalidades de cor, nomeadamente a luz branca quente (*warm-white*), branca neutra (*neutral-white*) e branca fria (*cool-white*). Outra desvantagem que estas lâmpadas, especialmente as de alta pressão apresentam é que a maioria necessita de um tempo de arranque (tempo que a lâmpada demora a atingir o rendimento máximo) e de um tempo de arrefecimento de alguns minutos para voltarem a ser reacendidas. O reacendimento instantâneo é possível para algumas lâmpadas (e.g., lâmpadas de extremidade dupla com balastro electrónico), como os iodetos metálicos e as lâmpadas de sódio a alta pressão. Outra desvantagem de algumas lâmpadas de descarga é a restrição na

posição de funcionamento (*burning position*), mais especificamente as lâmpadas de mercúrio de descarga a alta pressão e as de sódio a baixa pressão.

As lâmpadas fluorescentes tubulares por possuírem uma maior superfície de irradiação, contribuem para uma luz mais difusa, sendo indicadas para espaços amplos ou onde se deseja uma iluminação mais uniforme, e.g., escritórios e oficinas. A luz difusa produz sombras mais ténues e não origina excesso de brilho em superfícies lisas (encadeamento). Como a textura ou a forma dos objectos não são enfatizadas por este tipo de lâmpadas, estas não são indicadas para luz de destaque.

As lâmpadas fluorescentes compactas não integradas (FCNI) têm como vantagem, relativamente às integradas (FCI), o facto de apresentarem um menor custo (custo do balastro não incluído). Desta forma, o custo de manutenção de uma luminária com lâmpadas FCNI é consideravelmente mais baixo, visto que o tempo de vida do balastro é francamente superior ao das lâmpadas, não sendo necessária a substituição deste sempre que se faça a reposição destas lâmpadas. Em média, a substituição de uma lâmpada incandescente (e.g., 60 W) por uma FCI com fluxo luminoso equivalente (e.g., 15 W) leva a uma poupança energética de 75 %.

Na Figura 9 apresenta-se a eficácia luminosa das lâmpadas, sendo que a barra de cor de laranja significa a oscilação dos valores de eficácia dentro de cada tipo de lâmpada.

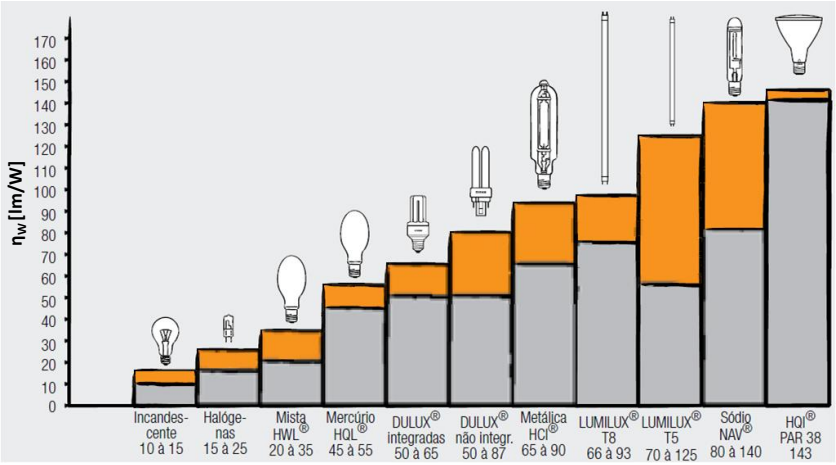


Figura 9. Eficácia luminosa dos tipos de lâmpadas fabricadas pela *Osram*. Osram, 2006.

A lâmpada de sódio a baixa pressão tem a vantagem de possuir uma excelente eficácia luminosa, mas por produzir uma luz amarela monocromática, transmite um *IRC*

quase nulo. Por essa razão, foram substituídas por lâmpadas de sódio de alta pressão no seu campo de aplicação (iluminação pública e industrial), visto que o aumento da pressão no interior da lâmpada (causando o aumento de colisões entre os electrões e os átomos do vapor metálico) produz um espectro mais contínuo e extenso, o que melhora distintamente o *IRC*. As lâmpadas de descarga a alta pressão, por produzirem um fluxo luminoso elevado são indicadas para espaços com grande pé direito, e.g., pavilhões, estádios, iluminação pública e vitrinas. Na Tabela 3 apresentam-se os tipos de lâmpadas mais adequadas para os vários tipos de espaços, salientando que existem dispositivos LED para, praticamente, todos esses espaços.

Tabela 3. Tipos de espaços onde são empregadas os vários tipos de lâmpadas. DG Industria. Energía y Minas (2006).

	I	**H**	**FT**	**FC**	**VMH**	**IM**	**VSH**	**VSL**
Sector residencial	x	x	x	x				
Sector industrial			x		x	x	x	
Campos desportivos						x	x	
Espaços comerciais pequenos	x	x	x	x		x		
Espaços comerciais grandes		x			x	x	x	
Iluminação de emergência			x					x
Iluminação pública					x		x	x

Os LEDs apresentam, sem dúvida, a melhor eficácia luminosa de todas as fontes de luz artificial, são compactos e leves, permitem um melhor controlo da luz, a sua vida não é afectada pelos curtos ciclos de funcionamento ou frequência de acendimentos, é uma tecnologia resistente, além de constituírem a solução mais amiga do ambiente pelo seu muito baixo consumo e ausência de mercúrio. Têm como grandes limitações o elevado custo inicial e o facto da eficácia luminosa e vida útil diminuírem fortemente com o aumento da temperatura, sendo necessário a ligação a dissipadores de calor (*heat sink*) e a um equipamento auxiliar designado de *driver*.

Devido à sua grande versatilidade, existem soluções LED para quase todas as aplicações, apresentando-se como a melhor solução na iluminação de artefactos ou de objectos em exposição, por não emitirem radiação IV e UV que lhes provocam danos, na iluminação de espaços extremamente frios (arcas frigoríficas), visto que a sua eficácia

luminosa aumenta com a diminuição da temperatura. Como produzem várias cores, são ideais para a iluminação arquitectónica ou decorativa e por apresentarem uma tecnologia de estado sólido (sem filamento ou bolbo de vidro) são uma solução ideal para locais sujeitos a choques ou vibrações, tais como automóveis, industria e iluminação pública. Ambientalmente são a fonte de luz artificial mais ecológica, pois apresentam uma longa vida útil, são livres de mercúrio e consomem muito pouca energia eléctrica (traduzindo-se em pouca emissão de CO_2).

As lâmpadas têm a característica de emitir luz em todas as direcções. Para muitas aplicações, este facto resulta numa porção de luz a ser desperdiçada, sendo usados reflectores para tornar a luz mais direccional, não evitando contudo as perdas de luz. Como os LEDs são montados numa superfície plana, eles emitem a luz hemisféricamente, em vez de esfericamente. Portanto, devido à natureza da sua luz direccional, o LED é a fonte de luz artificial mais indicada para este tipo de iluminação, nomeadamente na iluminação de sancas (iluminação indirecta), que apresenta uma eficiência luminosa entre 30 a 50 % (ou seja, mais de metade da luz produzida pelas lâmpadas não chega a sair das sancas) ou nos *downlights*, onde cerca de 40 % a 50 % do fluxo luminoso das lâmpadas é absorvido pelo interior da luminária (U.S. Department of Energy, 2008).

Apresentam-se na Tabela 4 as características principais das fontes de luz artificial retiradas dos catálogos da *Philips*, onde S significa “sem equipamento auxiliar”, M “com equipamento auxiliar magnético” e E “com equipamento auxiliar electrónico”.

2.3.3. Luminária

Designa-se por luminária o conjunto formado pela armadura mais a lâmpada, constituindo uma unidade completa de iluminação (Figura 10). A armadura compreende todos os acessórios de fixação, protecção, controlo de luz, equipamento auxiliar (se aplicável) e o circuito eléctrico responsável pela ligação à fonte de alimentação. Os componentes de controlo de luz da luminária (Figura 10) são o difusor, as alhetas e o reflector (que é a superfície interna da luminária, desenhada para reflectir o fluxo das lâmpadas, levando ao aumento da eficiência luminosa da luminária). As alhetas (*louvers*) são os acessórios posicionados transversalmente à frente das lâmpadas, que têm a função de emitir correctamente o fluxo luminoso produzido pela fonte de luz, sem causar encadeamento, i.e., limitando o ângulo de emissão de luz α. O difusor tem a função de

difundir a luz, proteger as lâmpadas e esconder o equipamento de iluminação, podendo ser transparente, opalino ou prismático.

Tabela 4. Características principais das fontes de luz artificial. Philips (2009).

Fontes de luz artificial	***P_l* [W]**	***Φ* [lm]**	***Tc* [K]**	***IRC***	**Vida média [h]**	**Equipamento auxiliar**			**Aplicação**
						S	M	E	
I	25 a 200	230 a 3 090	2 700	100	750 a 1 000	x			Geral, decorativa; destaque; IS
H	20 a 1 000	300 a 24 200	3 000	100	1 500 a 4 000	x			
FT5	14 a 80	1 200 a 6 150	3 000 a 6 500	85	24 000			x	Geral; arquitectónica
FT8	15 a 65	800 a 5 200	3 000 a 6 500	66 a 95	7 500 a 15 000		x	x	
FCNI	9 a 42	600 a 3 200	2 700 a 4 000	82	10 000		x	x	
FCI	5 a 80	235 a 5 300	2 700 a 6 500	78 a 82	4 000 a 10 000			x	
VMH	80 a 400	3 700 a 22 000	3 900 a 4 300	40 a 48	16 000		x	x	P_d alto; decorativa; destaque
IM	75 a 1 960	5 700 a 189 000	3 000 a 4 600	60 a 85	3 000 a 20 000		x	x	
VSH	70 a 1000	5 600 a 130 000	1 950 a 20 000	23 a 25	20 000 a 32 000		x	x	
LED	4 a 11	32 a 400	2 700 a 5 200	70 a 90	25 000 a 45 000			x	Todas

Segundo a CIE (Comissão Internacional de Iluminação) as luminárias são classificadas em função da sua distribuição fotométrica. Esta classificação é baseada na percentagem de fluxo luminoso total dirigido para cima ou para baixo de um plano horizontal de referência. As luminárias também são classificadas segundo índices que indicam a sua estanquidade a corpos sólidos e líquidos (EN 60529), a protecção eléctrica e inflamabilidade do invólucro exterior (EN 60598) e a resistência ao impacto (EN 50102).

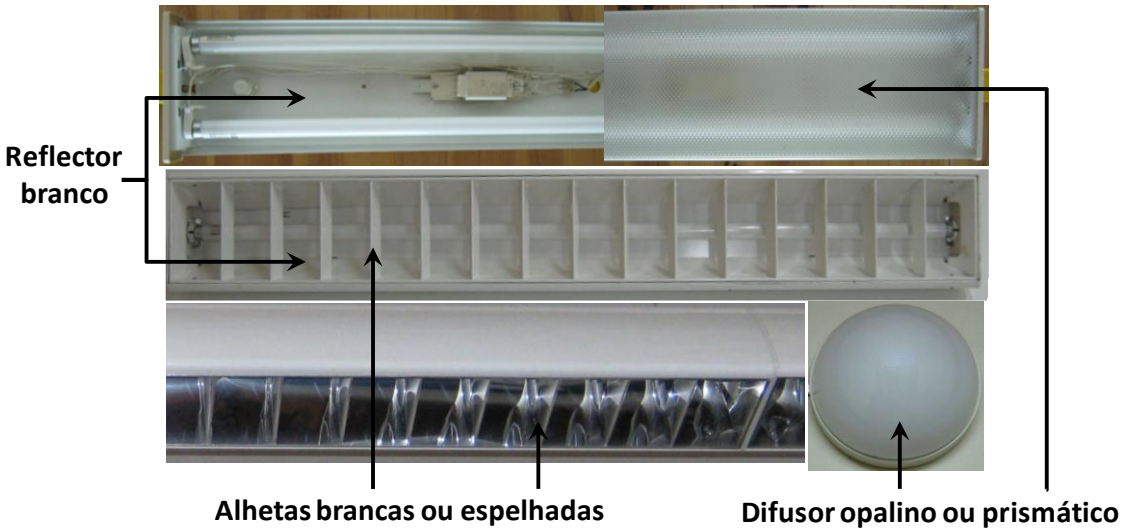


Figura 10. Quatro exemplos de luminárias existentes no edifício.

2.3.4. Comandos de circuitos de iluminação

Os circuitos de iluminação são controlados por comandos manuais ou automáticos. O comando manual (ligação e corte) pode ser efectuado por interruptores, por comutadores, por disjuntores, etc. O comando automático pode ser efectuado por interruptores horários (que permitem comandar os circuitos de iluminação num horário pré-determinado), por interruptores crepusculares (que activam o circuito de iluminação quando a luz natural medida por uma célula fotoeléctrica passa a ser inferior a um dado nível de iluminação pré-seleccionado), por detectores de movimento e/ou presença (que activam o circuito de iluminação através de um sensor de infravermelhos ou de ultra-sons), etc. (Teixeira, 2006.).

3. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ACTUAL DE ILUMINAÇÃO DO EDIFÍCIO

Seleccionou-se como edifício para o qual se pretende analisar a viabilidade técnica e económica da substituição dos sistemas de iluminação actuais por outros energeticamente e luminotecnicamente mais eficientes, o imóvel em que funciona o DEM – FCTUC (Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra), construído em 1993 e com uma área de pavimento de 11 360 m^2. Para se caracterizar o sistema actual de iluminação do edifício teve que se determinar vários parâmetros, assim como fazer o levantamento do equipamento luminotécnico instalado no edifício. Descrevem-se no seguimento deste Capítulo as técnicas utilizadas, os valores obtidos, os parâmetros estimados e a análise dos sistemas actuais de iluminação do edifício. Por uma questão de síntese apresenta-se apenas um resumo das técnicas de análise utilizadas e os valores obtidos. Para informação mais pormenorizada sobre os equipamentos de medida utilizados remete-se para o Anexo B. No Anexo C encontra-se a informação detalhada sobre os valores medidos ou estimados das características dos sistemas de iluminação actualmente instalados no edifício.

3.1. Inventário da iluminação existente

Mediu-se a área de pavimento (A) e o pé direito (P_d) de todos os espaços do edifício com o auxílio de um medidor de distâncias a laser, excepto em circulações cujo comprimento é superior a 25 m. Para estes espaços estes valores foram estimados com recursos às plantas do edifício.

Foi efectuada uma auditoria exaustiva à iluminação instalada no edifício, da qual se segue apenas um resumo. Para informação detalhada remete-se para o Anexo C.

a) Sistemas de iluminação existentes

Efectuou-se o levantamento de todas as luminárias existentes no edifício. Contabilizaram-se no total 2 425 luminárias, cuja agregação por tipos de lâmpada se apresenta na Figura 11. Conforme se pode constatar, 28 luminárias (1,2 %) possuem

lâmpadas incandescentes (I), 134 (5,5 %) lâmpadas de halogéneo (H), 1 713 (70,6 %) lâmpadas fluorescentes tubulares T8 (FT8), 355 (14,6 %) lâmpadas fluorescentes compactas não integradas (FCNI), 125 (5,2 %) lâmpadas fluorescentes compactas integradas (FCI), 7 (0,3 %) lâmpadas de vapor de mercúrio de descarga a alta pressão (VMH) e 63 (2,6 %) lâmpadas de iodetos metálicos (IM). Tendo em conta a eficiência dos sistemas de iluminação instalados, antevê-se desde já, um potencial enorme de poupança no consumo de energia eléctrica do edifício com a substituição destas lâmpadas e/ou do equipamento auxiliar.

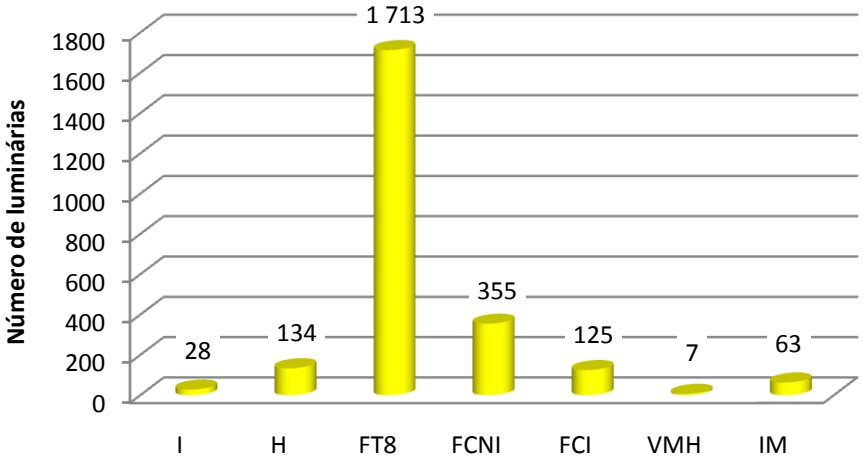


Figura 11. Luminárias existentes no edifício em função da tecnologia da lâmpada.

Contabilizou-se, em todos os espaços, a quantidade de luminárias n_L, o número de lâmpadas por luminária $n_{l,L}$, o número total de lâmpadas n_l, a potência de cada lâmpada P_l, a potência da lâmpada com o equipamento auxiliar P_{le}, a iluminação não disponível I_{ND} que é número de lâmpadas ou luminárias não operacionais, iluminação disponível I_D, potência disponível P_D, i.e., o equipamento de iluminação efectivamente ligado ou a consumir energia eléctrica. Também se identificaram os comandos dos circuitos de iluminação (CCI) de todos os espaços. Encontram-se no Anexo C os valores obtidos para cada um destes parâmetros.

O edifício só possui luminárias com balastros simples, ou seja, cada lâmpada está equipada com um balastro. Para esta situação e conforme se pode observar na equação (13), a potência da luminária P_L foi calculada multiplicando o número de lâmpadas por luminária $n_{l,L}$ pela potência da lâmpada com o equipamento auxiliar P_{le}. Determinou-se a potência de entrada do conjunto lâmpada mais equipamento auxiliar recorrendo a um leitor

de consumo e calculou-se a potência disponível P_D através do produto entre a iluminação disponível I_D e a potência da lâmpada com o equipamento auxiliar, conforme se demonstra na equação (16).

$$n_l = n_L \times n_{l,L} \tag{12}$$

$$P_e = P_{le} - P_l \tag{13}$$

$$P_L = n_{l,L} \times P_{le} \tag{14}$$

$$P_i = n_L \times P_L \tag{15}$$

$$P_D = I_D \times P_{le} \tag{16}$$

De referir que foi efectuado apenas o levantamento da iluminação geral e da localizada, i.e., não foi contabilizada a iluminação de tarefa (candeeiros).

b) Análise comparativa entre o previsto em projecto e o efectivamente instalado

Detectaram-se algumas divergências entre o projecto previsto de iluminação e os sistemas efectivamente instalados. Nomeadamente, existem diferenças em termos de número de luminárias, de tipo e de potência. Nalguns espaços o número de luminárias instaladas é inferior ao projectado, e.g., laboratório de revestimentos finos, sala da microssonda electrónica, etc. Noutros espaços, as luminárias instaladas são de um tipo diferente do indicado no projecto, e.g., na circulação 6, reprografia, etc. Também existem luminárias instaladas, p. ex., no jardim 1 e no estacionamento exterior que não estão indicadas nas plantas de iluminação, ao qual se atribuiu a designação do tipo L1 a L10. Existem espaços que não aparecem nos projectos, provavelmente por terem sido construídos posteriormente (sala da UTA 2, sala SE, sala do compressor 2, escritórios 4 e 5, etc.). No laboratório de tecnologia existem luminárias com potência de projecto inferior à efectivamente instalada, apresentando 58 W em vez de 36 W.

c) Anomalias detectadas

As luminárias exteriores do tipo I6 e M4, instaladas no pátio central e no terraço do bloco de Energia e Ambiente, respectivamente, estão danificadas devido a infiltrações de água. Existem várias luminárias do tipo F11 sem protecção/difusor prismático, que apresentam perigo (em relação ao vidro e vapor de mercúrio no caso de fractura), e.g., o laboratório de tecnologia. O circuito de iluminação da circulação 20 apresenta-se instável, devido a infiltrações no tecto que já danificaram uma luminária do tipo F1.

É recomendado para a iluminação exterior, luminárias com um índice de protecção mínimo, por exemplo com protecções da classe IP 54. Deste modo, seis luminárias do tipo F1 encontram-se desajustadamente instaladas nas escadas exteriores, visto que, possuem um índice de protecção desadequado, da classe IP 44 (protecção contra corpos estranhos granulados e de salpicos de água). Aquando da instalação no seu lugar, deveriam ter sido instaladas luminárias do tipo F3 com protecção da classe IP 65 (protecção contra a penetração de pó e contra jactos de água), conforme se ilustra na Figura 12. Este facto não é muito grave, mas leva a que a lâmpada e o equipamento auxiliar (balastro, arrancador e condensador) possam ter uma vida mais curta do que a indicada pelo fabricante.

(a) (b)

Figura 12. (a) Luminária F1 com protecção classe IP 44. (b) Luminária F3 com protecção classe IP 65.

As luminárias do tipo L7 (Figura 13.a) possuem uma classe de protecção IP 54, a qual é adequada para o espaço em questão – estacionamento exterior – no entanto a base de contacto com o solo encontra-se mal isolada, oxidando o equipamento metálico, pois quando as lâmpadas estão acesas, o aquecimento no interior da luminária origina uma corrente convectiva natural ascendente com a evaporação da água (existente no solo) que sobe até se condensar no interior do bolbo opalino. O resultado da oxidação apresenta-se na Figura 13.b.

(a) (b)

Figura 13. Oxidação da luminária L7, devido a instalação deficiente (má estanquidade na base de contacto).

Detectaram-se alguns circuitos eléctricos mal instalados, i.e., que não correspondem ao que está previsto nos circuitos de iluminação do projecto, nomeadamente nas oficinas, provocando um gasto desnecessário de energia eléctrica. A célula fotoeléctrica que activa o circuito das luminárias do tipo F21, instaladas no pátio central, está programada com um valor de *set-point* acima do recomendado (pois estas acendem ainda no período diurno), devendo ser reprogramada para uma iluminância de 100 lx (nível de iluminação recomendado para as circulações). Esta simples operação irá trazer alguma poupança energética.

