

Instituto Politécnico do Porto
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
Departamento de Física

Fonte de Iluminação LED – Avaliação dos Efeitos Fotobiológicos no Olho e Pele

Hernani Moreira Furtado

Dissertação apresentada no Instituto Superior de Engenharia do Porto para a obtenção
do grau de mestre em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Orientador ISEP: Doutora Elisabete Nogueira

Orientador Externo: Eng.º Esaú Cardoso

Novembro 2014

Resumo

Tendo por referência a diretiva 2006/95/CE, o trabalho desenvolvido no contexto da disciplina de Dissertação/Projeto/Estágio do Mestrado de Engenharia de Instrumentação e Metrologia, decorreu nas instalações do IEP (Instituto Electrotécnico Português) e teve como objetivo principal o desenvolvimento de um procedimento de avaliação dos efeitos fotobiológicos no olho e pele provocados por fontes de emissão contínua (LED), doravante designado método alternativo ao de referência. Os dois métodos, alternativo e de referência, utilizam respectivamente um foto-radiómetro multicanal e um espectro-radiómetro.

O procedimento desenvolvido (método alternativo) de acordo com a norma EN/IEC62471) consiste na aquisição dos valores de irradiância com recurso a um foto-radiómetro e posterior determinação dos valores da radiância, com os quais se faz a avaliação dos efeitos fotobiológicos, para fontes de luz LED (Light Emitting Diode) ou GLS (General Lighting Service).

A consulta detalhada da norma EN/IEC62471 e a pesquisa sobre os conceitos, definições, equipamentos e metodologias relacionadas com o tema em causa, constituiu o primeiro passo deste projecto.

Com recurso aos dois equipamentos, uma fonte de luz LED (módulo de 12 lâmpadas LED) é avaliada em relação aos perigos (ou riscos) actínico UV e UV-A, ao perigo da luz azul e ainda o perigo térmico na retina e térmico na pele, permitindo fazer uma análise comparativa dos resultados.

O método alternativo revelou-se bastante flexível e eficaz, proporcionando bons resultados em termos da irradiância e radiância dos referidos efeitos fotobiológicos. A comparação destes resultados com os valores limites de exposição mencionados na norma EN/IEC6247 permitiu afirmar que a fonte de luz LED avaliada não representa perigo fotobiológico para a saúde humana e classifica-se no grupo de risco “isento”.

Uma vez cumpridos os objectivos, entendeu-se que seria uma mais-valia para o trabalho já realizado, estudar outro caso prático. Sendo assim, fez-se a avaliação da radiação de apenas um dos LED's que constituíam a fonte usada nos ensaios anteriores, com o espectro-radiómetro (método de referência) e com uma distância de 200 mm entre a fonte e o medidor. Neste caso verificaram-se diferenças significativas nas quantidades obtidas quando comparadas com os

valores normativos. Concluiu-se que o efeito fotobiológico da luz azul insere-se no grupo de “isento”, sem perigo para a saúde. Contudo, o efeito térmico da retina apresenta um aumento considerável da quantidade de radiância, embora dentro do grupo de risco “isento”. Esta classificação de grupos de risco.

Face aos resultados obtidos, pode confirmar-se que as lâmpadas LED apresentam segurança fotobiológica, atendendo aos baixos valores de irradiância e radiância dos efeitos fotobiológicos estudados.

Pode ainda afirmar-se que a utilização do foto-radiómetro em alternativa ao espectro-radiómetro se revela mais eficaz do ponto de vista de metodologia prática.

Este trabalho demonstra a robustez desses dois equipamentos de avaliação dos efeitos fotobiológicos, e procura estabelecer uma linha de orientação para a prevenção dos efeitos adversos na pele e olhos de todos os seres humanos sujeitos à radiação ótica artificial.

Quanto às incertezas de medições, em relação ao processo de medição com foto-radiómetro, a sua estimação