O modelo das lâmpadas fluorescentes compactas integradas (FCI) instaladas nos *downlights* das IS e do auditório é desajustado, conduzindo a uma menor eficiência luminosa da luminária. Quando estas lâmpadas terminarem o seu tempo de vida, elas devem ser substituídas por lâmpadas FCI reflectoras (superfície interna espelhada), levando a que menos luz gerada pela lâmpada seja absorvida pela superfície interior negra da luminária.

(a) (b)

Figura 14. (a) Downligt com uma lâmpada FCI desajustada. (b) Lâmpada FCI reflectora, modelo mais indicado para o downlight.

Duas luminárias do tipo F11, indicadas para serem instaladas no interior da *hotte* da cozinha, foram instaladas no tecto em cima desta, produzindo uma iluminação quase obsoleta. Deve-se corrigir a instalação das duas luminárias reinstalando-as no interior da *hotte*, iluminando de forma útil a zona dos equipamentos de cozinha.

A manutenção de sistemas de iluminação de grandes edifícios implica o seguimento de um plano de manutenção (cronograma) que, presentemente, não existe no edifício. O plano de manutenção regista a limpeza periódica das luminárias e a substituição das lâmpadas, que deve ser feita por grupos (em vez de individualmente) no caso dos espaços serem amplos (e.g., salas grandes e oficinas), pois criam níveis de iluminação diferentes. O plano de manutenção também inclui a revisão periódica dos componentes da

instalação eléctrica, o controlo e actualização dos horários de funcionamento do edifício, o controlo dos consumos/custos e o acompanhamento das tarifas de electricidade.

3.2. Medições experimentais

a) Equipamento auxiliar

Para se estimar o consumo do sistema de iluminação do edifício de forma precisa, mediu-se a potência activa das luminárias equipadas com equipamento auxiliar, nomeadamente as luminárias com lâmpadas de descarga (balastro de classe C) e com lâmpadas de halogéneo de 12 V (transformador), i.e., mediu-se a potência de entrada da lâmpada com o equipamento auxiliar. Estes valores apresentam-se na Tabela 5.

A título de teste, algumas luminárias, nomeadamente as que se propõe substituir por outras mais eficientes, foram montadas com equipamentos auxiliares electrónicos para, deste modo, ser possível estimar de modo mais realista a poupança energética que se poderá vir a conseguir. Apresentam-se na Tabela 5 os valores das potências de entrada medidos com um leitor de consumo, em que P_l representa a potência consumida pela lâmpada e P_{le} a consumida pela lâmpada mais o equipamento auxiliar (balastro ou transformador). Pela análise da Tabela 5 constata-se que a substituição do equipamento auxiliar magnético por electrónico leva, em média, a uma poupança no consumo de energia de 24 %.

Tabela 5. Medição do consumo de energia eléctrica do equipamento auxiliar magnético (existente no edifico) e electrónico.

Lâmpada	P_l [W]	Magnético P_{le} [W]	Electrónico P_{le} [W]	Poupança [W]	% economia de energia
Halogéneo de 12V	50	61	44	17	28 %
Fluorescente tubular T8	18	26	-	-	-
	36	45	35	10	22 %
Fluorescente compacta não integrada	13	17	13	4	24 %
	18	23	-	-	-
	26	30	23	7	23 %
Mercúrio a alta pressão	50	58	-	-	-
Iodetos metálicos	70	81	-	-	-

b) Medição da iluminância dos espaços tipo

Estudou-se a absorção de luz efectuada nas luminárias com difusor opalino. Para este efeito, realizou-se a experiência em duas luminárias do tipo F1, tendo ocorrido um aumento de iluminância de cerca de 50 % em ambas, ou seja, o vidro opalino absorve metade do fluxo luminoso emitido pela lâmpada, como se pode constatar na Tabela 6. Com esta experiência concluiu-se que, sempre que possível, se deve atribuir a preferência a luminárias com difusor transparente, visto que para a mesma iluminância recomendada num espaço (neste caso de 100 lx por estarem instaladas numa circulação) a luminária com difusor transparente, em comparação com uma luminária com difusor opalino, permite a instalação de uma luminária com menor potência. O difusor opalino é utilizado para se obter uma luz mais difusa e por uma questão de estética, para esconder o equipamento auxiliar e a cablagem.

Tabela 6. Medição da obstrução/absorção de luz pelo difusor opalino das luminárias do tipo F1.

Nº luminárias	Com vidro opalino [lx]	Sem vidro [lx]	Diferença [lx]	Aumento de iluminância
1	68	103	35	51%
2	66	99	33	50%

c) Limpeza das luminárias

Uma das acções efectuadas na manutenção de sistemas de iluminação consiste na limpeza de luminárias. Esta tarefa visa manter o fluxo luminoso assegurado pelas luminárias, que é depreciado ao longo do tempo devido a poeiras ou sujidade que se depositam sobre as armaduras e lâmpadas. Para esse efeito, efectuou-se a limpeza de todas as luminárias do tipo F5 que equipam a sala 6.3. Trata-se de luminárias com alhetas de acabamento acetinado. No global obteve-se uma melhoria de 6%, medido com um luxímetro antes e depois da limpeza.

Efectuou-se também a limpeza da fiada central das luminárias do tipo F18 (alhetas espelhadas) da sala 3.5. Antes da limpeza mediu-se, através de um luxímetro, a iluminância destas luminárias, obtendo-se o valor médio E_m = 430 lx, que aumentou para E_m = 520 lx após a sua limpeza. Esta tarefa de manutenção resultou numa melhoria da iluminância de 13 %, ao nível do plano de trabalho (mesas).

Onde se obteve o melhor resultado foi no *downlight* das luminárias do tipo F12.2 da circulação 9, devido à sua grande área de reflexão e à película de sujidade/pó que continham, tendo sido alcançado um aumento de iluminância de 23 % conforme se apresenta na Tabela 7. De salientar que o edifício foi construído em 1993 e até à data desta tarefa não houve nenhum registo de limpeza de luminárias.

Tabela 7. Medição da iluminância das luminárias do tipo F12.2, antes e depois da sua limpeza.

Posição do luxímetro	Sem limpeza [lx]	Após limpeza [lx]	Diferença [lx]	Aumento de iluminância
Esquerda	36	42	6	17 %
Centro	37	47	10	27 %
Direita	37	46	9	24 %
			Média	23 %

O que se acabou de apresentar sugere claramente a importância de criar um plano de manutenção e limpeza periódica das luminárias. A limpeza destas deve ser efectuada a cada 18 meses (Reliant Energy, 2011). No entanto, este ciclo de manutenção poderá variar com o tipo de luminária e de ambiente (espaço limpo, normal ou sujo). Segundo a IESNA (*Illuminating Engineering Society of North America*), a frequência com que se efectua a limpeza das luminárias deve aumentar com a diminuição da qualidade do ar interior. Deste modo, caso não seja feita a substituição regular dos filtros de ar e/ou se o nível de impurezas existente no ar exterior for elevado (o qual entra para o interior cada vez que se abrem portas e/ou janelas e pelas frestas) recomenda-se uma limpeza regular e completa das luminárias, mais precisamente das lâmpadas, dos reflectores e dos difusores.

3.3. Consumo de energia pela iluminação actual

Apresenta-se na Figura 15, o consumo global de energia eléctrica do edifício, obtido a partir da consulta das facturas de energia. De realçar que não se trata de consumos estimados, mas sim de consumos reais medidos, pois a EDP efectua regularmente a leitura automática por via electrónica dos contadores de electricidade do DEM.

Tendo em consideração uma muito maior semelhança de horários de funcionamento com o ano de 2011, para efeitos deste trabalho consideram-se como mais adequados os valores de consumo de energia eléctrica relativos ao ano de 2010, os quais se

apresentam na Figura 16. De referir que o DEM não paga energia reactiva em virtude de existir instalado um sistema de correcção da mesma, pelo que o cos φ é sempre superior a 0,96. Deste modo, em 2010 o DEM pagou em média à EDP 0,103 € / kWh de energia eléctrica activa consumida. Analisando os gráficos constata-se uma tendência para o aumento de consumo energético na estação de arrefecimento, possivelmente devido à ligação do *chiller*. De realçar o facto curioso do consumo no mês de Agosto ser dos mais elevados, quando este mês se encontra em período não lectivo.

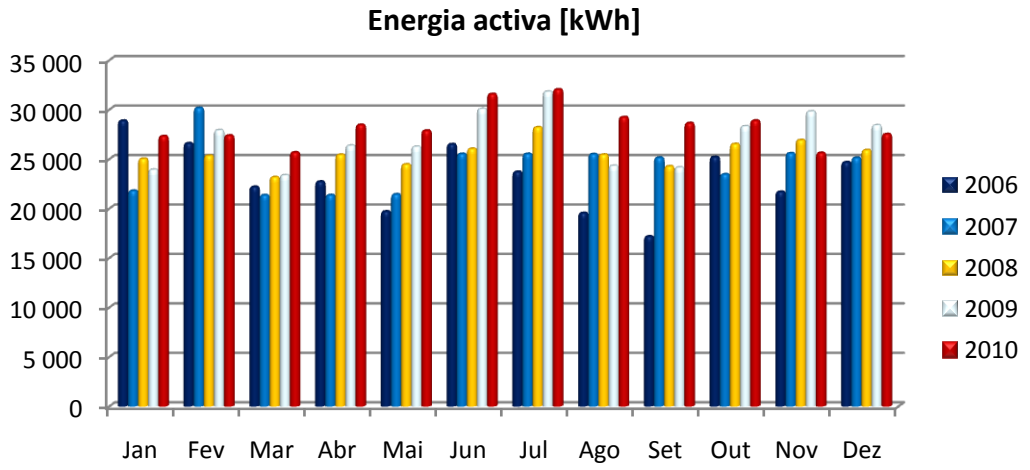


Figura 15. Consumo global de energia activa do edifício.

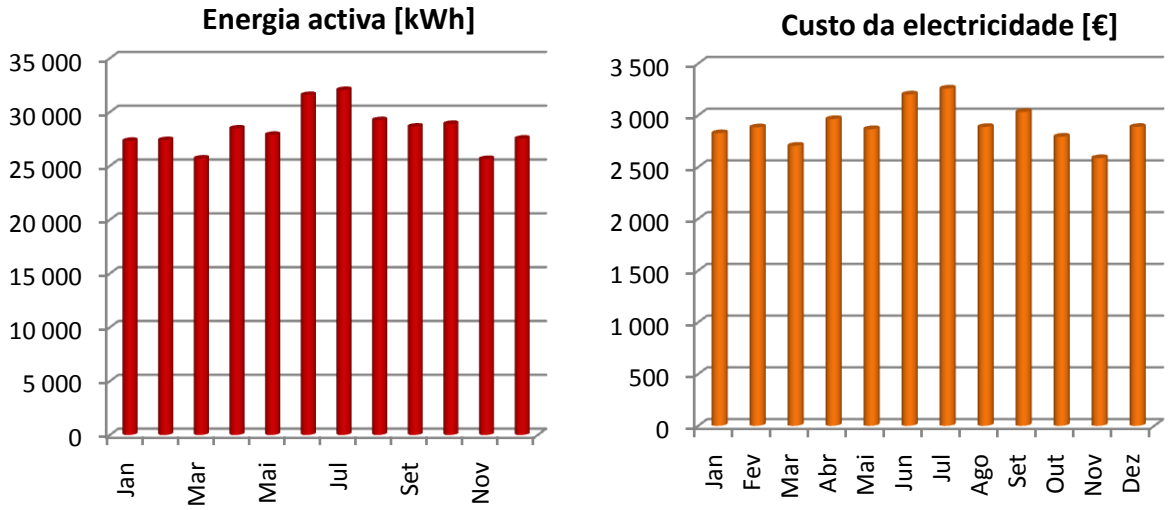


Figura 16. Consumo global de energia activa pelo edifício e respectivo custo no ano de 2010.

O consumo anual de energia eléctrica derivado do sistema actual de iluminação C_i [kWh/ano] foi estimado multiplicando a potência disponível P_D [W] pelo número de horas de utilização anual de cada espaço t_a [h/ano], conforme se apresenta na equação (17).

$$\boldsymbol{C}_i = \boldsymbol{P}_D \times \boldsymbol{t}_a \times 10^{-3} \tag{17}$$

Para determinar o tempo de funcionamento da iluminação do edifício durante o ano de 2010 (período para o qual se está a efectuar a análise energética) recorreu-se a várias abordagens. Determinou-se o perfil de utilização dos gabinetes, secretarias e bar perguntando aos utilizadores desses espaços o tempo de uso. A ocupação das salas de aula foi obtida por consulta dos horários (período lectivo e de avaliação) relativos ao 2º semestre do ano lectivo 2009/2010 e ao 1º semestre do ano lectivo 2010/2011. Para os espaços com iluminação controlada por interruptores horários consultou-se a programação dos mesmos. Para os espaços em que não foi possível obter informação mais fidedigna fez-se uma estimativa levando em conta as sugestões de alguns dos seus utilizadores mais frequentes. Os valores obtidos para cada espaço do edifício, relativos ao ano de 2010, para o tempo de funcionamento das luminárias e para os consumos de energia com a iluminação encontram-se nas tabelas do Anexo C.

No ano de 2010, o DEM-FCTUC teve um consumo total de energia eléctrica de 340 MWh, com o qual suportou um gasto de 34 895 €. Conforme se apresenta na Figura 17, estimou-se um consumo de electricidade com a iluminação do edifício de cerca de 113 MWh, o que corresponde a cerca de 33 % dos gastos de electricidade no edifício. Como resultado, o gasto em 2010 com a iluminação do edifício foi de pelo menos 11 544 €, pois esta estimativa não contabiliza o consumo adicional de electricidade devido ao calor gerado pela iluminação (carga térmica adicional a ser removida pelos chillers e pelas unidades individuais de ar-condicionado que servem alguns dos espaços do edifício).

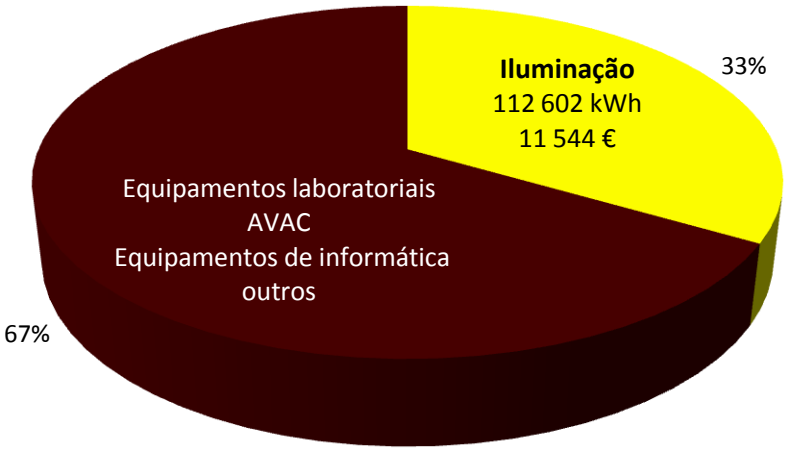


Figura 17. Consumo de energia eléctrica do sistema de iluminação do edifício em 2010.

3.4. Avaliação da qualidade da iluminação actual

Com esta Secção pretende-se avaliar se a iluminação actualmente instalada no edifício é adequada para os fins a que se destina. Para este propósito recorreu-se a um *software* apropriado para o efeito, o programa DIALux que simula o sistema de iluminação para um espaço e apresenta uma interface gráfica do cenário de iluminação.

O DIALux é um programa gratuito, de código fechado, financiado por mais de 90 fabricantes de luminárias, com o objectivo de auxiliar os engenheiros e arquitectos nos projectos de iluminação interior e exterior. Este *software* permite o cálculo dos níveis de iluminação, da densidade de potência, da densidade de potência relativa, da quantidade de luminárias necessárias para garantir a iluminância média requerida e da uniformidade da iluminação, etc.

3.4.1. Parametrização no programa da iluminação dos espaços

Os parâmetros mais influentes analisados pelo DIALux são a geometria do espaço (A e Pd), o coeficiente de reflexão das superfícies (chão, paredes, tecto e mobílias), o factor de depreciação F_d, a distribuição fotométrica das luminárias, a altura do plano de trabalho e a altura de montagem da luminária (embutida/pendular). O valor de F_d está relacionado com a selecção do tipo de ambiente limpo/sujo e do período de manutenção (neste caso seleccionou-se "espaço limpo com manutenção trienal", que corresponde a um $F_d = 0{,}67$).

Como output, o programa calcula o nível de iluminação no plano de trabalho, a uniformidade da luz no espaço (E_{min} / E_m), que por norma não deve ser inferior a 1/3, a densidade relativa, entre outros.

A uniformidade de iluminação é medida pela relação entre a iluminância mínima e a média obtida na área iluminada. Uma boa uniformidade na iluminação é necessária, pois evita sombras acentuadas e assegura conforto visual para a prática da actividade exercida. O espaçamento entre as luminárias e o distanciamento delas em relação às paredes têm uma contribuição directa no resultado da uniformidade da iluminação.

Relativamente à simulação de iluminação natural, o programa tem como inputs a localização dos envidraçados no espaço, as coordenadas geográficas do espaço, a sua orientação, o horário de verão, os factores de obstrução dos envidraçados (e.g., tipo de vidro e tipo de palas) e o índice de claridade (espaço situa-se num local rural ou citadino).

3.4.2. Avaliação da iluminação de alguns espaços tipo

Não sendo viável analisar todos os espaços do edifício, optou-se por analisar apenas os espaços representativos de cada um dos tipos de espaços identificados. No caso de se afigurar provável que num determinado tipo de espaços exista uma grande disparidade da qualidade de iluminação (como por exemplo nas salas de aula) seleccionou-se mais do que um espaço. Na sequência deste processo de selecção, analisam-se apenas os seguintes cinco espaços: (*i*) Sala pequena 3.4; (*ii*) Sala grande 6.3; (*iii*) Anfiteatro I; (*iv*) Gabinete 28; e (*v*) Sala Oeste do laboratório de termodinâmica.

De acordo com a tarefa a realizar e a sua exigência em termos visuais, para os laboratórios é recomendada uma iluminância de 500 lx e para os auditórios e gabinetes de docentes uma iluminância de 300 lx (segundo a norma EN 12464-1:2002). Para as salas de aula é recomendada uma iluminância de 300 a 500 lx, sendo 500 se as aulas forem leccionadas para adultos ou no período nocturno.

_a_) Iluminação da sala pequena 3.4

Escolheu-se como representativa das salas ditas pequenas (salas 3 localizadas na ala Este do piso 3 do edifício) a sala 3.4. Esta sala possui uma área de pavimento de 51,8 m^2, um pé-direito de 3,1 m e um tempo de utilização de 846 h/ano que leva a um consumo anual de electricidade de 609 kWh. Este espaço está equipado com 15 luminárias

no tecto do tipo F5.1 e com 3 luminárias do tipo F6 na parte superior do quadro. Ambos os tipos de luminária abrigam lâmpadas FT8 de 36 W com *IRC* = 80 e *Tc* = 4 000 K (luz branca neutra). As cores do espaço são predominantemente claras, sendo o tecto de cor branca, as paredes de cor branco creme, o chão em painéis de cortiça e as mesas de cor cinzento claro, cuja altura é 74 cm.

***b*) Iluminação da sala grande 6.3**

Escolheu-se como representativa das salas ditas grandes (salas 6 localizadas na ala Este do 4º piso do edifício) a sala 6.3. Esta sala tem uma área de pavimento de 101,7 m^2, um pé-direito de 3,6 m e um tempo de utilização anual de 1 106 horas, que gera um consumo de 1 343 kWh/ano. Neste espaço estão instaladas 27 luminárias no tecto do tipo F5.1 e 4 luminárias do tipo F6 na parte superior do quadro. As cores do espaço são predominantemente claras, sendo o tecto de cor branca, as paredes de cor branco creme, o chão em painéis de cortiça e as mesas de cor cinzento claro.

***c*) Iluminação do anfiteatro I**

Escolheu-se como sala representativa dos auditórios (localizados no 2º e 3º piso do edifício) o anfiteatro I. Este espaço apresenta uma área de pavimento de 78,5 m^2, um pé-direito médio de 4,3 m e um tempo de ocupação anual de 944 h, que leva a um consumo de 1 559 kWh/ano. Este anfiteatro está equipado com 25 luminárias no tecto do tipo I2.2, com 2 luminárias (réguas) na parte superior do quadro do tipo F0_120, e com 14 luminárias nos degraus do tipo I4. As cores do espaço são predominantemente escuras, sendo as paredes forradas com painéis de madeira escura, o tecto de cor branca e o chão com carpete de cor castanho claro.

***d*) Iluminação do gabinete 28**

No edifício existem gabinetes de vários tipos e com diversas configurações. Existe, especialmente, uma grande diferença entre os gabinetes destinados aos serviços administrativos (secretarias, etc.) e os atribuídos aos docentes. Na impossibilidade de apresentar todos os tipos e configurações, descreve-se apenas a avaliação da iluminação actual do gabinete 28 atribuído a um docente. Este espaço tem uma área de pavimento de 16,2 m^2, um pé-direito de 2,9 m e está localizado na ala Sul do piso 1 do edifício (bloco de

Energia e Ambiente). Este gabinete está equipado com 2 luminárias do tipo F4.2 e tem um tempo de utilização de 974 h/ano, levando a um consumo anual de 175 kWh. O tecto é de cor branca, as paredes de cor branco creme, o chão em painéis de cortiça e o tampo da mesa é de madeira clara.

***e*) Iluminação da sala Oeste do laboratório de termodinâmica**

Os laboratórios do edifício estão repartidos por várias salas, as quais nem sempre apresentam as mesmas características geométricas, de mobiliário, de iluminação natural e de sistemas de iluminação artificial. Deste modo, não existe nenhuma sala de laboratório que possa ser assumida como representativa. No entanto, na maioria dos casos, as salas dos laboratórios são espaços muito semelhantes às salas de aula ditas grandes, tanto em geometria como no tipo de luminária, com a excepção da luminária ser em estanque (difusor prismático). Com esse efeito, os resultados dos níveis de iluminação seriam semelhantes aos obtidos nas salas grandes localizadas no 4º piso (também conhecidas por salas 6), com excepção dos laboratórios do bloco de Energia e Ambiente, que possuem um pé-direito elevado e, portanto, um sistema de iluminação artificial diferente (iodetos metálicos). Na impossibilidade de analisar todas as salas dos laboratórios, será analisada apenas a sala Oeste do laboratório de termodinâmica localizada no 1º piso do edifício. Esta sala tem uma área de pavimento de 152,2 m^2, um pé-direito de 6,7 m e é iluminada por 17 luminárias do tipo M3 que consomem 81 W cada. Este espaço apresenta um tempo de utilização de 1 012 h/ano, produzindo um consumo anual de 984 kWh. O tecto é de cor branca, as paredes de cor branco creme e o chão possui painéis de tijoleira vermelha.

3.5. Análise crítica aos sistemas actualmente instalados

Face ao exposto, verifica-se que a iluminação actual do edifício consome mais energia eléctrica do que seria desejável e nem sempre proporciona um nível de iluminação adequado às funções dos espaços. Este excesso de consumo de electricidade deve-se, principalmente, ao facto de a maioria do equipamento ser indutivo (magnético), enquanto a fraca iluminância se deve ao baixo número de luminárias instaladas em cada espaço (inferior ao que o programa DIALux recomenda/calcula) e à inexistência de um cronograma de manutenção, nomeadamente de limpeza das luminárias.

Apresenta-se na Tabela 8 um resumo do consumo e da qualidade do sistema actual de iluminação do edifício. A qualidade da iluminação que consta nesta tabela foi avaliada com recurso a um luxímetro e, nalguns espaços tipo, complementada pela simulação com o programa DIALux. Conforme se pode constatar nesta tabela, existem espaços em que o sistema actual de iluminação é insuficiente, como sejam as salas grandes, auditórios, biblioteca e salas de trabalhos práticos.

Conclui-se, pela análise da Tabela 8, que os sistemas de iluminação instalados no edifício são energeticamente ineficientes e, mesmo assim, a qualidade de iluminação num número significativo de espaços é fraca. Neste sentido, apresentam-se no Capítulo 5 alguns sistemas de iluminação que, a serem instalados, elevam a iluminação dos espaços para os níveis recomendados e, ao mesmo tempo, reduzem substancialmente o consumo de energia eléctrica.

Tabela 8. Resumo da avaliação do sistema actual de iluminação artificial do edifício.

Espaços	**Consumo anual de energia [kWh/ano]**	**Qualidade da iluminação (luxímetro)**	**Qualidade da iluminação (DIALux)**
Salas pequenas	4 636 (4%)	Média	Média
Salas grandes	8 972 (8%)	Fraca	Fraca
Auditórios	3 728 (3%)	Fraca	Fraca
Biblioteca e salas de trabalhos práticos	7 064 (6%)	Fraca	-
Laboratórios	41 882 (37%)	Fraca	Fraca
Gabinetes (docentes)	11 587 (10%)	Média	Média
Gabinetes (secretarias)	8 454 (7%)	Média	-
Circulações	11 375 (10%)	Média	-
Instalações sanitárias	3 292 (3%)	Média	-
Bar	6 692 (6%)	Média	-
Exterior	3 755 (3%)	Fraca	-
Restantes espaços	1 709 (1%)	-	-
Global	**112 602 (100%)**	**-**	**-**

4. PROPOSTAS DE MELHORIA

Apresentam-se e analisam-se neste Capítulo propostas de melhoria do sistema actual de iluminação do edifício. Começa-se com a identificação / sugestão de correcções pontuais. A seguir fazem-se, identificam-se e analisam-se a substituição dos sistemas actuais de iluminação de alguns espaços por outros energeticamente mais eficientes mas que, mesmo assim, garantem iguais ou melhores níveis de luminosidade.

4.1. Correcções a fazer ao sistema actual de iluminação

Conforme se referiu na Secção 3.1.c), o circuito de iluminação das oficinas (piso 2 do edifício) não coincide com o apresentado no projecto, dado que 32 luminárias do tipo F11.1 são comandadas por um disjuntor e as restantes 23 por outro. Como as oficinas são um espaço amplo com várias zonas de trabalho e com boa iluminação natural (grande área de envidraçados) é, na maior parte do tempo, desnecessário que o sistema de iluminação esteja totalmente ligado (P_D = 2 475 W), quando os utilizadores só estão a trabalhar numa zona/máquina. Recomenda-se, portanto, a reformulação do circuito de iluminação das oficinas, apresentando uma sugestão de um novo circuito no Anexo B. Neste circuito, cada fiada de luminárias pode ser ligada de forma separada ou ser activada alternadamente, conduzindo a uma poupança de energia significativa, visto que o consumo anual das oficinas é de cerca de 2,5 MWh. Como o sistema de iluminação das oficinas é composto por fluorescentes tubulares com balastro magnético, deve-se ter em atenção a frequência de rotação das máquinas, de forma a evitar o efeito estroboscópico criado por este tipo de sistema. O efeito estroboscópico sucede quando a frequência da luz artificial iguala a frequência da máquina rotativa (50 Hz), criando a ilusão de que a máquina rotativa está parada, podendo originar graves acidentes (ISLA, 2003). Para evitar que isto ocorra, aquando da alteração do circuito de iluminação, as luminárias próximas umas das outras deverão ser alimentadas por fases diferentes, para que a frequência de alimentação nunca coincida com a frequência da máquina. Outra forma de evitar o efeito estroboscópico,

passa pela instalação de balastros electrónicos, visto que trabalham a frequências muito superiores (25 kHz a 40 kHz).

Recomenda-se para as salas de aula grandes, a divisão do comando das luminárias a cerca de 2/3 do comprimento destas salas, dado que apresentam um comprimento relativamente longo (12,1 m) e nem sempre estão totalmente ocupadas. Deste modo, com a instalação de três comutadores de lustre, tem-se a opção de ligar somente 16 luminárias (as mais próximas do quadro), ao invés das actuais 25 (conforme se pode ver na Figura 21), caso estejam poucos alunos na sala. Com isto poupa-se cerca de 405 W por hora.

Devido ao escasso nível de iluminação na *hotte* do laboratório de termodinâmica, recomenda-se a instalação de quatro luminárias em estanque, cada uma com uma lâmpada fluorescente tubular T5 de 32 W, com um índice de protecção de inflamabilidade igual ou superior a M1 (invólucro não inflamável).

A iluminação do elevador 1, cuja potência instalada é de 152 W (4 x FT8) encontra-se acesa o ano todo durante 24 horas por dia, despendendo um consumo anual exorbitante de 1,3 MWh/ano (137 €/ano). Ora, este grande desperdício de energia eléctrica pode ser minimizado com a instalação de um temporizador (por ser um espaço com ocupação intermitente) o que poupa cerca de 132 €/ano. Para efectuar os cálculos anteriores considerou-se a tarifa do ano de 2010 atribuída pela EDP (de 0,103 €/kWh) e que o sistema de iluminação do elevador 1 está ligado, em média, uma hora por dia durante 313 dias por ano.

4.2. Alternativa 1 – Sistemas de baixo investimento inicial

A alternativa 1 oferece uma proposta menos dispendiosa a nível de investimento. Esta alternativa consiste na substituição do equipamento auxiliar magnético por electrónico, nomeadamente os balastros das lâmpadas fluorescentes e os transformadores das lâmpadas halogéneas de 12 V. Também se propõe, com a implementação de balastros electrónicos, a substituição das lâmpadas fluorescentes por outras mais eficientes, designadamente as fluorescentes tubulares com diâmetro de 26 mm (T8) para 16 mm (T5), conseguindo-se, assim, uma redução no consumo de 45 para 30 W e o aumento da eficiência da luminária (conforme se pode ver na Figura 7), para além dos benefícios ambientais, pois as lâmpadas T5 possuem menos 70% de vapor de mercúrio que as T8. É

também, sugerida a troca das lâmpadas fluorescentes compactas não integradas (FCNI) de dois pinos para quatro, visto que as FCNI de dois pinos não funcionam com balastros electrónicos, dado que o arrancador está integrado na lâmpada (daí estas lâmpadas não irem além da classe B de eficiência energética). Além disso, sugere-se a instalação de detectores de movimento com célula fotoeléctrica integrada nas IS, de interruptores horários nas circulações comandadas por disjuntores e de interruptores crepusculares nas circulações que recebem boa luz natural.

Determinou-se a viabilidade económica desta alternativa para todos os espaços tipo do edifício, porém, seleccionaram-se apenas os espaços com um período de retorno simples (*PR*) igual ou inferior a 8 anos (artigo nº 32 do Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril.), de maneira a não comprometer a viabilidade económica dos espaços que carecem de maior mudança ou despendem mais energia.

Para a implementação destes sistemas, foram pedidas propostas de orçamento a algumas empresas especializadas em iluminação. A empresa que apresentou a proposta de orçamento mais económica foi a Ploran, cujos valores foram de 12 750 € com um período de retorno simples de 4,4 anos (os custos do material apresentam-se no Anexo B). Com a instalação destes sistemas, o edifício passa a ter um consumo anual com a iluminação de 84 517 kWh/ano, correspondendo a um gasto de 8 665 €/ano (poupança de 2 879 €/ano e redução no consumo de 25 %). De seguida, descrevem-se mais detalhadamente as alterações propostas para os espaços tipo do edifício, o respectivo investimento e período de retorno simples (*PR*). O período de retorno simples é uma forma mais conservadora de calcular a viabilidade económica de um investimento, pois não considera as taxas de actualização (como a inflação da tarifa de electricidade ao longo dos anos). Portanto, os valores apresentados no qual o investimento começa a dar lucro podem perfeitamente ser inferiores ao apresentado.

Para efeitos de análise da viabilidade económica, o valor do investimento a efectuar é considerado igual ao custo de aquisição dos materiais com IVA de 23% incluído (taxa actualmente em vigor), acrescido de um gasto em mão-de-obra de 10% deste valor. Estimou-se a poupança de energia eléctrica com a implementação dos sistemas alternativos, utilizando a taxa de electricidade "equivalente" do ano de 2010 (i.e., reunindo as várias tarifas de consumo horário, tais como as horas de vazio, horas de ponta, etc.) atribuída pela EDP de 0,103 €/kWh.

A substituição de balastros magnéticos por electrónicos e das lâmpadas fluorescentes T8 para T5, apresentam para as salas pequenas um investimento de 1 109 € com *PR* = 13,1 anos, para as salas grandes um investimento de 2 008 € com *PR* = 12,5 anos, para as salas de trabalhos práticos um investimento de 266 € com *PR* = 4,0 anos, para os laboratórios um investimento de 5 627 € com PR = 5,7 anos, para os gabinetes de docentes um investimento de 585 € com *PR* = 4,2 anos e para os gabinetes administrativos um investimento de 1 464 € com *PR* = 6,8 anos.

A substituição dos transformadores magnéticos por electrónicos nas lâmpadas de halogéneo de 12 V apresenta para os auditórios um investimento de 367 € com *PR* = 5,6 anos, para a biblioteca um investimento de 120 € com *PR* = 2,2 anos e para o bar um investimento de 75 € com *PR* = 1,4 anos.

As instalações sanitárias (IS) do edifício são, maioritariamente, comandadas por interruptores horários que activam o circuito de iluminação, em média, 10 h/dia. Porém, também existem IS comandadas somente por disjuntores que, por esse motivo, estão ligadas 24 h/dia (e.g., IS no piso 1 do bloco de Energia e Ambiente), originando um gasto excessivo. Para as IS com maior fluxo de ocupação, nomeadamente as seis IS do bloco Central, as duas IS do piso 1 do bloco de Energia e Ambiente e mais duas IS do laboratório de Tecnologia, propõe-se a instalação de detectores de movimento com célula fotoeléctrica integrada. Para as IS com menor fluxo de pessoas (e.g., as duas IS da biblioteca e as quatro IS dos funcionários) sugere-se a instalação de interruptores simples, reduzindo significativamente o tempo de operação do sistema de iluminação para cerca de 1 h/dia. Com o investimento de 550 € nas IS e um período de retorno simples de 1,9 anos, estima-se uma poupança monetária de 286 €/ano.

Para as circulações 18, 19 e 20 (3º e 4º pisos do bloco de produção), a zona SE do bar, a sala ATM e o estacionamento exterior por receberem boa luz natural sugere-se a instalação de interruptores horários com célula fotoeléctrica integrada. Este investimento de 200 € apresenta um *PR* = 0,5 anos. Nas circulações comandadas por disjuntores, mais especificamente as circulações 1 (piso 1 do bloco Central), 15 (piso 1 do bloco de Energia e Ambiente) e 16 (laboratório de construções mecânicas), sugere-se a instalação de interruptores horários, pois apresenta no período laboral uma frequência de circulação regular. Esta medida apresenta um investimento de 120 € com *PR* = 0,7 anos. A instalação de detectores de movimento para estas circulações não aparenta ser o mais indicado, visto

que o comprimento destas é relativamente longo (o que torna necessário a instalação de um maior número de sensores o que encarece esta medida) para além da vida útil das lâmpadas fluorescentes decrescer consideravelmente com o número de acendimentos. Nas restantes circulações, como já estão equipadas com interruptores horários não se propõe nenhuma alteração. Todavia, caso surjam avarias nas circulações exteriores os interruptores horários deverão ser substituídos por crepusculares, economizando ainda mais energia, pois evita que a iluminação se encontre activa desnecessariamente no período diurno e facilita a manutenção do sistema, visto que elimina a actualização manual dos interruptores horários, devido à variação das horas de sol ao longo do ano.

4.3. Alternativa 2 – Sistemas de muito boa eficiência energética

A alternativa 2 consiste na implementação de sistemas de iluminação que originam um grande impacto no consumo de energia, nomeadamente a substituição de luminárias ou fontes de luz artificial existentes no edifício, por dispositivos LED. Contudo, como os sistemas de iluminação do DEM-FCTUC não apresentam longos períodos operacionais (como os hotéis ou hospitais), esta alternativa não se afigura no global economicamente viável, devido ao actual elevado custo dos LEDs.

Para a implementação destes sistemas, foram pedidas propostas de orçamento a algumas empresas especializadas em iluminação. A empresa que apresentou a proposta de orçamento mais económica foi a Ploran, cujos valores foram de 27 644 € com período de retorno simples de 6,4 anos. Com a instalação destes sistemas, o edifício passa a ter um consumo anual com a iluminação de 70 673 kWh/ano o que corresponde a um gasto de 7 246 €/ano (poupança de 4 298 €/ano e redução no consumo de 37 %). De seguida, descrevem-se mais detalhadamente, as alterações propostas para os espaços tipo do edifício, o respectivo investimento e período de retorno simples (*PR*).

Dado que, o investimento de comandos automáticos de circuitos de iluminação nas IS e circulações já trazem uma redução muito significativa no consumo, passando a funcionar menos horas por dia, não se justifica a substituição das lâmpadas existentes por LEDs. Por isso, as alternativas 1 e 2 são as mesmas para estes tipos de espaço.

A substituição das fluorescente tubulares T8 de 36 W por lâmpadas Enersave LED de 20 W para as salas pequenas apresenta um investimento de 2 434 € com *PR* = 20,6 anos, para as salas grandes um investimento de 4 408 € com *PR* = 16,3 anos, para as salas de trabalhos práticos um investimento de 1 010 € com *PR* = 9,1 anos, para os laboratórios um investimento de 12 354 € com *PR* = 7,5 anos, para os gabinetes de docentes um investimento de 1 286 € com *PR* = 5,5 anos e para os gabinetes administrativos um investimento de 3 215 € com *PR* = 9,5 anos.

A substituição nos auditórios das lâmpadas halogéneas de 12 V por LEDs apresenta um investimento de 1 207 € com *PR* = 7,5 anos, na biblioteca um investimento de 394 € com *PR* = 2,2 anos e no bar um investimento de 246 € com *PR* = 1,4 anos.

4.4. Selecção dos sistemas mais recomendados

Os sistemas mais recomendados são os apresentados na alternativa 1 com a excepção da instalação de LEDs de 5 W na biblioteca e bar. As salas de aula pequenas e grandes não se apresentam economicamente viáveis, devido ao seu baixo tempo de operação anual. Apresenta-se na Tabela 9 um resumo da avaliação económica da alternativa de iluminação mais recomendada para cada tipo de espaços. Pelo artigo nº 32 do RSECE, se aquando da certificação energética obrigatória do edifício este não se encontrar regulamentar, é necessária a elaboração de um PRE (plano de racionalização energética). Todas as medidas de eficiência energética, identificadas nesse plano, que tenham um período de retorno igual ou inferior a oito anos são de implementação obrigatória. Como tal, não se apresentam alternativas de sistemas de iluminação com um período de retorno superior a 8 anos.

Como as alternativas 1 e 2 apresentam o mesmo período de retorno para o campo de aplicação das lâmpadas de halogéneo na biblioteca e no bar, sugere-se a 2ª alternativa, dado que esta leva a um retorno económico mais significativo (acréscimo de poupança de 176 € por ano). Para além disto, as lâmpadas LED têm uma vida útil significativamente mais longa que as lâmpadas de halogéneo (25 000 h, ao invés de 2 000 h), o que irá reduzir o custo de manutenção.

Optou-se por não implementar LEDs nos auditórios, apesar do seu enorme impacto energético, visto que a iluminância (que nesse espaço já é fraca) iria piorar. Assim, apresentam-se na Tabela 10 (anfiteatro I) as características luminotécnicas que levaram a esta decisão.

Em detrimento da poupança de energia eléctrica, foram seleccionadas lâmpadas fluorescentes T5 de 34 W, em vez de 32 W, de forma a que o nível de iluminação no plano de trabalho atinja ou se aproxime dos níveis recomendados.

A implementação destes sistemas representa um investimento de 10 039 € com *PR* de 3,5 anos passando o edifício a consumir 84 778 kWh por ano o que leva a uma poupança anual de 2 853 € (redução no consumo de 25 %). Tendo em conta os valores do período de retorno que constam na Tabela 9, constata-se que é altamente recomendável substituir os sistemas actuais de iluminação pelos propostos. São de realçar os baixos

períodos de retorno associados, particularmente no caso das circulações, IS e bar. O investimento para estes espaços é de 1 321 €, levando a uma poupança anual de 1 200 €.

Tabela 9. Sistemas de iluminação mais indicados para espaços relevantes do edifício.

Espaços	Sistema de iluminação actual	Sistema de iluminação recomendado	Custo de aquisição [€]	Poupança anual [€/ano]	Período de retorno [anos]
Salas pequenas	FT8 36 W BM	FT5 34 W BE	1 109	85	13,1
Salas grandes	FT8 36 W BM	FT5 34 W BE	2 008	160	12,5
Auditórios	H 50 W / 12 V TM	H 50 W / 12 V TE	367	65	5,6
Biblioteca e salas de trabalhos práticos	FT8 36 W BM H 12 V TM	FT5 34 W BE LEDs 5 W	660	245	2,7
Laboratórios	FT8 36 W BM	FT5 34 W BE	5 627	988	5,7
Gabinetes (docentes)	FT8 36 W BM	FT5 34 W BE	586	140	4,2
Gabinetes (secretarias)	FT8 36 W BM	FT5 34 W BE	1 464	215	6,8
Circulações	CM	CA	320	573	0,6
Instalações sanitárias	FCI IH	FCI DM	550	288	1,9
Bar	H 12 V TM FCNI CM	LEDs 5 W FCNI CA	451	339	1,3

BE – Balastro electrónico; BM – Balastro magnético; CA – Comando automático; CM – Comando manual; DM – Detector de movimento; FT5 – Lâmpada fluorescente tubular de 5 polegadas; FT8 – Lâmpada fluorescente tubular de 8 polegadas; H – Lâmpada de halogéneo; TE – Transformador electrónico; TM – Transformador magnético

4.5. Avaliação da qualidade da iluminação proposta

Com recurso ao programa DIALux, segue-se a demonstração de que para além da poupança energética relatada na Secção 4.4, o sistema proposto mantém ou melhora a qualidade de iluminação dos espaços tipo anteriormente considerados. Para o efeito, apresentam-se a seguir os resultados obtidos para a potência luminosa ao nível do plano de trabalho para os mesmos espaços considerados aquando da análise da qualidade dos

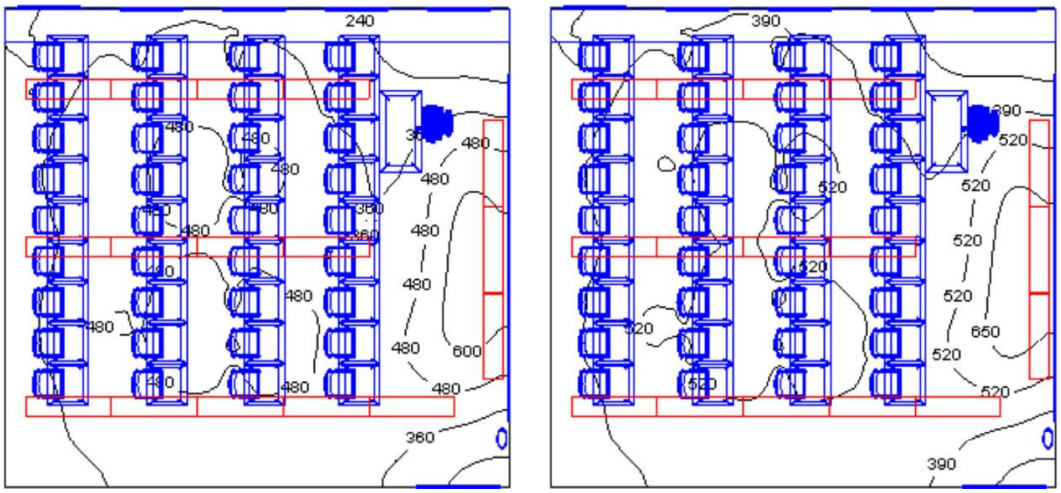
sistemas existentes no edifício (apresentados na Secção 3.4.2). A análise foi efectuada para a situação de iluminação mais exigente, i.e., sem a contribuição da luz natural. Esta via de análise também reduz o erro de simulação, visto que só é efectuado a simulação ao sistema artificial e não a ambos.

***a*) Iluminação da sala pequena 3.4**

Apresenta-se na Figura 18 a simulação do sistema de iluminação artificial existente na sala pequena 3.4, efectuado no programa DIALux.

Figura 18. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente na sala pequena 3.4.

A iluminância que este programa prevê para o nível do plano de trabalho (altura das mesas é de 0,74 m), assegurada pelo sistema de iluminação artificial existente e recomendado é apresentada na Figura 19. Dado que para o sistema actual e para o sistema recomendado (alternativa 1) apenas se efectuou uma mudança de equipamento para um energeticamente mais eficiente, o nível de iluminação mantém-se praticamente o mesmo. A substituição das lâmpadas fluorescentes T8 por T5 leva ao aumento da eficiência luminosa da luminária, conforme se pode verificar na Figura 7.



(a) (b)

Figura 19. Iluminância ao nível do plano de trabalho da sala pequena 3.4, assegurada pelo sistema de iluminação artificial existente (a) e recomendado (b).

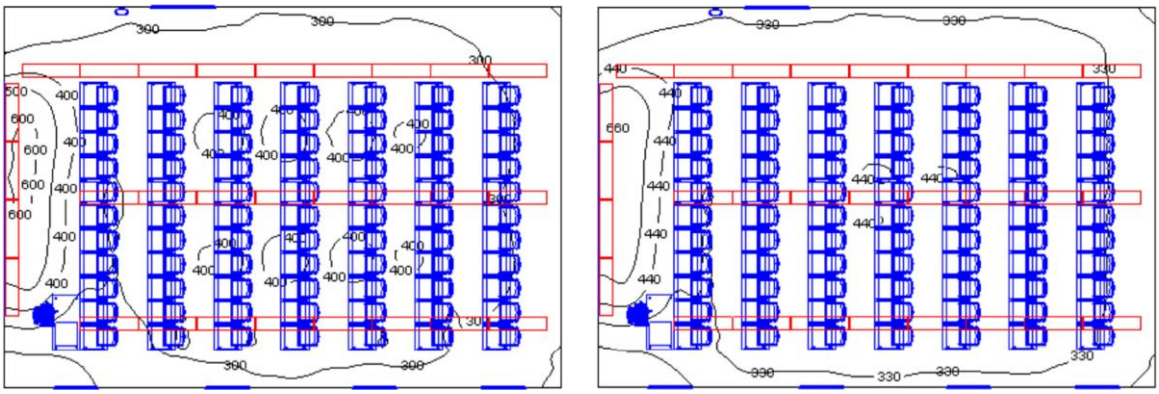
b) Iluminação da sala grande 6.3

Apresenta-se na Figura 20 o sistema de iluminação artificial existente na sala grande 6.3.

Figura 20. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente na sala grande 6.3.

A iluminância que o programa DIALux prevê para o nível do plano de trabalho da sala 6.3 apresenta-se na Figura 21.a para o caso do sistema actual e na Figura 21.b para o caso do sistema recomendado (alternativa 1). Quando comparado o sistema recomendado com o actual, verifica-se que a iluminância melhorou ligeiramente, devido também à redução da distância entre as luminárias do tecto e o plano de trabalho em 0,5 m. Isto deve-se ao facto de a iluminância ser inversamente proporcional ao quadrado da distância,

conforme se constata na equação (3). Como o sistema de iluminação das salas pequenas e grandes é muito semelhante e, visto que ambas apresentam um pé-direito diferente (as salas pequenas têm um p_d de 3,1 m e as salas grandes um p_d de 3,6 m), sugere-se que se iguale a altura das luminárias das salas pequenas nas salas grandes através do aumento da suspensão destas de 0,1 para 0,6 m. Esta medida apresenta por isso, um risco mínimo de encadeamento por reflexão na superfície das mesas, além do software também não prever encadeamento.



(a) (b)

Figura 21. Iluminância ao nível do plano de trabalho da sala grande 6.3, assegurada pelo sistema de iluminação artificial existente (a) e recomendado (b).

c) Iluminação do anfiteatro I

Apresenta-se na Figura 22 o sistema de iluminação artificial existente no anfiteatro I, simulado no programa DIALux.

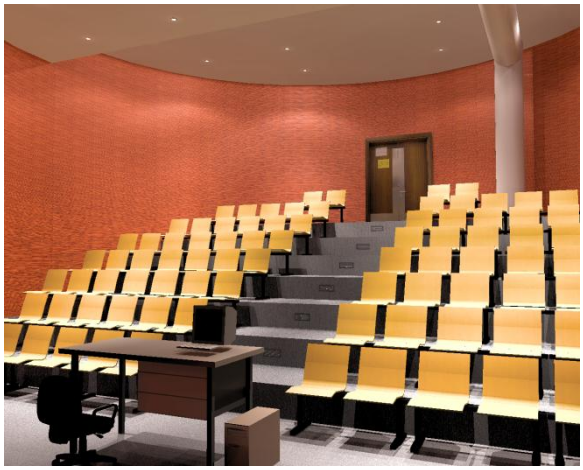
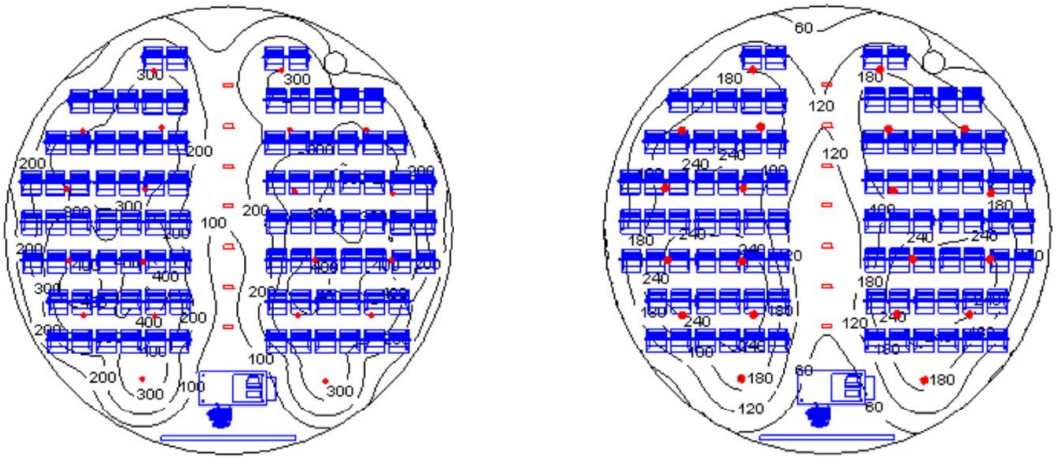


Figura 22. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente no anfiteatro I.

A iluminância que o programa DIALux prevê para o nível do plano de trabalho do anfiteatro I é apresentada na Figura 23, para o caso do sistema actual e para o caso do sistema da alternativa 2 (não recomendado), no qual se constata que esta alternativa diminui a qualidade de iluminação, quer em termos de iluminância média, quer em termos da uniformidade da luz. Não se apresenta o gráfico das isolinhas ou isolux da alternativa recomendada (alternativa 1), visto que esta praticamente não altera a qualidade de iluminação (apenas se substitui o balastro magnético por electrónico).



(a) (b)

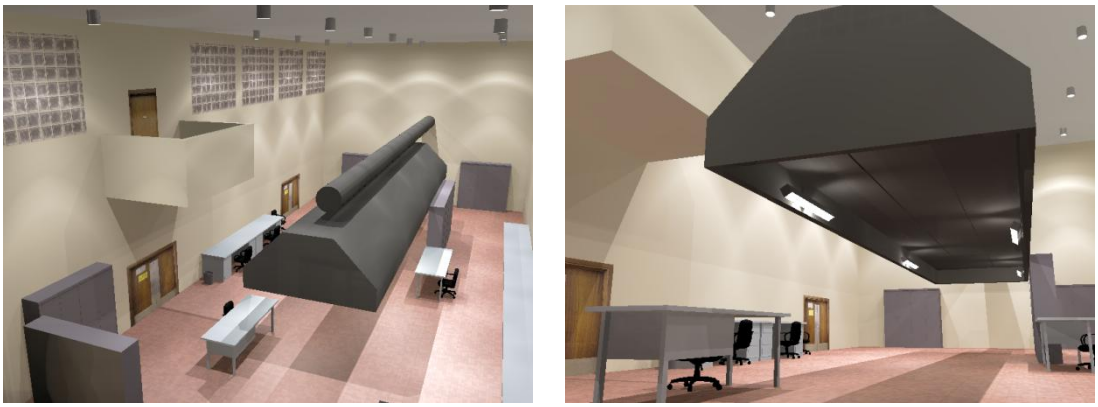
Figura 23. Iluminância ao nível do plano de trabalho médio do anfiteatro I, assegurada pelo sistema de iluminação artificial: (a) Existente; (b) alternativa LED.

d) Iluminação da sala Oeste do laboratório de termodinâmica

Apresenta-se na Figura 24.a a simulação para o caso do sistema de iluminação artificial existente na sala Oeste do laboratório de termodinâmica e na Figura 24.b para o recomendado (onde se destaca as luminárias instaladas na *hotte*).

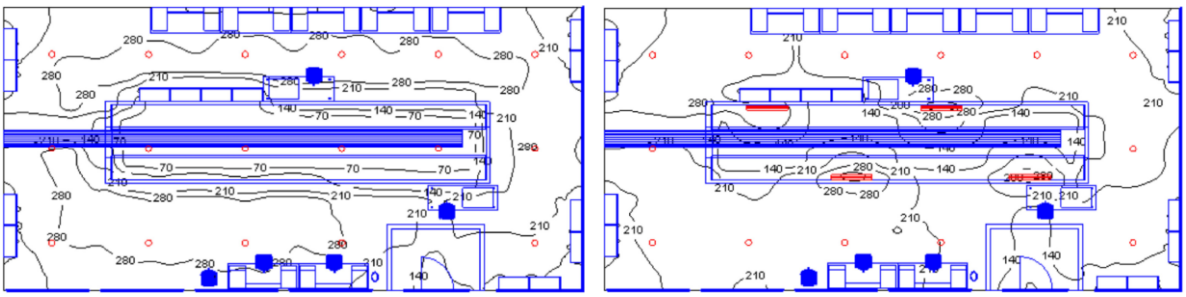
Apresenta-se na Figura 25.b a iluminância que o programa DIALux prevê para o nível do plano de trabalho da sala Oeste do laboratório de termodinâmica, no caso de serem instalados os sistemas recomendados. Quando comparado com o assegurado pelas luminárias actuais (representado na Figura 25.a), verifica-se que a qualidade da iluminação melhorou substancialmente na zona da *hotte* e em redor desta. O sistema recomendado teve como alterações, a desactivação de quatro luminárias de iodetos metálicos (visto que grande parte da luz emitida era obstruída pela superfície superior da *hotte*), compensando

com a instalação de quatro luminárias com lâmpadas fluorescentes tubulares T5 de 32 W (em estanque) no interior da *hotte*, conforme se pode observar na Figura 24.b.



(a) (b)

Figura 24. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial da sala oeste do laboratório de termodinâmica: (a) Existente; (b) Recomendado.



(a) (b)

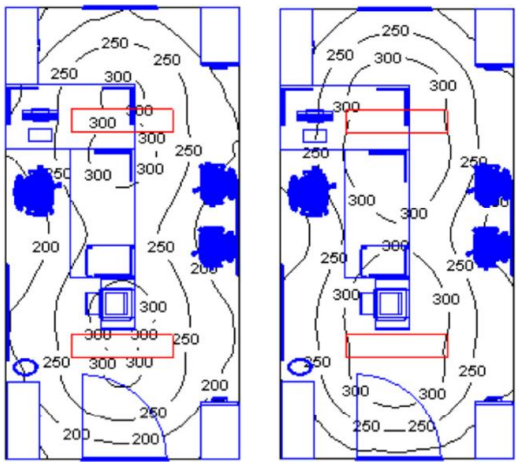
Figura 25. Iluminância ao nível do plano de trabalho da sala oeste do laboratório de termodinâmica, assegurada pelo sistema de iluminação artificial: (a) Existente; (b) Recomendado

e) Iluminação do gabinete de docentes 28

Apresenta-se na Figura 26.a, o sistema de iluminação artificial existente no gabinete de docentes 28, simulado no programa DIALux. A iluminância que o programa prevê para o nível do plano de trabalho do gabinete é apresentada na Figura 26.b.

Dado que, para o sistema actual e para o sistema recomendado (alternativa 1) apenas se efectuou uma mudança de equipamento para um energeticamente mais eficiente, o nível de iluminação no plano de trabalho mantém-se, praticamente, o mesmo.

Figura 26. Simulação, efectuada pelo DIALux, do sistema de iluminação artificial existente no gabinete de docentes 28.



(a) (b)

Figura 27. Iluminância ao nível do plano de trabalho do gabinete de docentes 28, assegurada pelo sistema de iluminação artificial: (a) Existente; (b) Recomendado

Apresentam-se na Tabela 10, as características luminotécnicas em que o nível actual de iluminação foi analisado, com recurso ao *software* DIALux. Nesta tabela, P_t representa a potência total instalada, D a densidade de potência, D_r a densidade de potência relativa, E_m a iluminância média e u_0 a uniformidade da luz no plano de trabalho. A comparação da eficiência energética entre sistemas de iluminação é efectuada com a densidade de potência D e com a densidade de potência relativa D_r

Tabela 10. Características luminotécnicas dos espaços analisados com o *software* DIALux.

Espaço	Sistema de iluminação	P_t [W]	D [W/m^2]	D_r [W/(m^2.100 lx)]	E_m [lx]	u_0
Sala pequena 3.4	Existente	720	13,9	3,4	410	0,29
	Recomendado	480	9,3	2,1	451	0,29
Sala grande 6.3	Existente	1 305	13,0	3,8	342	0,42
	Recomendado	870	8,7	2,2	386	0,37
Anfiteatro I	Existente	1 269	16,2	6,8	239	0,11
	Recomendado	929	11,9	5,0	239	0,11
	Alternativa LED	409	5,2	3,2	179	0,07
Sala Oeste do laboratório de termodinâmica	Existente	1 377	9,0	4,2	212	0,10
	Recomendado	1 165	7,6	3,7	206	0,25
Gabinete 28 (docentes)	Existente	180	11,1	4,6	240	0,46
	Recomendado	120	7,4	2,8	264	0,46

4.6. Incorporação de sistemas de controlo

Independentemente da proposta de melhoria a considerar, é possível reduzir o consumo de energia com a iluminação, recorrendo a sistemas de controlo. Entre estes destaca-se o Sistema DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*), que consiste principalmente na regulação do fluxo luminoso das fontes de luz artificial, consoante as necessidades de luz no instante (iluminação dinâmica). Presentemente é o sistema mais eficiente em termos de racionalização de energia, porque permite a dimerização automática (célula fotoeléctrica) ou manual das fontes de luz artificial, em função do aproveitamento da luz natural, conforme se apresenta na Figura 28.

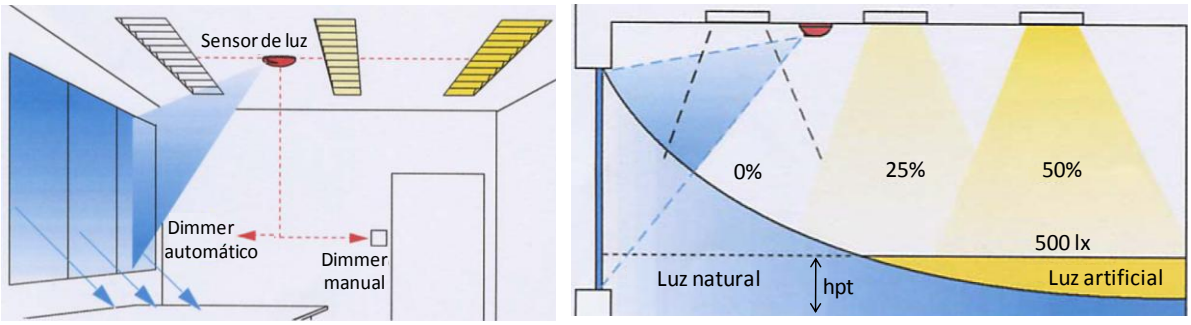


Figura 28. Sistema de iluminação controlado por um sensor de luz. Adaptado de Teixeira (2006).

Os sensores de luz podem ser internos ou externos e têm a função de manter o nível de iluminação pretendido (e.g., 500 lx), quer haja a contribuição de luz natural ou não. Este sistema também permite a memorização de cenários de iluminação (e.g., palestra ou aula prática) e possibilita o controlo da temperatura de cor, de modo a simular a luz solar ao longo do dia, ajustando os ritmos cronobiológicos do Ser Humano e melhorando, desta forma, o rendimento e satisfação dos utilizadores no local de trabalho. Também disponibiliza um controlo automático do circuito de iluminação, através de detectores de presença, levando a que não seja necessária a utilização de interruptores manuais.

Para a implementação deste sistema, foram pedidas propostas de orçamento a algumas empresas especializadas em iluminação. Os valores apresentados foram de 39 468 € para as salas pequenas e de 58 936 € para as salas grandes.

4.7. Medidas futuras de melhoria energética

Portugal usufrui de excelentes condições para o aproveitamento da radiação solar para fins energéticos. Possui, em média, entre 2 200 a 3 000 horas de sol por ano. Além disso, tem dos mais favoráveis índices de transparência ou claridade da atmosfera. Como consequência destes dois factores, Portugal é dos países da União Europeia que mais energia solar recebe em cada ano por metro quadrado de superfície horizontal, em média 4,52 kWh/ano.m^2 em Lisboa (DGEG, 2002).

Visto que o objectivo deste trabalho é avaliar a viabilidade de algumas medidas de eficiência energética do sistema de iluminação do edifício, torna-se pertinente avaliar a eventualidade de realizar um investimento em painéis fotovoltaicos, não só dando resposta às necessidades de electricidade para a iluminação como dos restantes equipamentos. A área que apresenta as melhores condições para a instalação de painéis fotovoltaicos é apresentada no Anexo C.

Para os edifícios novos, existe ainda a alternativa de projectar os edifícios prevendo envidraçados que maximizem a entrada de luz natural, os quais devem também, permitir a entrada de radiação solar (calor) no Inverno e inibir a sua entrada no Verão. Isto é possível seleccionando envidraçados virados a Norte ou equipados com dispositivos de sombreamento adequado (de preferência móveis) e que apresentem coeficientes de transmissão térmica superficial baixos.

5. CONCLUSÕES

Os sistemas de iluminação têm como finalidade iluminar convenientemente os espaços, de forma a garantir a boa produtividade, a saúde e o bem-estar dos ocupantes. Idealmente, devem fazê-lo consumindo o mínimo de energia eléctrica possível.

Da análise dos sistemas de iluminação actualmente instalados no edifício e tendo em consideração os respectivos períodos de funcionamento, conclui-se que:

- O consumo de electricidade com a iluminação é de cerca de 113 MWh, o que corresponde a 33 % dos gastos de electricidade no edifício. Como resultado, o gasto com a iluminação é de cerca de 11 544 €, sem contabilizar com o eventual consumo adicional de electricidade pelos equipamentos de arrefecimento do ar interior, devido ao calor gerado pela iluminação. Para uma caracterização mais completa do consumo de energia no edifício, seria necessária uma auditoria energética completa, que identificasse e quantificasse os restantes consumidores (e.g., os equipamentos laboratoriais, informáticos, de AVAC, etc.). Só com a desagregação de consumos é que se estaria em condições de propor uma correcta gestão energética do edifício. Para além disto, também ajudaria a detectar e a corrigir certas anomalias/perdas energéticas que se verificam actualmente e que não foi possível identificar (p. ex. o que está a fazer com que o mês de Agosto seja um dos meses com maior consumo de electricidade, estando nessa altura o edifício em período não lectivo). Uma auditoria energética completa também permitiria seleccionar ou dar prioridade aos sistemas com mais impacto em termos de gastos energéticos e, logicamente, onde medidas de melhoria de eficiência energética teriam maior potencial de poupança. Aconselha-se, portanto, uma auditoria energética completa ao edifício.

- No global, a qualidade de iluminação é fraca para os espaços que requerem maior destreza visual (e.g., actividades de leitura ou de escrita), como é o caso das salas de aula grandes, laboratórios e biblioteca, visto que não atingem o nível mínimo de iluminância recomendado (500 lx) e a uniformidade da luz apresentar valores inferiores a 1/3. Porém, a temperatura de cor (*Tc*) e o índice de restituição cromática (*IRC*) encontram-se adequados para os diversos espaços tipo do edifício, nomeadamente as salas de aula, cujas lâmpadas têm um *IRC* de 80 e *Tc* de 4 000 K (luz branca neutra) e o bar que possui um *IRC* de 100 e *Tc* de 3 000 K (luz branca quente). As luminárias parabólicas com reflector e alhetas

espelhadas apresentam-se como a melhor solução para as salas de aula e salas de informática, no que concerne ao controlo do encadeamento e às reflexões não pretendidas (especialmente nos ecrãs).

- A iluminação actual do edifício consome mais energia eléctrica do que seria desejável e nem sempre proporciona um nível de iluminação adequado às funções dos espaços. Este excesso de consumo de electricidade deve-se, principalmente, ao facto de a maioria do equipamento ser indutivo (magnético), enquanto a fraca iluminância se deve ao baixo número de luminárias instaladas em cada espaço (inferior ao que o programa DIALux recomenda/calcula) e à inexistência de um plano de manutenção, nomeadamente da limpeza das luminárias. Como tal, deverá ser criado um programa de limpeza periódica das luminárias, efectuada em períodos de 18 meses (consoante o tipo de espaço e de iluminação).

- Os espaços iluminados com lâmpadas fluorescentes tubulares T8 com balastro magnético (e.g., laboratórios e gabinetes) deverão ser substituídos por fluorescentes T5 com balastro electrónico. Os comandos manuais das circulações deverão ser substituídos por interruptores horários e nas circulações que recebam boa luz natural por interruptores crepusculares. Nas instalações sanitárias com maior fluxo de ocupação sugere-se a instalação detectores de movimento com célula fotoeléctrica integrada e nas de menor fluxo interruptores simples. As lâmpadas de halogéneo de 12 V deverão ser substituídas por LEDs, como é o caso da biblioteca e do bar.

- Presentemente, a substituição das lâmpadas convencionais por LEDs ainda é de difícil viabilidade para os edifícios de ensino, cujo horário laboral seja maioritariamente diurno, devido ao seu custo elevado. Contudo, são vantajosos para espaços com longos períodos de operação (como os hotéis ou hospitais), pois possuem elevada eficácia luminosa e vida útil muito longa, para além de serem mais ecológicos (não têm mercúrio e consomem muito pouco – CO_2). Adivinha-se que, com o seu exponencial crescimento tecnológico, a curto-médio prazo seja a fonte de luz artificial mais indicada para praticamente todos os tipos de espaço.

- A implementação de sistemas de controlo (Sistema DALI) nas salas de aula, com o intuito de optimizar o aproveitamento da luz natural, para além de proporcionarem melhor conforto e serem energeticamente mais eficientes, não são economicamente viáveis

para este edifício, pois os equipamentos inerentes a estes sistemas apresentam custos muito elevados.

- A maioria dos espaços possui sistemas de iluminação pouco eficientes, causando perdas de energia significativas. Com a realização de um investimento de 10 039 € para a implementação dos sistemas recomendados, o edifício DEM-FCTUC passará a consumir cerca de 84 778 kWh por ano, levando a uma poupança anual de 2 853 € (redução no consumo de 25 %) e apresentando um período de retorno de 3,5 anos.

- Nas medições experimentais que se efectuaram, concluiu-se que em média, a substituição do equipamento auxiliar magnético por electrónico, leva a uma poupança energética de 24 %, a limpeza das luminárias a um aumento de iluminância de 14 % (sendo maior se os acessórios de controlo de luz forem espelhados) e que os difusores opalinos absorvem cerca de 50 % da luz produzida pela lâmpada.

- A forma como os circuitos de iluminação estão distribuídos pelos espaços também influencia directamente os consumos de energia. Como tal, recomenda-se para os espaços amplos, nomeadamente as salas de aula grandes e as oficinas, que o comando das luminárias seja efectuado por grupos pequenos. Deste modo, permite ter em funcionamento apenas os grupos necessários, reduzindo assim o consumo de energia com a iluminação.

- A eficácia luminosa das fontes de luz artificial, a eficiência luminosa das luminárias e a eficiência do recinto (dando preferência a cores claras, pois aumenta a reflexão) são determinantes na eficiência e qualidade de um sistema de iluminação, conforme se pôde comprovar no *software* DIALux.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Decreto-Lei nº 108/2007 de 12 de Abril. Diário da República. "1.ª série – N.º 72 – 12 de Abril de 2007. Ministério da Economia e da Inovação.

Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril. "Diário da República nº 209/90 – I Série-A N.º 67". Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.

DG Industria, Energía y Minas (2006), "Guía Técnica de Iluminación Eficiente – Sector Residencial y Terciario", Comunidad de Madrid.

DGEG (2002), "Energia Portugal 2001". Ministério da Economia e da Inovação, Direcção Geral de Energia e Geologia, Centro de Estudos em Economia da Energia dos Transportes e do Ambiente.

DGEG (2009), "Certificação Energética e Ar Interior". Direcção-Geral de Energia e Geologia, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior dos Edifícios.

Directiva 2005/32/CE. "Jornal Oficial da União Europeia – L 191/29".

Donsbulbs, 2011. Acedido a 19 de Março de 2011 em: http://www.donsbulbs.com/cgi-bin/r/t.pl

E Source (2005), "Lighting Atlas". Acedido a 25 de Maio de 2011, em: http://www.esource.com/public/products/prosp_atlas.asp.

EDF (2005), "Eclairage intérieur – Guide technique". Acedido em 19 de Fevereiro de 2011, na Académie de Paris: http://www.ac-paris.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2011-02/eclairage_int_guide_technique.pdf.

Electrum Trofa (2011). Acedido em 14 de Maio de 2011, na loja on-line Electrum Trofa: http://www.electrumtrofa.com.

EN 12464-1 (2002), "Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places", European Committee for Standardization.

EN 50102 (1995). "Degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment against external mechanical impacts". European Committee for Electrotechnical Standardization.

EN 60529 (1992). "Degrees of protection provided against the intrusion of solid objects, dust, accidental contact, and water in mechanical casings and with electrical enclosures". European Committee for Electrotechnical Standardization.

EN 60598 (2010). "Luminaires. Particular requirements. Lighting chains". European Committee for Electrotechnical Standardization.

Exporlux (2008), "Informação Técnica". Acedido em 22 de Julho de 2010, no Web site da Exporlux: www.exporlux.pt.

Ganslandt, R., Hofmann, H. (1992), "Handbook of Lighting Design", 1ª ed , ERCO.

IESNA (2000), "The IESNA Lighting Handbook", 9ª ed, IESNA.

ISLA (2003), "Higiene do trabalho – Iluminação no local de trabalho". Acedido a 17 de Setembro de 2010, em: www.prof2000.pt/users/eta/Iluminacao.htm.

Luz, J. (2010), "Luminotécnica". Acedido a 17 de Setembro de 2010, em: www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/Luminotecnica.pdf.

Narukawa, Y., Ichikawa, M., Sanga, D., Sano, M., & Mukai, T. (2010). "White light-emitting diodes with super-high luminous efficacy", Journal of Physics D: Applied Physics, 43(35), 354002 (6 pp).

Navigant Consulting, et al. (2008), "Multi-Year Program Plan FY'09-FY'14 - Solid-State Lighting Research and Development". Acedido em 29 de Abril de 2011, no Web site da U.S Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy: http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/techroadmaps.html.

Osram (2006), "Iluminação: Conceitos e Projetos". Acedido a 22 de Julho de 2010, em: br.osram.info/curso_luminotecnica/ luminotecnico.html,.

Osram (2009). Acedido a 14 de Maio de 2011, em: http://www.osram.com.br/osram_br/Ferramentas_&_Catlogos/_pdf/Arquivos/Ilumina o_Geral/Catalogo_Geral_2009-2010.

Philips (2007), "Guia de Iluminação". Acedido a 22 de Julho de 2010, em: www.luz.philips.com.br/archives/guiade iluminacaoleve.pdf

Philips (2009), "Eficiência Energética na Iluminação – Sector Residencial". Acedido a 22 de Julho de 2010, em: http://www.areanatejo.pt/workshop_iluminacao/pdfs/AREANATejo_WorkshopIluminacaoFev09_PHILIPS_JorgeLourenco_IResidencial.pdf.

Philips (2009). Acedido a 14 de Maio de 2011, em: www.catalogosiluminacao.philips.com.br.

Portaria n.º 54/2008 de 18 de Janeiro. "Diário da República, 1.ª série – N.º 13". Ministério da Economia e da Inovação.

Portaria n.º 63/2008 de 21 de Janeiro. "Diário da República, 1.ª série – N.º 14". Ministérios do Ambiente, do Ordenamento, do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação.

Regulamento (CE) N.º 245/2009 da Comissão de 18 de Março de 2009. "Jornal Oficial da União Europeia – L 76/17".

Reliant Energy (2011), "Lighting: Light Output Declines with Time". Acedido a 13 de Abril de 2011, em: http://www.reliant.com/en_US/Page/Generic/Public/esc_oma_light_output_declines_with_time_bus_gen.jsp.

Teixeira, A. (2006), "Iluminação Interior - O Projecto Luminotécnico". Acedido a 19 de Fevereiro de 2011, no Web site da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia: http://paginas .fe.up.pt/~arminio/proj_lumin_int/projecto_luminotecnico.pdf.

Teixeira, A. (2006.), "Comando de circuitos de iluminação". Acedido a 19 de Fevereiro de 2011, no Web site da Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia: paginas.fe.up.pt/ ~arminio/lumiind/Com_Circ_Ilum.pdf.

U.S. Department of Energy (2008), "LED Basics". Acedido em 29 de Abril de 2011, no Web site da U.S Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy: http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/techroadmaps.html.

Anexo A – CONCEITOS GERAIS DE ILUMINAÇÃO

Neste Anexo, apresentam-se esclarecimentos adicionais sobre os aspectos mais teóricos, como o princípio de funcionamento das fontes de luz artificial, a fotometria e os vários tipos de luminárias.

A.1. Iluminação – fundamentos

A.1.1. Radiação electromagnética e iluminação

Uma fonte de radiação emite ondas electromagnéticas com vários comprimentos de onda. Conforme se pode observar na Figura A.1, o espectro de radiação vai de comprimentos de onda λ muito curtos (frequência elevada) até muito longos (frequência baixa).

A radiação solar ocupa a faixa espectral de 100 a 3000 nm (3 μm), tendo uma máxima densidade espectral em torno dos 550 nm, comprimento de onda que corresponde sensivelmente à luz verde-amarelada. No entanto, a maior parte da radiação emitida pelo sol está compreendida entre comprimentos de onda de 380 a 780 nm, ou seja entre a radiação electromagnética UV (ultravioleta) e IV (infravermelho). A luz (radiação a que o olho humano é sensível) compreende a faixa de radiação electromagnética com comprimento de onda entre 400 e 680 nm, i.e., desde a cor violeta à vermelha, passando pelo azul, verde, amarelo e laranja.

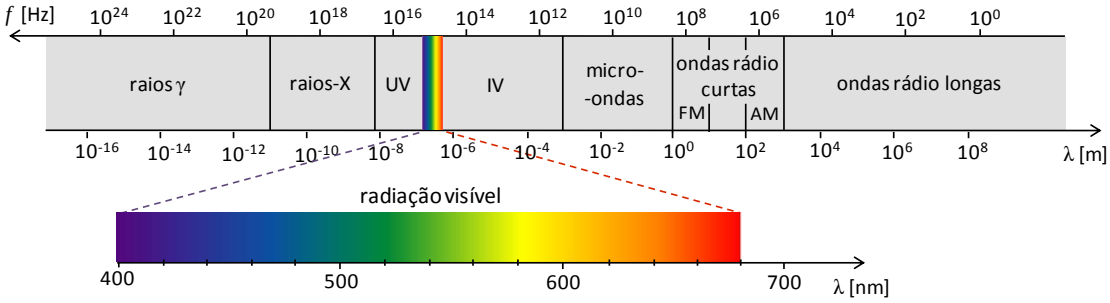


Figura A.1. Espectro da radiação electromagnética.

O contraste de luminâncias entre dois pontos de um campo visual (usualmente representado por *CL*), consiste na diferença de luminância relativa das partes consideradas

(Exporlux, 2008), e.g., a luminância das letras pretas desta folha (objecto que se observa) e a luminância desta folha branca (espaço envolvente).

$$CL = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \tag{A.1}$$

Apresentam-se na Figura A.2 vários índices de reprodução de cor, características das fontes de luz artificial. O índice de restituição cromática (IRC) mede a fiabilidade com que uma fonte de luz artificial reproduz a cor das superfícies iluminadas.

Figura A.2. Escala do índice de restituição cromática (Donsbulbs, 2011).

Na Tabela A.1 apresentam-se os valores recomendados pela norma EN 12464-1 (2002) para o nível do plano de trabalho de certos espaços tipo. E_m significa a iluminância média, R_a (ou IRC) o índice de restituição cromática e *UGR* (*Unified Glare Rating*) indica o valor do desconforto visual, causado pelo brilho excessivo proveniente directamente da luminária.

Tabela A.1. Valores recomendados para os espaços tipo, segundo a norma EN 12464-1:2002.

Tipo de espaço, tarefa ou actividade	E_m **[lx]**	***UGR***	R_a
Arquivos	200	25	80
Biblioteca: estantes	200	19	80
Cantina	200	22	80
Circulações	100	25	80
Cozinha	500	22	80
Escadas e rampas	150	25	80
Gabinetes técnicos	200	25	60
Garagem	75	-	20
Instalações sanitárias	200	25	80
Ler, escrever, salas de informática, laboratórios	500	19	80
Recepção	300	22	80
Salas de aula à noite ou para adultos	500	19	80
Salas de aula de dia, auditórios, gabinetes de docentes	300	19	80
Salas de desenho técnico	750	16	80

Na Tabela A.2 apresentam-se os efeitos psicológicos e visuais que as cores utilizadas nos espaços causam no Ser Humano.

Tabela A.2. Efeitos psicológicos e visuais das cores usadas nos espaços, no Ser Humano. ISLA (2003).

Cores Escuras	• Opressivas • Cansativas • Absorvem luz • Difíceis de manter limpas
Cores Claras	• Frescas • Acolhedoras • Difundem mais luz • Fáceis de manter limpas
Cores Frias	• Aumentam as dimensões do recinto
Cores Quentes	• Diminuem as dimensões do recinto

A.1.2. Tipos de luminárias

As luminárias podem ser classificadas em função do efeito pretendido e das suas características e design óptico. Existem os *downlights* (luminárias de tecto), que emitem luz verticalmente para baixo, luminárias ventiladas que têm a dupla função de arrefecer a luminária e de condicionar o ar do espaço, as *wallwashers* (luminárias de parede) que iluminam para cima e/ou para baixo e podem ser utilizadas como iluminação auxiliar da iluminação de tecto ou para enfatizar secções de parede ou de objectos colocados nesta. As *washlights* são utilizadas para a iluminação difusa de superfícies, que em função da superfície iluminada se denominam de *washlights* de chão ou de tecto. Os projectores (*spotlights*) têm a função de focar a luz para objectos ou áreas específicas, podendo também mudar a direcção da luz. As *uplights* irradiam luz verticalmente para cima e são utilizados para iluminar o tecto ou para iluminação indirecta, sendo, p. ex., instaladas no chão. As *up-downlights* combinam um *downlight* e um *uplight*, i.e., emitem luz verticalmente para cima e para baixo. As luminárias com grelhas/lâminas anti-encadeamento (*Louvred luminaires*) são normalmente utilizadas em espaços grandes, onde se efectuam trabalhos de leitura, de escrita ou de informática.

A.1.3. Factor de depreciação

O factor de depreciação (F_d) do fluxo luminoso deve-se essencialmente à diminuição do fluxo luminoso emitido pelas fontes de luz artificial ao longo da sua vida útil, à acumulação de sujidade ou de poeiras, que se depositam na luminária e à diminuição do poder reflector das paredes e tecto, como consequência do seu escurecimento progressivo. Apresenta-se na Figura A.3 a depreciação do fluxo luminoso de várias fontes de luz artificial.

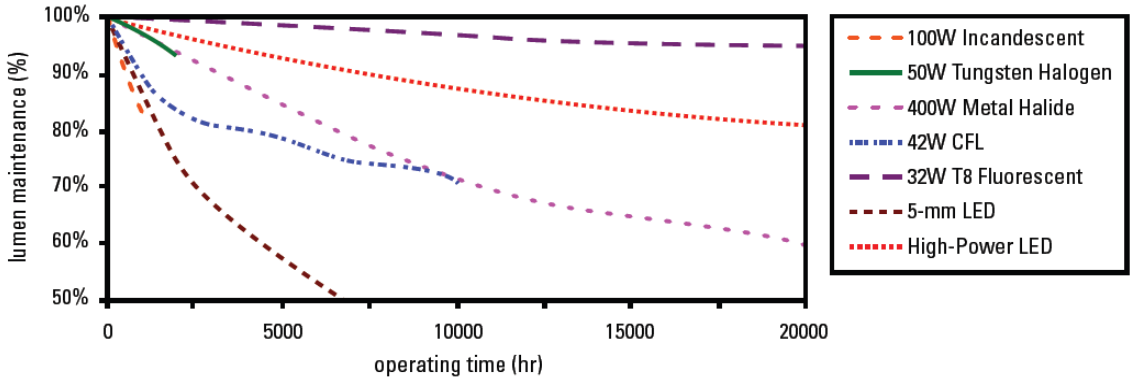


Figura A.3. Depreciação do fluxo luminoso ao longo da vida útil das fontes de luz artificial (U.S. Department of Energy, 2008).

A.1.4. Vida de uma fonte de luz artificial

As lâmpadas de incandescência deixam de funcionar instantaneamente, pelo que mantêm praticamente constante o fluxo luminoso ao longo da sua vida. Por outro lado, as lâmpadas de descarga são alvo de uma depreciação de fluxo luminoso, sendo por isso importante determinar quando estas deixam de ser funcionais. Ciclos de funcionamento mais curtos ou acendimentos mais frequentes encurtam a vida das lâmpadas, especialmente as lâmpadas de descarga, só sendo excepção para os LEDs.

A vida útil de uma lâmpada indica o tempo de funcionamento no qual o fluxo luminoso tenha diminuído para um valor crítico, tal que a fonte de luz não é mais rentável e seja recomendável a sua substituição, tendo em conta o custo da lâmpada, o preço da energia consumida e o custo de manutenção (Osram, 2006).

A vida média de uma lâmpada indica o número de horas de funcionamento na qual a mortalidade de um lote representativo atinge os 50%, em condições *standarizadas* (DG Industria, Energía y Minas, 2006).

Como a tecnologia LED é muito diferente da das outras lâmpadas, i.e., os LEDs normalmente não fundem, simplesmente vão diminuindo o seu fluxo luminoso ao longo do tempo, os testes efectuados para os LEDs são diferentes. A vida útil de um LED consiste no número de horas em operação até emitir 70% do seu fluxo luminoso inicial (U.S. Department of Energy, 2008).

A.2. Tipos de lâmpadas

A.2.1. Lâmpadas de incandescência

As lâmpadas de incandescência produzem luz através da passagem de corrente eléctrica por um filamento com grande resistência, aquecendo-o por efeito de Joule ($Q \propto i^2$) até atingir a incandescência. Por esse motivo são denominados de radiadores térmicos, i.e., mais de 90 % da radiação que emitem é IV e cerca de 8 % é radiação visível. Deste modo, são mais eficientes a aquecer um espaço do que a iluminá-lo, tendo por isso, como maior desvantagem a sua muito baixa eficácia luminosa e duração curta (cerca de 1 000 horas). Estas lâmpadas são constituídas por um filamento singular ou duplo (que aumenta o fluxo luminoso), geralmente de tungsténio por possuir um elevado ponto de fusão (3 653 K) e uma baixa taxa de evaporação. O filamento encontra-se alojado no interior de um bolbo de vidro, sob vácuo ou preenchido com um gás inerte (árgon ou krypton). O gás inerte, para além de evitar a oxidação do filamento, tem a função de isolante térmico, aumentando a temperatura do filamento. Este facto, leva ao aumento da eficácia luminosa e diminuição da taxa de evaporação do filamento, resultando no aumento da duração da lâmpada.

***a*) Lâmpada incandescente**

Durante o funcionamento da lâmpada incandescente, os átomos de tungsténio do filamento evaporam e condensam-se posteriormente na superfície interna do bolbo. Isto obriga a que a área do bolbo de vidro seja suficientemente grande para impedir o seu rápido enegrecimento, que provoca uma depreciação de fluxo até 15 %. Na Figura A.4,

apresenta-se os vários componentes da lâmpada incandescente, podendo a sua base ser roscada (*Edison screw*) ou de baioneta. O tubo exaustor é por onde se insere o gás ou se faz o vácuo antes de ser selado e a haste serve de apoio aos suportes do filamento.

Figura A.4. Componentes de uma lâmpada incandescente.

***b*) Lâmpada de halogéneo**

É uma lâmpada incandescente com a adição de halogéneos[1] ao gás inerte, permitindo que a evaporação do tungsténio volte para o filamento (ciclo regenerativo do halogéneo), o que evita o enegrecimento do bolbo e aumenta a vida da lâmpada. O tungsténio evaporado combina com o halogéneo, produzindo iodetos metálicos que transportam os átomos de tungsténio de volta para o filamento (reacção cíclica do halogéneo). Para que ocorra a reacção cíclica, a temperatura do bolbo tem de ser superior a 250°C, temperatura no qual os iodetos metálicos estão no estado gasoso. Esta condição é conseguida com a diminuição do tamanho do bolbo de vidro de quartzo que não só resulta no aumento da temperatura no seu interior como também aumenta a pressão do gás, reduzindo a taxa de evaporação do tungsténio.

Algumas lâmpadas de halogéneo estão envoltas de um material dicróico (Figura A.5.b), também chamado de *hot mirror* por transmitir ou deixar passar a radiação visível, mas reflectir grande parte dos infravermelhos, guiando-os de volta para o filamento e

[1] Elementos electronegativos (grupo VII da tabela periódica) que reagem com os metais, formando sais.

aquecendo-o ainda mais. Desta forma, aumenta a eficácia luminosa e diminui cerca de 40 % a carga térmica dirigida às pessoas e objectos iluminados.

Na Figura A.5 apresentam-se os tipos de lâmpadas de halogéneo utilizadas no edifício.

(a) (b) © (d)

Figura A.5. (a) Cápsula. (b) Dicróica. (c) Linear. (d) Reflectora. Electrum Trofa (2011).

A.2.2. Lâmpadas de descarga

As lâmpadas de descarga produzem luz através da excitação[2] de vapores metálicos. O seu princípio de funcionamento consiste na aplicação de uma diferença de potencial entre dois eléctrodos, alojados em ambas as extremidades interiores de um tubo de descarga, preenchido com uma mistura de gás inerte com vapor metálico. Esta descarga eléctrica induz um fluxo de electrões (arco eléctrico), que ao percorrerem o interior do tubo chocam com os átomos do vapor metálico, que por sua vez excitam os electrões dos átomos do vapor metálico, que passam para níveis de energia mais afastados (camada de valência) e quando retornam para a órbita de energia mínima ou estável libertam fotões UV e de luz. É, por isso, aplicado um revestimento fluorescente no interior do tubo de descarga para converter a radiação UV em radiação visível (filtro UV).

As lâmpadas de descarga podem ser divididas em função da pressão do gás por dois grupos: descarga a baixa pressão (1 bar <) e a alta pressão (> 1 bar). As de alta pressão possuem maior poder luminoso por volume, visto que nos tubos com o gás a baixa pressão mais dificilmente ocorrem interacções entre a corrente eléctrica (fluxo de electrões) e as moléculas do gás. Como resultado, as lâmpadas de descarga a baixa pressão produzem linhas espectrais, ao invés das de alta pressão que produzem faixas espectrais largas, propiciando um *IRC* mais elevado. As lâmpadas de descarga a alta presssão também

[2] Migração de electrões para órbitas ou níveis de energia mais afastados do núcleo do átomo que, quando retornam, libertam energia radiante (fotões).

podem ser denominadas de lâmpadas de descarga de alta intensidade luminosa (*high intensity discharge*, *HID*). Estas lâmpadas têm a particularidade de necessitarem de um equipamento auxiliar, visto que é fundamental existir um fluxo de electrões suficiente no tubo de descarga para que o gás seja excitado. Como o gás não está ionizado antes do seu acendimento é preciso um equipamento que disponibilize electrões para esse efeito, designado de arrancador (ou *starter*) para lâmpadas de descarga a baixa pressão e de *ignitor* para alta pressão. Uma vez acendida, ocorre uma "avalanche" de ionizações dos gases excitados que originam um aumento contínuo do fluxo de electrões, acabando por destruir a lâmpada. Para prevenir que isto aconteça, é utilizado um equipamento auxiliar designado de balastro, que controla a corrente eléctrica. Geralmente, também é adicionado um condensador com o intuito de aumentar o factor de potência (FP), pois como o balastro magnético é um componente indutivo, é adicionado um componente capacitivo (condensador) para compensar o desfasamento entre a corrente e a tensão alternada. Os balastros electrónicos, em comparação com os magnéticos, melhoram o rendimento das lâmpadas convertendo a frequência de 50 Hz em alta frequência, geralmente entre 25 kHz a 40 kHz. A utilização de balastros electrónicos tem como vantagens o aumento do rendimento luminoso (10 %), a eliminação do efeito cintilante (*flicker*) e do ruído audível, a redução da potência e do calor gerado, ao aumento da duração da lâmpada e diminuição de peso e tamanho, possibilitando o controlo do fluxo luminoso se o balastro electrónico for de classe A1.

No âmbito do protocolo de Quioto, foi lançada a Directiva Europeia 2005/55/CE classificando os balastros em função de um índice de eficiência energética (IEE) e proibindo a comercialização de balastros das classes C e D. A título de exemplo apresenta-se na Tabela A.3 o caso de uma lâmpada fluorescente T8 de 36 W.

As fontes de luz artificial que utilizam equipamento auxiliar são as lâmpadas de halogéneo de 12 V (transformador), as lâmpadas de descarga (balastro) e os LEDs (*driver*).

Tabela A.3. Consumo de uma lâmpada fluorescente T8 de 36 W para as várias classes de balastro. EDF (2005).

Classe do balastro	P_{le} [W]
A1 - electrónico regulável	≤ 19/38 (25 %-100 %)
A2 - electrónico com perdas reduzidas	≤ 36
A3 – electrónico	≤ 38
B1 - magnético de perdas muito baixas	≤ 41
B2 - magnético de perdas baixas	≤ 43
C - magnético com perdas moderadas	≤ 45
D - magnético com perdas muito altas	> 45

Como exemplo, apresenta-se na Figura A.6 o equipamento auxiliar de uma lâmpada fluorescente compacta não integrada (FCNI) de 26 W com base de dois pinos.

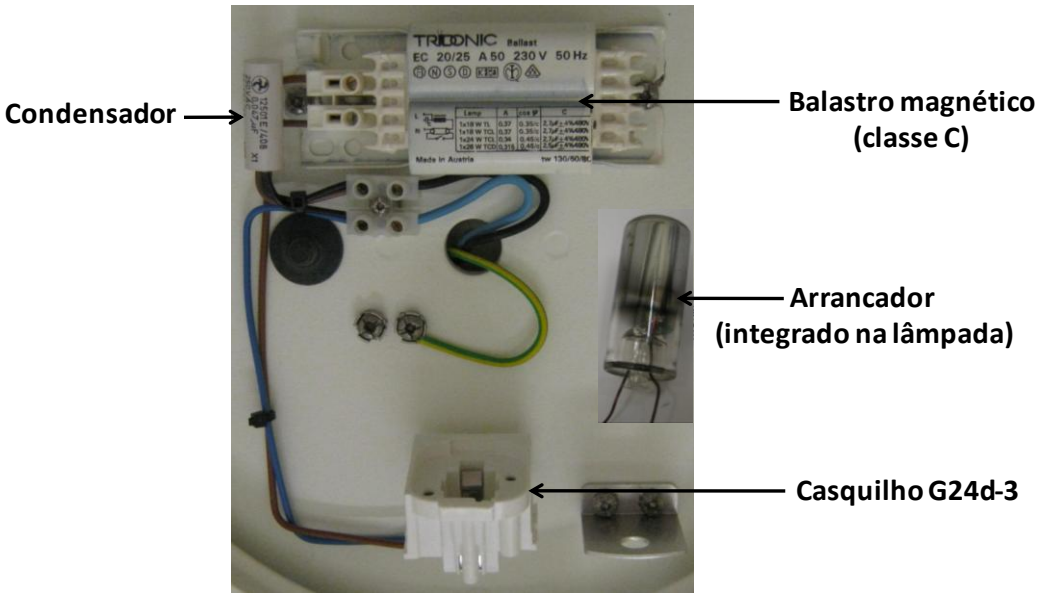


Figura A.6. Equipamento auxiliar de uma lâmpada FCNI com base de dois pinos (26 W).

a) Lâmpada de mercúrio a baixa pressão ou lâmpada fluorescente

A lâmpada fluorescente é uma lâmpada de descarga que contém uma mistura de gás inerte com uma pequena quantidade de vapor de mercúrio a baixa pressão. Neste grupo insere-se a lâmpada fluorescente tubular (FT), que é constituída por um tubo de descarga comprido com um eléctrodo em cada extremidade. O interior do tubo é revestido por uma substância fluorescente que transforma a radiação UV, produzida pela excitação dos átomos de vapor de mercúrio, em radiação visível por meio da fluorescência (E Source,

2005). Conforme se apresenta na Figura A.7, quando os electrões (2) saem do eléctrodo (1) e colidem com os átomos de mercúrio (3), estes são excitados (4), produzindo radiação UV (5) que é transformada em radiação visível (7) pelo revestimento fluorescente (6).

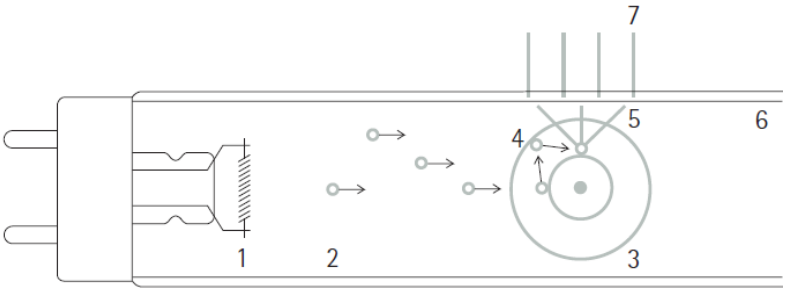


Figura A.7. Princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente (Ganslandt e Hofmann, 1992).

As fluorescentes têm uma eficácia luminosa alta e uma vida útil longa, em comparação com as incandescentes. Estas lâmpadas também são utilizadas para fins especiais, e.g., lâmpadas ultravioleta (desbacterização), lâmpadas negras, lâmpadas coloridas e iluminação de alimentos.

Também existem no mercado fluorescentes tubulares de alta tensão que, contrariamente às de baixa tensão, não é necessário pré-aquecer os eléctrodos, visto que estes são alimentados por uma tensão eléctrica elevada (até 1 000 V). Estas lâmpadas apresentam uma baixa eficácia luminosa, mas por disponibilizarem uma variedade de cores são utilizadas em painéis publicitários, variando a cor produzida conforme a combinação do gás utilizado, e.g., azul usando árgon ou vermelho usando néon.

A lâmpada fluorescente compacta (FC) tem um princípio de funcionamento análogo ao da FT, com a diferença de ter uma forma mais compacta, através de um tubo de descarga em forma de U ou em forma de espiral (Figura A.8), tendo por essa razão uma menor eficiência luminosa, relativamente às tubulares. As FC subdividem-se em função do equipamento auxiliar ser incorporado ou não, designando-se por lâmpada fluorescente compacta integrada (FCI) ou não integrada (FCNI), respectivamente. As FCNI podem ser dimerizadas se possuírem uma base de 4 pinos e um balastro electrónico, enquanto as FCI não são dimerizáveis.

(a) (b) (c) (d)

Figura A.8. Lâmpada fluorescente: (a) Tubular. (b) Compacta não integrada. Compacta integrada com tubos de descarga em forma de: (c) U. (d) Espiral.

b) Lâmpada de vapor de mercúrio a alta pressão

Estas lâmpadas possuem um pequeno tubo de descarga de vidro de quartzo, que contém uma mistura de gás com vapor de mercúrio. Também possuem um eléctrodo adicional que auxilia a ignição da lâmpada, não necessitando por isso de um *ignitor*. O tubo de descarga está envolto de um bolbo de vidro de forma a estabilizar a temperatura da lâmpada e a protegê-lo da corrosão. A luz produzida é um branco azulado, devido ao vazio na faixa espectral do vermelho, podendo atingir o *neutral white* ou até o *warm white* através do revestimento fluorescente. Necessitam de um tempo de arrefecimento para serem reacendidas e levam alguns minutos para atingirem a sua luz máxima. A sua eficácia luminosa e duração de vida não é muito boa, contudo são usadas na iluminação exterior e arquitectural por terem casquilho roscado E27.

***c*) Lâmpadas de iodetos metálicos**

São lâmpadas de mercúrio de descarga a alta pressão contendo uma mistura de iodetos metálicos. Ao contrário dos metais puros, os elementos de halogéneo têm a vantagem de ter um ponto de fusão consideravelmente mais baixo. Com a adição de iodetos metálicos, a eficácia luminosa e o *IRC* é melhorada. A combinação de metais permite a criação de um espectro praticamente contínuo, baseado em inúmeras linhas espectrais, não sendo por isso necessária a adição de um revestimento fluorescente para a melhoria do *IRC*. Têm uma excelente eficácia luminosa, um bom *IRC* e vida longa. No entanto, o *IRC* e a *Tc* variam com a idade da lâmpada e com as condições do ambiente. Exigem um tempo de arranque (tempo que a lâmpada demora a atingir o rendimento máximo) e de arrefecimento antes de serem reacendidas. O reacendimento instantâneo é

possível para algumas lâmpadas de extremidade dupla com balastro electrónico. Não podem ser dimerizáveis e estão disponíveis nas temperaturas de cor *warm white*, *neutral white* e *cool white* e com base de extremidade simples ou dupla e elíptica roscada.

_d_) Lâmpadas de sódio de baixa pressão

O seu nível construtivo e de operação é semelhante ao da lâmpada fluorescente (mercúrio a baixa pressão), tendo como principal diferença o vapor metálico utilizado, o vapor de sódio. As lâmpadas de sódio são mais difíceis de acender/ionizar do que as de mercúrio, visto que o sódio se apresenta no estado sólido à temperatura ambiente (ao invés do estado líquido do mercúrio), necessitando que o sódio se misture com um gás inerte. Somente quando o gás inerte produz calor suficiente é que o sódio começa a evaporar, permitindo a formação de vapor metálico. Esta lâmpada requer uma tensão de ignição elevada, superior à da rede. Para garantir uma elevada temperatura de operação, o tubo de descarga é usualmente encasulado por uma ampola de vidro, desenhada para reflectir a radiação infravermelha. Outra diferença é que as lâmpadas de vapor de sódio produzem luz directamente, enquanto as de vapor de mercúrio produzem, maioritariamente, radiação UV convertida em luz através de um material fluorescente.

_e_) Lâmpada de sódio a alta pressão

Semelhante às lâmpadas de mercúrio a alta pressão (comparáveis a nível construtivo e de funcionamento), o aumento da pressão produz um espectro mais contínuo e extenso, melhorando o *IRC*, em comparação com a luz amarela monocromática produzida pela lâmpada de sódio de baixa pressão com muito baixo *IRC*. Produz uma cor amarela até *warm white*. A eficácia luminosa não é tão elevada como a de sódio de baixa pressão, mas continua a ser maior que todas as outras lâmpadas de descarga. Apresentam uma vida longa e um *IRC* bom, distintamente melhor que as de baixa pressão.

As lâmpadas que funcionam a temperaturas elevadas necessitam de um bolbo de vidro de quartzo, por este material possuir uma grande estabilidade química a altas temperaturas (anti-corrosivo), um coeficiente de expansão térmica muito pequeno, proporcionando uma grande estabilidade térmica a mudanças drásticas de temperatura e elevada transmissibilidade à radiação visível (93%). Devido ao quartzo ser um material muito absorvente, não se deve tocar directamente nas lâmpadas que tenham bolbo de

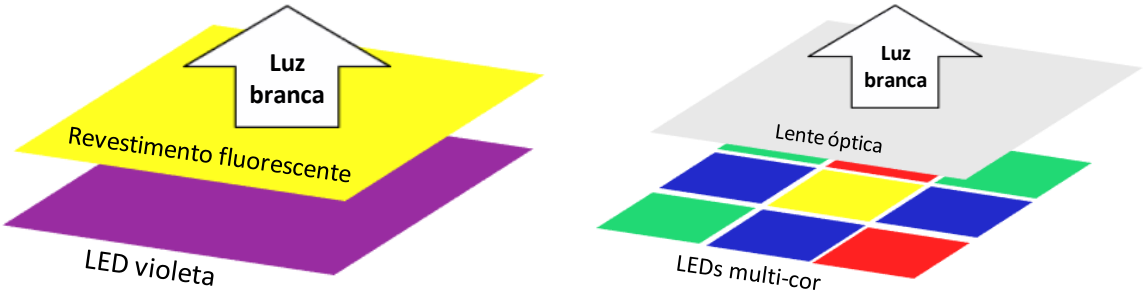
quartzo para evitar engordurá-lo (diminui a transmissibilidade da luz). Em caso de toque deve ser limpo com álcool. Apresentam-se na Figura A.9 alguns exemplos de lâmpadas de descarga a alta pressão (ou lâmpadas de alta intensidade) disponíveis no mercado.

(a) (b) (c) (d)

Figura A.9. Lâmpadas de descarga: (a) Mercúrio a alta pressão. (b) Iodetos metálicos. (c) Sódio a baixa pressão. (d) Sódio a alta pressão.

A.2.3. Diodos emissores de luz – LEDs

O LED (*light-emitting diode*) ou diodo emissor de luz é um dispositivo semi-condutor discreto com uma emissão de banda estreita. O seu princípio de funcionamento baseia-se na composição de dois materiais semi-condutores (P-N), um positivamente carregado e outro negativamente carregado, separados por uma junção que funciona de barreira ao fluxo de electrões entre as camadas internas das regiões semi-condutoras e que ao ser aplicada uma tensão eléctrica emitem luz. Um dispositivo de LEDs produz luz branca de duas formas, sistema PC (*phospor conversion*) ou sistema RGB (*red-green-blue*). O sistema PC consiste num LED que emite radiação azul ou próxima dos UV, que ao atravessar uma lente revestida por um material fluorescente, usualmente de cor amarela, emite luz branca, enquanto o sistema RGB consiste na combinação de LEDs com feixes de luz monocromáticos que se misturam ao passar numa lente óptica, produzindo luz branca, conforme se demonstra na Figura A.10.



(a) (b)

Figura A.10. Sistema de reprodução de luz branca por um dispositivo de LEDs. (a) Sistema PC. (b) Sistema RGB. Figuras adaptadas de Navigant Consulting, et al. (2008).

O sistema PC é o mais utilizado por apresentar maior eficácia luminosa, menor custo e produzir um maior fluxo luminoso, comparativamente ao sistema RGB.

Como fonte de luz artificial, os dispositivos de LEDs englobam várias configurações onde se destacam, com driver incluído, as lâmpadas LED (Figura A.12.a) e, sem driver incluído, os módulos LED (Figura A.12.d). No entanto, é usual referir simplesmente de "LEDs", todas as configurações existentes.

Analogamente às lâmpadas de descarga, os LEDs também necessitam de um equipamento auxiliar designado de *driver*, que tem a função de converter a energia eléctrica da rede para a tensão (tipicamente entre 2 V a 4 V) e corrente (200 a 1 000 mA) adequadas para o tipo de LED. Pode também fazer o *dimming* e detectar e corrigir mudanças de cor ou de intensidade luminosa, que ocorrem ao longo da vida do LED ou devido a variações de temperatura. A grande limitação do LED deve-se à sua grande sensibilidade à temperatura, particularmente na sua vida e fluxo luminoso, que decrescem fortemente com a temperatura. Por este facto, os LEDs necessitam de estar ligados a dissipadores de calor (*heat sink*) e/ou ventiladores.

Ao contrário das lâmpadas, cuja tecnologia já se encontra muito maturada, prevê-se para os LEDs uma evolução muito rápida a curto-médio prazo, com substanciais melhorias a nível da eficácia luminosa (Figura A.11), do *IRC*, do custo e da gestão de calor.

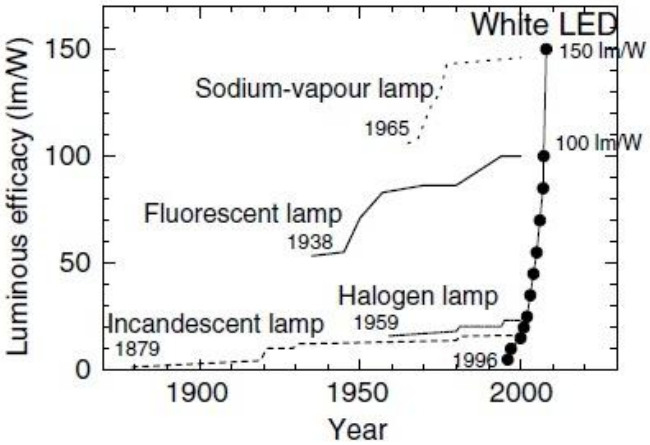


Figura A.11. Evolução da eficácia luminosa η_W das fontes de luz artificial (Yukio Narukawa et al., 2010).

A vida dos LEDs não é afectada pelos curtos ciclos de operação. Um bom sistema de LEDs e uma luminária com bom design é imperativo na eficiência dos mesmos, isto devido à dissipação de calor (emitindo até 15 % menos luz). Na Figura A.12 apresentam-se as soluções LED disponíveis no mercado, para as lâmpadas de base roscada (*a*), halogéneo de 12 V (*b*), FT (*c*) e FT de iluminação indirecta como em sancas ou no interior de móveis (*d*).

(a) (b) (c) (d)

Figura A.12. Soluções LED existentes no mercado para a substituição de lâmpadas: (a) Lâmpadas de incandescência ou fluorescentes compactas integradas. (b) Halogéneo de 12 V. (c) e (d) Fluorescente tubular.

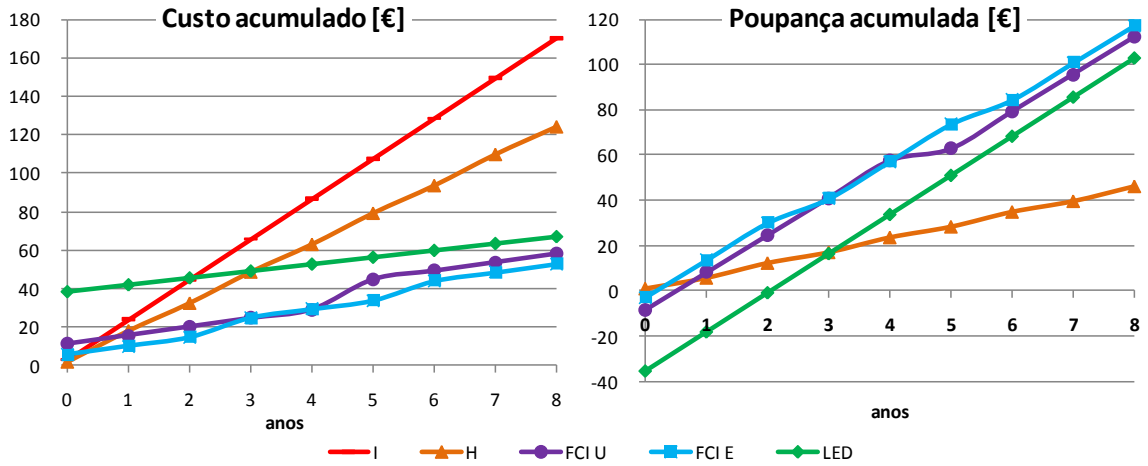
A.2.4. Estudos de consumo

Efectuou-se um estudo do consumo de energia eléctrica para as várias soluções de lâmpadas existentes no mercado. Apresenta-se na Tabela A.4, o caso das lâmpadas de fluxo luminoso equivalente, com base roscada E27 da marca *Philips*. As características das lâmpadas seleccionadas foram retiradas da loja on-line *Electrum Trofa* no dia 14 de Maio de 2011.

Tabela A.4. Dados técnicos das lâmpadas considerados no cálculo do custo total.

Lâmpada	Sigla	Custo [€]	P_l [W]	Φ [lm]	Vida média [h]
Incandescente	I	0,98	60	-	1 000
Halogéneo	H	1,82	42	-	2 000
Fluorescente compacta integrada com tubos em U	FCI U	11,19	15	875	15 000
Fluorescente compacta integrada com tubos em espiral	FCI E	5,70	15	1 000	8 000
LED	LED	38,50	12	-	25 000

Determinou-se para cada tipo de lâmpada o gasto total acumulado para um período de 8 anos (duração da lâmpada LED). Para determinar os valores apresentados na Figura A.13 foi assumida uma tarifa de 0,103 €/kWh e que as lâmpadas estão acesas 8 h/dia. Também foi contabilizado o custo da lâmpada e o custo de reposição desta durante o período de análise. Na substituição da lâmpada incandescente pelas soluções apresentadas, verifica-se pela Figura A.13.b que todas as soluções têm um período de retorno simples (*PR*) inferior a 1 ano, com excepção da lâmpada LED que apresenta um *PR* de 2 anos. Com este estudo conclui-se que a lâmpada FCI em espiral é presentemente a mais indicada, sendo necessária a sua reposição de 2 em 2 anos, pois possui uma vida útil de 8 000 h. Contudo, devido ao crescimento exponencial da tecnologia LED, deverá efectuar-se um novo estudo de mercado destas lâmpadas aquando da reposição da lâmpada FCI.



(a) (b)

Figura A.13. (a) Custo acumulado de vários tipos de lâmpadas de base roscada E27 ao longo de 8 anos. (b) Poupança acumulada das lâmpadas alternativas à lâmpada incandescente.

Anexo B – FERRAMENTAS DE MEDIÇÃO E DE CÁLCULO

Apresentam-se neste anexo as ferramentas utilizadas para a realização do trabalho, mais propriamente os equipamentos de medida utilizados e o programa de simulação numérica da iluminação a que se recorreu.

B.1. Características dos equipamentos de medida

Para medir a área de pavimento (A) e o pé-direito (P_d) dos espaços foi utilizado um medidor de distâncias a laser da marca *Bosh*, modelo PLR 25 com uma faixa de medição de 0,05 a 25 m, uma exactidão de medição de $\pm$ 2,0 mm e uma resolução de 1 mm.

A luminosidade na zona do plano de trabalho dos espaços foi medida com um luxímetro da marca *Velleman*, modelo DVM 1300, que possui uma faixa de medição de 0,01 a 50 000 lx, com várias alternativas de gama de leitura: (*i*) 0 a 200 lx; (*ii*) 0 a 2 000 lx; (*iii*) 0 a 20 000 lx; e (*iv*) 0 a 50 000 lx. A exactidão de medição do aparelho depende da gama de leitura, sendo de ± 5 % da leitura + 10 últimos dígitos para leituras até 10 000 lx e ± 10 % da leitura + 10 últimos dígitos para valores superiores a 10 000 lx. A resolução do indicador depende da gama de leitura e vai de 0.1 lx (para medições até 200 lx) até 100 lx (para medições acima de 20 000 lx).

Para medir as grandezas eléctricas recorreu-se a um multímetro com integrador incorporado, permitindo assim também a determinação do consumo. Trata-se de um leitor da marca *Lidl* com uma faixa de medição de tensão eléctrica de 190 a 276 V, de corrente eléctrica de 0,02 a 16 A, de potência activa de 5 a 4 416 W, de consumo de energia eléctrica de 0,00 a 9 999,99 kWh e de factor de potência de 0,20 a 1,00. Apresenta uma exactidão de medição de ± 3 % para a tensão, de ± 3 % para corrente eléctrica e de ± 5 % para a potência activa, desconhecendo-se a precisão de leitura dos restantes parâmetros.

B.2. Programa de simulação de iluminação – DIALux

Apresenta-se na Figura B.1 a interface de entrada de dados deste *software*.

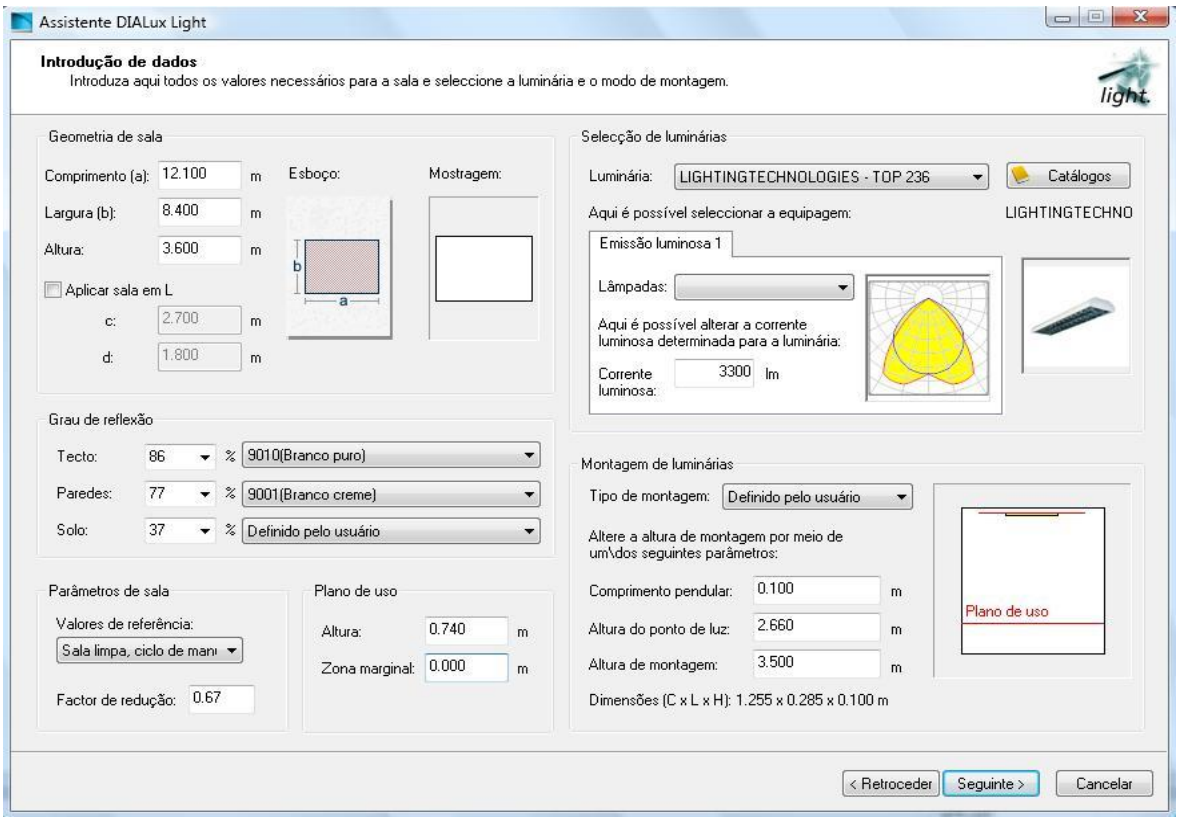


Figura B.1. Interface de entrada de dados do programa DIALux.

Na Tabela B.1 apresentam-se os coeficientes de reflexão (ρ) considerados nas superfícies dos espaços analisados com o *software* DIALux.

Tabela B.1. Coeficientes de reflexão das superfícies considerados no *software* DIALux.

Superfície	ρ
Branco creme (paredes)	77
Branco puro (tecto)	86
Carpete de cor clara	30
Cinzento claro (mesas)	60
Madeira clara (cadeiras)	45
Madeira escura (paredes)	20
Painéis de cortiça (pavimento)	35
Preto (estantes)	5
Tijoleira vermelha (pavimento)	25

B.3. Circuito de iluminação proposto

Apresenta-se na Figura B.2 a planta do circuito de iluminação proposto para as oficinas.

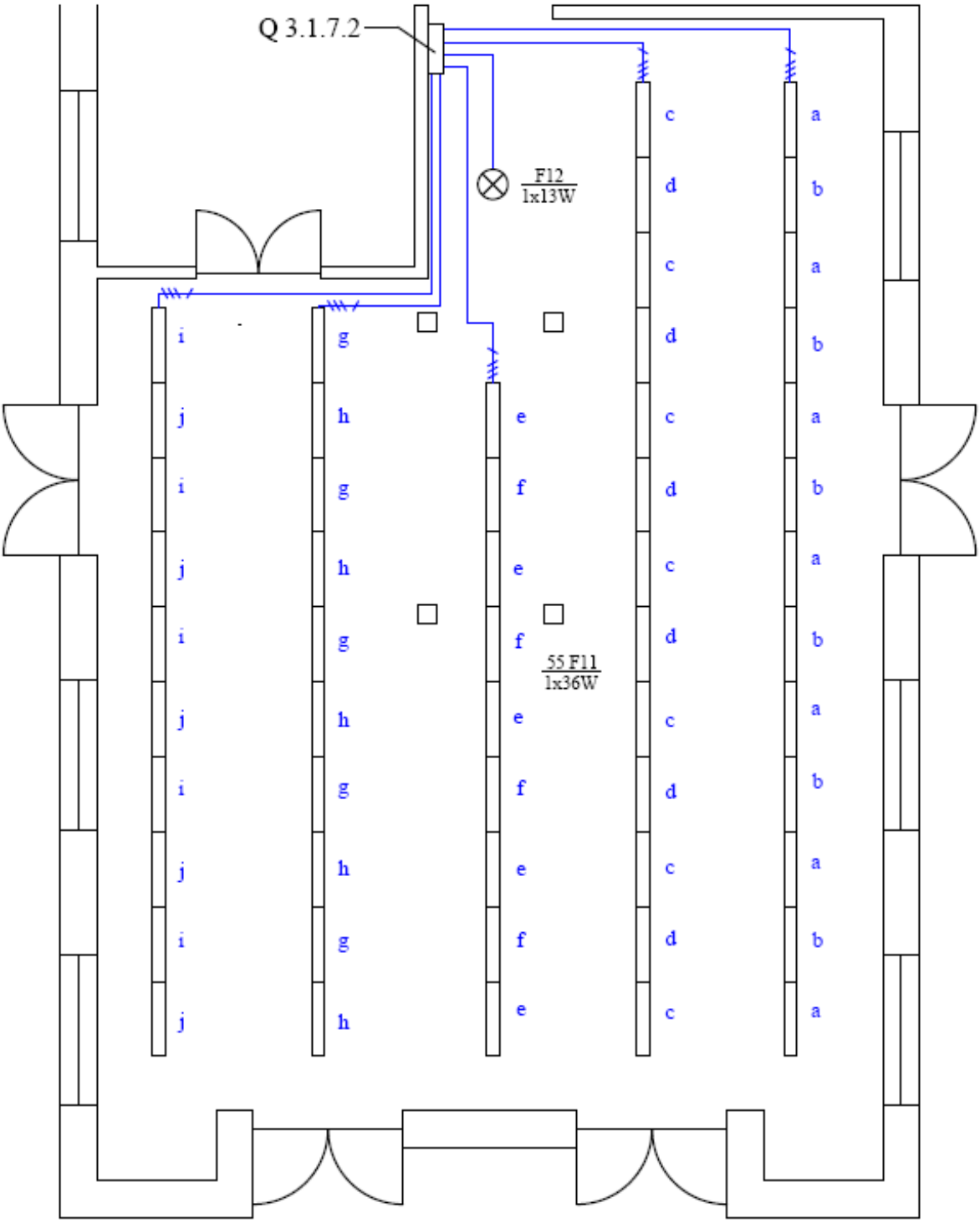


Figura B.2. Planta do circuito de iluminação proposto para as oficinas.

Apresenta-se na Tabela B.2, o custo unitário (sem IVA) dos dispositivos que foram considerados no cálculo da viabilidade económica dos sistemas de iluminação recomendados. Para efeitos de cálculo considerou-se uma taxa de IVA de 23 %.

Tabela B.2. Custo unitário dos dispositivos considerados na análise dos sistemas de iluminação recomendados (valores sem IVA).

Material	Custo unitário [€]
Balastro DALI 1x28/54 T5 EXCITE LP	€ 36,70
Balastro DALI 2x28/54 T5 EXCITE LP	€ 40,88
Balastro Electrónico FCNI 13-26 W	€ 14,77
Balastro electrónico Save it Easy 28 W	€ 13,00
Calhas de plástico (custo por metro)	€ 0,65
Candeeiro LED Enersave Jardim	€ 85,00
DALI-MSENSOR REMOTE SURFACE	€ 151,20
DALI-PS2 240 mA	€ 133,40
DALI-RC REMOTE CONTROL	€ 114,36
Detector de movimento com interruptor crepuscular integrado	€ 37,00
Enersave Iluminação Pública Baixo Fluxo 30 W	€ 730,00
Enersave LED	€ 33,94
Enersave MR16 5 W	€ 16,50
Enersave PL	€ 25,00
Enersave Projector 30 W	€ 190,00
HJ753 Projector fixo com suporte / branco 12 V	€ 1,70
Interruptor analógico para quadros eléctricos	€ 29,50
Interruptor simples EFAPEL	€ 1,89
Lâmpada Fluorescente T5 28 W	€ 2,46
Lâmpada Osram CFL 13-26 W 4 pinos	€ 3,54
Luminária parab. espelhada T5 1x28 W Estanque	€ 30,81
Luminária parab. espelhada T5 1x28 W p/ Quadros	€ 57,20
Luminária parabólica espelhada T5 1x28 W	€ 61,00
Luminária parabólica espelhada T5 2x28 W	€ 52,20
Projector circ. LED 10-20 W ø 22 cm, saliente, IP 65	€ 215,00
Reflector	€ 6,50
Régua T5 1x28 W	€ 25,10
Transformador 12 V	€ 4,50

Anexo C – AUDITORIA LUMINOTÉCNICA DO EDIFÍCIO DO DEM - FCTUC

Neste trabalho analisa-se a viabilidade técnica e económica da substituição dos sistemas de iluminação actuais do edifício em que funciona o DEM – FCTUC por outros energeticamente e luminotecnicamente mais eficientes.

Não sendo viável apresentar no corpo principal a informação detalhada sobre o edifício e sobre os sistemas de iluminação actualmente nele instalados, esta é apresentada neste Anexo. Não se faz aqui qualquer análise de resultados, apresenta-se apenas a informação obtida no decurso da auditoria luminotécnica efectuada ao imóvel.

C.1. Descrição geral do edifício do DEM - FCTUC

Apresenta-se na Figura C.1 o edifício do DEM-FCTUC, onde se destaca a área que apresenta as melhores condições para a instalação de painéis fotovoltaicos. Esta área de pavimento horizontal situa-se na zona mais alta do edifício e não abrange edifícios ou obstruções em redor.

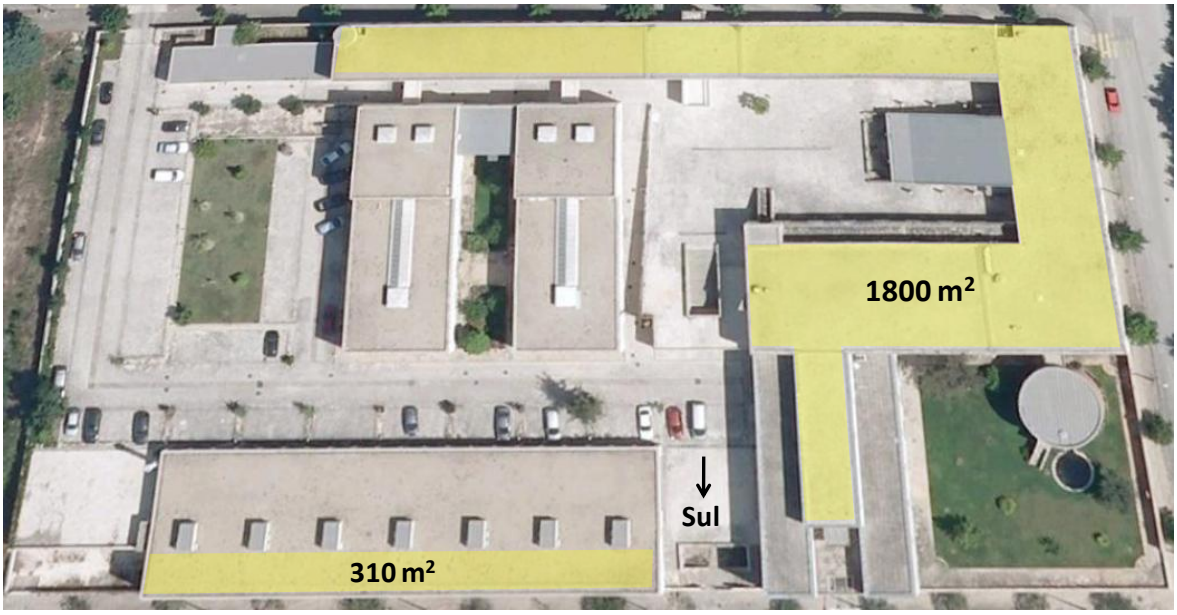


Figura C.1. Vista de cima do edifício do DEM-FCTUC, destacando a área que apresenta as melhores condições para a instalação de painéis fotovoltaicos. Imagem retirada de Google Earth, 2011.

C.2. Caracterização das luminárias actuais do edifício

Na Tabela C.1, L representa o tipo de luminária, l o tipo de lâmpada, n_l o número de lâmpadas na luminária, P_l a potência da lâmpada, P_e a potência do equipamento auxiliar, P_{le} a potência do conjunto lâmpada e equipamento auxiliar, P_L a potência da luminária e Q_L o número de luminárias existentes no edifício.

Tabela C.1. Levantamento das luminárias existentes no edifício.

L	l	n_l	P_l [W]	P_e [W]	P_{le} [W]	P_L [W]	Q_L
F0_60	FT8	1	18	8	26	26	99
F0_90	FT8	2	30	8	38	76	2
F0_120	FT8	1	36	9	45	45	307
F0_150	FT8	1	58	12	70	70	6
F1	FCNI	1	13	4	17	17	78
F2	FCNI	1	11	4	15	15	59
F3	FCNI	1	18	5	23	23	26
F4.1	FT8	1	36	9	45	45	435
F4.2	FT8	2	36	9	45	90	81
F5.1	FT8	1	36	9	45	45	297
F5.2	FT8	2	36	9	45	90	62
F6	FT8	1	36	9	45	45	47
F8	FCNI	1	26	4	30	30	2
F9	FCNI	1	26	4	30	30	17
F10	FCNI	2	26	4	30	60	12
F11.1	FT8	1	36	9	45	45	188
F11.2	FT8	1	18	8	26	26	3
F12.1	FCNI	1	13	4	17	17	16
F12.2	FCNI	2	13	4	17	34	44
F12.3	FCNI	2	18	5	23	46	14
F13	FT8	1	36	9	45	45	27
F14	FCNI	2	26	4	30	60	14
F15	FCNI	1	26	4	30	30	21
F15.1	FCNI	1	26	4	30	30	2
F17	FT8	1	36	9	45	45	40
F18	FT8	1	36	9	45	45	91
F19	FT8	1	36	9	45	45	16
F21	FCNI	1	26	4	30	30	6

L	l	n_l	P_l [W]	P_e [W]	P_{le} [W]	P_L [W]	Q_L
I0	HD	1	50	12	62	62	10
I1.1	HD	1	50	12	62	62	4
I1.2	FCI	1	-	-	11	11	100
I1.3	FCI	1	-	-	40	40	6
I2.1	HC	1	50	12	62	62	34
I2.2	HC	1	50	12	62	62	50
I4	I	1	7	0	7	7	28
I5	FCI	1	-	-	11	11	4
I6	HR	1	50	12	62	62	2
M0	IM	1	70	11	81	81	8
M2	VMH	1	70	11	81	81	1
M3	IM	1	70	11	81	81	54
M4	VMH	1	50	8	58	58	4
L1	HD	1	20	10	30	30	25
L2	HD	1	20	10	30	30	8
L3	FT8	2	36	9	45	90	8
L4	FT8	4	18	8	26	104	4
L5	FCI	1	-	-	15	15	15
L6	FCNI	1	10	3	13	13	2
L7	FCNI	1	13	4	17	17	42
L8	VMH	1	50	8	58	58	2
L9	IM	1	70	11	81	81	1
L10	HL	1	150	0	150	150	1
						Total	2425

C.3. Sistemas de iluminação instalados em cada espaço

O tempo de utilização dos sistemas de iluminação durante o ano de 2010 foi calculado seguindo três regimes laborais anuais. O regime laboral 1 contempla os cinco dias úteis de todas as semanas do ano, subtraindo os feriados do ano 2010. O regime laboral 2 é igual ao regime laboral 1 menos os 22 dias de férias. O regime laboral 3 contabiliza todos os dias do ano, excepto domingos (regime dos interruptores horários e

crepusculares). O tempo de utilização diária (t_d) dos gabinetes de docentes foi determinado, ponderando um perfil de ocupação de 5 h/dia, considerando uma taxa de ocupação de 70 %, revertendo num valor de 4,2 h/dia que multiplicando pelo regime laboral 2 resulta em 974 h/ano.

Na Tabela C.2, A representa a área de pavimento do espaço, P_d o pé-direito, L o tipo de luminária, P_i a potência total instalada, I_D a iluminação disponível, P_D a potência disponível, i.e., o equipamento de iluminação efectivamente ligado ou a consumir energia eléctrica, t_a o tempo de operação anual do sistema de iluminação artificial e C_i o consumo anual de electricidade do espaço. Relativamente aos comandos dos circuitos de iluminação (CCI), o CM significa o comando manual (e.g., disjuntores ou comutadores), o DM o detector de movimento, o IH o interruptor horário, o IC o interruptor crepuscular e T o temporizador (elevadores).

Tabela C.2. Distribuição dos sistemas de iluminação pelos espaços do edifício.

	Espaço	***A*** **[m²]**	***Pd*** **[m]**	**L**	P_i **[W]**	I_D	P_D **[W]**	**CCI**	t_a **[h/ano]**	C_i **(kWh/ano)**
Bloco Central – piso 1	Escadas 1	22,8	3,3	F1	17	1	17	IH	2035	34,6
	Circulação 1	22,0	3,1	F1	51	2	34	CM	7512	255,4
	Sala Funcionários 1	8,8	3,1	F0_60	26	1	26	CM	759	19,7
	Arrumos 1	4,6	3,1	F0_60	26	1	26	CM	50	1,3
	Arrumos 2	4,6	3,1	F0_60	26	1	26	CM	50	1,3
	Elevador 1	2,3	2,1	F0_90	152	4	152	-	8760	1 331,5
	Garagem	602,0	3,0	F0_120	2295	30	1350	DM	253	341,6
	Sala SE	47,4	2,8	F6	180	4	180	CM	50	9,0
				L3	720	15	675	CM	50	33,8
				F8	30	0	0	CM	0	0,0
	Sala SW	47,4	6,4	F4.1	810	6	270	CM	1139	307,4
				F6	180	4	180	CM	506	91,1
				F8	30	1	30	CM	0	0,0
	Circulação 2	37,7	3,0	F1	51	3	51	IH	939	47,9
	Posto Transformação	61,6	4,5	F19	405	9	405	CM	20	8,1
	Galeria Técnica	121,1	3,0	F0_120	585	13	585	CM	5	2,9
	Chillers	58,3	4,5	F19	315	7	315	CM	20	6,3
	Entrada Posterior 1	65,3	-	F2	120	8	120	IH	939	112,7
				F3	92	4	92	IH	939	86,4

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
Bloco Central – piso 2	Escadas 1	18,2	3,5	F1	17	1	17	IH	2035	34,6
	Circulação 3	51,1	2,7	F1	51	2	34	IH	2035	69,2
				F12.2	102	6	102	IH	2035	207,5
	Anfiteatro II	70,5	3,0	F13	720	16	720	CM	974	701,4
	I.S./ M	12,6	2,7	I1.2	77	1	11	IH	2035	22,4
	I.S./ F	12,6	2,7	I1.2	77	5	55	IH	2035	111,9
	Arrumos 3	2,9	2,7	F0_60	17	1	17	CM	10	0,2
	Arrumos 4	2,9	2,7	F0_60	17	1	17	CM	10	0,2
	UTA 1	19,6	2,7	F0_120	90	2	90	CM	10	0,9
	Bar	139,1	2,6	F12.2	544	32	544	CM	3130	1 702,7
				I0	610	10	610	CM	3130	1 909,3
		83,2	6,8	F14	480	16	480	CM	3130	1 502,4
	Cozinha	38,5	3,2	F11.1	450	10	450	CM	3130	1 408,5
	Despensa	24,6	3,2	F11.1	180	4	180	CM	939	169,0
	Circulação 4	344,9	3,2	F9	180	2	60	IH	939	56,3
				F10	300	2	60	IH	939	56,3
	Circulação 5	17,8	3,2	F1	51	3	51	CM	0	0,0
	Lab. Transmissão Calor	104,5	3,2	F4.1	1845	41	1845	CM	1012	1 867,1
	Escritório 1	7,6	3,2	F4.1	90	1	45	CM	2277	102,5
	Lab. Ecologia Industrial	63,2	3,2	F4.1	1125	11	495	CM	2277	1 127,1
	Sala de Aulas 1	40,8	3,2	F5.1	675	15	675	CM	300	202,5
	Escadas Exteriores	36,9	-	F1	102	3	51	IH	939	47,9
	Caldeiras	32,5	3,3	F11.1	180	4	180	CM	10	1,8
Bloco Central – piso 3	Entrada Posterior 2	16,0	-	F2	30	2	30	CM	0	0,0
				F3	23	1	23	CM	0	0,0
	Jardim 1	41,7	-	L9	81	1	81	IH	1565	126,8
	Circulação 6	47,0	2,6	F1	136	3	51	IH	1565	79,8
	I.S./ F	3,4	2,4	I1.2	22	2	22	CM	232	5,1
	I.S./ M	3,4	2,4	I1.2	22	2	22	CM	232	5,1
	Gabinete 1	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 2	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 3	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 4	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 5	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 6	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 7	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Circulação 7	240,0	7,2	F2	345	23	345	IH	1878	647,9
				F17	1800	0	0	IH	0	0,0
	Escadas redondas	10,5	5,3	F1	68	3	51	IH	1878	95,8
	Escritório 2	23,5	3,1	F0_120	90	2	90	CM	1972	177,5

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
Bloco Central – piso 3	Arquivos 1	12,8	2,8	F0_120	45	1	45	CM	#REF!	#REF!
	Lab. Mecânica Estrutural I	74,5	4,0	F1	45	0	0	CM	253	0,0
				F4.1	900	20	900	CM	253	227,7
	Lab. Prof. Nuno Rilo	49,3	4,0	F1	17	0	0	CM	1856	0,0
				F4.1	630	14	630	CM	1856	1 169,3
	Lab. Mecânica Estrutural II	83,4	4,0	F1	17	0	0	CM	1856	0,0
				F4.1	990	22	990	CM	1856	1 837,4
	Entrada Principal	54,6	4,8	F1	34	2	34	IH	1878	63,9
				F10	120	2	60	IH	1878	112,7
				F15.1	120	0	0	IH	1878	0,0
	Recepção	21,3	3,1	F5.1	90	2	90	CM	464	41,8
				F9	30	1	30	CM	348	10,4
	Sala Segurança	24,2	3,1	F5.1	135	3	135	CM	37	4,9
				F9	30	1	30	CM	37	1,1
	Reprografia	24,2	3,1	F4.1	135	3	135	CM	1856	250,6
				F18	135	3	135	CM	1856	250,6
	Contabilidade	24,2	3,1	F5.1	270	6	270	CM	1624	438,5
	Secretaria	73,2	3,1	F5.1	405	9	405	CM	1624	657,7
				F9	90	3	90	CM	1624	146,2
	Arquivos 2	33,0	3,1	F5.1	315	7	315	CM	81	25,6
	Escadas NE	10,9	3,4	M2	81	0	0	IH	0	0,0
	Circulação 8	16,0	3,1	F1	51	3	51	DM	116	5,9
	I.S./ F Funcionários	15,6	3,1	I1.2	55	3	33	IH	4226	139,4
	I.S./ M Funcionários	15,6	3,1	I1.2	55	3	33	IH	4226	139,4
	Sala Funcionários 2	45,6	3,1	F13	135	3	135	CM	464	62,6
				L8	116	2	116	CM	464	53,8
	Circulação 9	190,4	2,8	F1	51	1	17	IH	1017	17,3
				F12.2	136	8	136	IH	1017	138,3
				F12.3	184	3	69	IH	1017	70,2
				F15	180	3	90	IH	1017	91,6
	Auditório	162,6	3,9	F0_60	26	1	26	CM	1	0,0
				F0R_120	576	15	540	CM	590	318,6
				F12.3	276	11	253	CM	590	149,3
				I2.2	1525	25	1525	CM	590	899,8
				I4	98	14	98	CM	148	14,5
				I5	44	4	44	CM	148	6,5
	Sala 3.1	39,9	3,1	F5.1	540	12	540	CM	704	380,2
				F6	135	3	135	CM	141	19,0

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
Bloco Central – piso 3	Sala 3.2	51,8	3,1	F5.1	675	13	585	CM	862	504,1
				F6	135	3	135	CM	862	116,3
	Sala 3.3	51,8	3,1	F5.1	675	13	585	CM	820	479,8
				F6	135	3	135	CM	820	110,7
	Sala 3.4	51,8	3,1	F5.1	675	13	585	CM	846	495,1
				F6	135	3	135	CM	846	114,3
	Sala 3.5	51,8	3,1	F18	675	13	585	CM	390	228,2
				F6	135	3	135	CM	390	52,7
	Escadas 1	18,2	5,3	F1	17	1	17	IH	2035	34,6
	Anfiteatro I	78,5	4,3	F0_120	90	2	90	CM	944	84,9
				I2.2	1525	24	1464	CM	944	1 381,3
				I4	98	14	98	CM	944	92,5
	I.S./ F	13,8	2,9	I1.2	66	2	22	IH	4226	93,0
	I.S./ M	13,8	2,9	I1.2	66	2	22	IH	4226	93,0
	Arrumos 5	2,6	3,1	F0_60	26	1	26	CM	10	0,3
	Sala ATM	105,3	3,0	L5	225	14	210	IH	1017	213,6
	Circulação 10	142,7	3,0	F1	17	0	0	IH	0	0,0
				F15	450	6	180	IH	1017	183,1
	I.S./ Deficientes	9,9	2,9	I1.2	33	3	33	CM	0	0,0
				F11.1	45	1	45	CM	0	0,0
	Recepção Biblioteca	98,3	2,6	I2.1	610	10	610	CM	1972	1 202,9
				F12.2	136	3	51	CM	1972	100,6
				F12.3	184	8	184	CM	1972	362,8
				L10	150	1	150	CM	1972	295,8
	Escritório 3	16,4	2,6	F5.1	180	4	180	CM	1972	355,0
	I.S./ Comum	3,8	2,6	I1.3	80	2	80	CM	116	9,3
	Arrumos 6	7,7	2,6	F0_120	45	1	45	CM	10	0,5
	Sala 1	35,9	2,6	F4.1	315	7	315	CM	464	146,2
	Arquivos 3	81,1	2,6	F0_120	540	6	270	CM	464	125,3
	I.S./ F	6,1	2,6	I1.2	22	2	22	CM	1972	43,4
	I.S./ M	6,1	2,6	I1.2	22	2	22	CM	1972	43,4
	UTA 2	10,1	2,6	F0_120	45	1	45	CM	10	0,5
	Sala 2	25,9	2,6	F0_120	225	3	135	CM	1972	266,2
	Sala de Informática III	63,0	2,6	F0_120	450	10	450	CM	1972	887,4
	Sala de Grupos 1	28,1	2,6	F0_120	270	6	270	CM	1972	532,4
	Sala de Grupos 2	39,3	2,6	F12.2	34	2	34	CM	1972	67,0
				F13	360	6	270	CM	1972	532,4
	Biblioteca	139,2	7,2	M0	648	8	648	CM	1972	1 277,9
				F0_60	2340	90	2340	CM	696	1 628,6
		80,6	2.6	I2.1	1464	16	976	CM	1972	1 924,7

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
	Pátio Biblioteca	36,0	2,6	F1	34	2	34	CM	0	0,0
Bloco Central – piso 4	Pátio Central	-	-	F2	120	8	120	IC	0	0,0
				F21	216	6	216	IC	2817	608,5
				I6	116	0	0	IC	0	0,0
	Circulação 11	132,9	3,6	F0_120	2970	17	765	IH	1252	957,8
	Gabinete 8	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 9	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 10	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 11	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 12	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 13	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 14	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 15	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 16	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 17	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 18	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 19	11,3	3,6	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 20	22,2	3,6	F4.2	270	6	270	CM	974	263,1
	I.S./ F	3,4	2,5	I1.2	22	2	22	CM	232	5,1
	I.S./ M	3,4	2,5	I1.2	22	2	22	CM	232	5,1
	Sala Reuniões I	17,2	3,6	F5.1	270	6	270	CM	1392	375,8
	Gabinete Técnico	17,2	3,6	F5.1	270	6	270	CM	1972	532,4
	Comissão Executiva	17,2	3,6	F5.1	270	6	270	CM	1624	438,5
	Comissão Pedagógica	17,2	3,6	F5.1	270	6	270	CM	232	62,6
	Comissão Científica	17,2	3,6	F5.1	270	6	270	CM	232	62,6
	Sala Reuniões II	34,4	3,6	F5.1	630	14	630	CM	696	438,5
	I.S./ M	13,0	2,9	I1.2	66	6	66	IH	464	30,6
	I.S./ F	13,0	2,9	I1.2	66	6	66	IH	464	30,6
	Circulação 12	128,9	3,6	F0_120	1530	10	450	IH	783	352,1
				F1	51	1	17	IH	783	13,3
	Cabine	24,8	2,3	L6	28	2	28	CM	0	0,0
				F0_120	90	2	90	CM	10	0,9
	UTA 3	11,2	3,1	F0_120	45	1	45	CM	10	0,5
	Sala 6.1	101,6	3,6	F5.1	1215	24	1080	CM	1169	1 262,2
				F6	180	4	180	CM	818	147,3
	Sala 6.2	101,6	3,6	F5.1	1215	24	1080	CM	1114	1 202,7
				F6	180	4	180	CM	780	140,3
	Sala 6.3	101,6	3,6	F5.1	1215	24	1080	CM	1106	1 194,2
				F6	180	4	180	CM	774	139,3

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
Bloco Central – piso 4	Sala 6.4	101,6	3,6	F5.1	1215	24	1080	CM	1083	1 169,4
				F6	270	4	180	CM	758	136,4
	I.S./ F	12,7	3,3	I1.2	77	3	33	IH	783	25,8
	Arrumos 7	1,4	3,6	F0_60	26	1	26	CM	10	0,3
	Arrumos 8	1,4	3,6	F0_60	26	1	26	CM	10	0,3
	I.S./ M	12,7	3,3	I1.2	77	3	33	IH	783	25,8
	Circulação 13	75,3	3,6	F0_120	1170	3	135	IH	3756	507,1
				F1	17	0	0	IH	250	0,0
	Sala de Informática I	75,2	3,6	F5.2	1800	38	1710	CM	891	1 523,3
	Sala de Informática II	100,9	3,6	F5.2	2520	52	2340	CM	776	1 815,6
	Sala de Projecto	49,6	3,6	F5.2	1260	27	1215	CM	597	725,6
				F6	90	1	45	CM	597	26,9
	Sala de Desenho	55,7	3,4	F18	675	13	585	CM	597	349,4
				F6	180	4	180	CM	597	107,5
	Gabinete de Informática	70,2	3,4	F18	765	17	765	CM	1740	1 331,1
	Varanda	91,5	-	F2	30	2	30	CM	0	0,0
				F1	51	3	51	CM	0	0,0
Bloco Energia e Fluidos – piso 1	Circulação 14	183,7	3,0	F1	119	5	85	CM	7512	638,5
				F9	60	1	30	CM	7512	225,4
				F11.1	45	1	45	CM	2783	125,2
				F12.1	51	3	51	CM	7512	383,1
				F12.2	34	1	17	CM	7512	127,7
				L1	700	23	644	CM	50	32,2
	Compressor 1	26,8	3,0	F0_120	315	7	315	CM	10	3,2
	Elevador 2	2,4	2,2	L2	112	2	56	T	10	0,6
	I.S./ F	20,0	2,6	F11.1	90	2	90	CM	7512	676,1
				F0_150	210	0	0	CM	0	0,0
				I1.3	80	1	40	CM	7512	300,5
	I.S./ Deficientes	5,0	2,6	F11.1	45	1	45	CM	0	0,0
	I.S./ M	20,0	2,6	F11.1	90	2	90	CM	7512	676,1
				F0_150	210	0	0	CM	0	0,0
				I1.3	80	1	40	CM	7512	300,5
	Lab. Climat. Ambiente I	177,2	6,7	M3	1620	20	1620	CM	100	162,0
		10,2	3,0	F5.1	90	2	90	CM	100	9,0
	Lab. Climat. Ambiente II	46,1	3,0	F5.1	540	6	270	CM	759	204,9
	Lab. Termodinâmica	305,3	6,7	M3	2754	24	1944	CM	1012	1 967,3
	Sala de Reuniões III	46,6	2,5	F5.1	630	7	315	CM	506	159,4

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
piso 1	Gabinete 21	46,6	3,0	F4.1	630	9	405	CM	1063	430,4
	Lab. Mec. Fluidos I	40,3	5,0	F4.1	1080	24	1080	CM	50	54,0
	Compressor 2	10,9	2,3	F4.1	90	2	90	CM	5	10,0
	Escritório 4	6,5	2,3	L4	208	8	208	CM	1518	315,7
	Escritório 5	6,5	2,3	L4	208	8	208	CM	759	157,9
	Lab. Mec. Fluidos II	62,0	5,0	F4.1	1620	35	1575	CM	50	78,8
	Armazém	142,8	4,8	F0_120	270	6	270	CM	50	13,5
				F4.1	810	18	810	CM	50	40,5
	Pátio	156,6	-	F3	115	5	115	CM	10	1,2
Bloco Energia e Fluidos – piso 2	Alpendre	23,2	3,2	F1	34	0	0	CM	0	0,0
	Espaço Técnico	14,6	3,2	F0_120	90	2	90	CM	100	9,0
	Circulação 15	177,5	2,6	F0_120	1350	11	495	IH	2230	1 103,9
				F1	85	4	68	CM	10	0,7
				F12.1	221	13	221	CM	0	0,0
	Gabinete 22	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	I.S./ F	3,5	2,6	I1.1	124	2	124	CM	232	28,8
	I.S./ M	3,5	2,6	I1.1	124	2	124	CM	232	28,8
	Arquivos 4	7,0	2,9	F12.2	34	2	34	CM	97	3,3
	Gabinete 23	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 24	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 25	13,6	2,9	F4.2	180	3	135	CM	974	131,5
	Gabinete 26	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 27	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 28	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 29	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 30	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 31	13,6	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 32	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 33	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 34	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 35	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 36	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 37	13,6	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 38	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 39	16,2	2,9	F4.2	180	4	180	CM	974	175,4
	Secretariado	31,9	2,9	F4.2	360	8	360	CM	1624	584,6

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
piso 2	Terraço	212,3	-	F2	90	4	60	IH	1803	108,2
				F3	23	1	23	IH	1803	41,5
				M4	232	0	0	CM	0	0,0
	Estacionamento exterior	-	-	L7	578	33	561	IH	3756	2 107,1
Bloco Produção – piso 2	Entrada SE	11,9	3,2	F3	46	2	46	CM	0	0,0
	Lab. Const. Mecânicas	102,9	3,2	F4.1	1305	29	1305	CM	1771	2 311,2
	Sala de Testes 1	68,6	3,2	F4.1	900	20	900	CM	1771	1 593,9
	Sala de Testes 2	15,6	3,2	F11.1	180	4	180	CM	1771	318,8
	Circulação 16	59,7	2,6	F12.2	170	10	170	CM	6072	1 032,2
	Central Hidráulica	12,7	3,2	F11.1	180	4	180	CM	1771	318,8
	S.E.M.	21,8	3,2	F4.1	270	6	270	CM	1771	478,2
	Sala Didáctica	21,8	3,2	F4.1	270	6	270	CM	1771	478,2
	Sala de Testes 3	32,8	2,6	F4.1	450	10	450	CM	1771	797,0
	Estudantes Pós-graduação	73,3	3,2	F4.1	990	22	990	CM	2783	2 755,2
	Gabinete 40	16,0	3,2	F4.1	270	6	270	CM	2552	689,0
	Escadas NE	11,6	3,3	F1	17	1	17	CM	2783	47,3
	Jardim 2	300,7	-	F2	120	8	120	CM	0	0,0
				F3	92	4	92	CM	0	0,0
				F10	60	2	60	CM	0	0,0
				L7	136	8	136	IH	3756	510,8
	Entrada SW	11,9	3,2	F3	46	2	46	CM	0	0,0
	Oficinas	199,2	3,2	F11.1	2475	55	2475	CM	1012	2 504,7
	Circulação 17	65,9	2,6	F12.2	170	9	153	CM	2151	329,0
	Secção dos Materiais	48,4	3,2	F11.1	630	14	630	CM	253	159,4
	Escritório 6	22,9	3,2	F4.1	270	6	270	CM	1518	409,9
	Secção de Soldadura	47,8	2,8	F11.1	585	13	585	CM	506	296,0
	Lab. Nanopartículas I	18,2	3,2	F11.1	180	4	180	CM	0	0,0
	Lab. Nanopartículas II	31,6	3,2	F11.1	270	5	225	CM	202	45,5
				F4.1	135	3	135	CM	202	27,3
	Casa das Máquinas	3,2	3,2	F0_120	45	1	45	CM	1	0,0
	Elevador 3	2,3	2,2	L2	112	2	56	T	10	0,6
	Escadas NW	11,6	3,3	F1	17	1	17	CM	2783	47,3
	Entrada NW	-	-	F2	30	2	30	CM	0	0,0
				F3	69	3	69	CM	0	0,0

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
Bloco Produção – piso 3	Entrada NE	-	-	F3	23	1	23	CM	100	2,3
	Circulação 18	75,9	3,3	F1	34	2	34	CM	3443	117,1
				F9	30	1	30	CM	3443	103,3
				F10	60	2	60	CM	3443	206,6
				F12.2	34	2	34	CM	3443	117,1
				F14	180	6	180	CM	3443	619,7
	Escadas NE	11,6	5,5	F0_120	90	2	90	CM	3443	309,9
	Escritório 7	13,2	3,1	F0_120	180	4	180	CM	2817	507,1
	Gabinete 41	46,6	3,1	F4.1	360	8	360	CM	3443	1 239,5
	Sala de Polimento	12,4	2,4	F11.1	45	1	45	CM	3443	154,9
				I1.2	66	4	44	CM	3443	151,5
	I.S./ Comum	15,4	2,4	F11.1	45	1	45	CM	3443	154,9
				I1.2	55	1	11	CM	3443	37,9
	Lab. Tratamento Térmico	46,3	3,1	F4.1	630	14	630	CM	3443	2 169,1
	Gabinete 42	46,3	3,1	F4.1	630	14	630	CM	3443	2 169,1
	Lab. Análises Térmicas	45,2	3,1	F4.1	495	11	495	CM	4695	2 324,0
	Microssonda Electrónica	45,2	3,1	F4.1	540	10	450	CM	3443	1 549,4
	Lab. Revestimentos Finos	97,0	3,1	F4.1	810	18	810	CM	1878	1 521,2
		2,3	3,1	F1	17	1	17	CM	0	0,0
	Entrada NW	-	-	F3	23	1	23	CM	100	2,3
	Circulação 19	75,5	3,3	F1	34	2	34	CM	2783	94,6
				F9	30	1	30	CM	2783	83,5
				F10	60	2	60	CM	2783	167,0
				F12.2	34	2	34	CM	2783	94,6
				F14	180	6	180	CM	2783	500,9
	Escadas NW	11,6	5,5	F0_120	90	2	90	CM	2783	250,5
	I.S./ M	17,4	3,1	I1.2	66	4	44	CM	2783	122,5
	I.S./ F	17,4	3,1	I1.2	66	4	44	CM	2783	122,5
	Sala de Informática	39,9	3,0	F18	450	10	450	CM	1012	455,4
	Gabinete Investigação I	49,9	3,0	F4.1	630	14	630	CM	2783	1 753,3
	Sala de Aulas 2	49,9	3,0	F5.1	630	14	630	CM	400	252,0
	Gabinete Investigação II	18,2	3,0	F4.1	180	4	180	CM	2783	500,9
	Gabinete 43	18,2	3,0	F4.1	180	4	180	CM	974	175,4
	Gabinete 44	18,2	3,0	F4.1	180	4	180	CM	974	175,4
	Sala de Reuniões IV	18,2	3,0	F4.1	180	4	180	CM	759	136,6
	Lab. Ensaios Mecânicos	47,0	3,0	F11.1	540	12	540	CM	1392	751,4

	Espaço	A [m^2]	Pd [m]	L	P_i [W]	I_D	P_D [W]	CCI	t_a [h/ano]	C_i [kWh/ano]
	Gabinete Investigação III	61,7	3,0	F11.1	720	15	675	CM	2783	1 878,5
				F1	17	1	17	CM	0	0,0
Bloco Produção – piso 4	Entrada NE	-	-	F3	23	1	23	CM	0	0,0
	Circulação 20	80,3	3,0	F0_120	90	2	90	CM	504	45,4
				F1	34	1	17	CM	504	8,6
				F9	60	1	30	CM	100	3,0
				F10	120	4	120	CM	504	60,5
				F12.2	68	4	68	CM	504	34,3
	Lab. Robótica	130,0	3,7	F11.1	1485	33	1485	CM	2772	4 116,4
				F11.2	78	3	78	CM	2772	216,2
	Sala Pós-Graduação	30,2	2,6	F4.1	225	5	225	CM	2772	623,7
	Entrada NW	-	-	F3	23	1	23	CM	0	0,0
	Escritório 8	19,9	3,7	F18	225	5	225	CM	100	22,5
	Escritório 9	19,7	3,7	F18	270	6	270	CM	0	0,0
	Lab. Gestão	79,2	3,7	F18	900	20	900	CM	1008	907,2
									Total	**112 682**

C.4. Sistemas de comando da iluminação

Apresenta-se na Tabela C.3 o tempo de operação diário t_d, resultante da programação dos interruptores horários que comandam as lâmpadas dos vários espaços existentes no edifício.

Tabela C.3. Programação dos interruptores horários do edifício.

Piso	Espaço	t_d [h]
1	Circulação 2, entrada posterior 1	3
2	Circulação 3, IS	6,5
	Circulação 4, escadas exteriores	3
	Circulação 17, terraço	7,1
	Estacionamento exterior, jardim 2	12
3	Circulação 6, jardim 1	5
	Circulação 7, escadas redondas, entrada principal	6
	Circulação 8, IS	13,5
	Circulações: 9 e 10, sala ATM	3,3
4	Circulação 11	4
	Circulação 12, IS	2,5
	Circulação 13	12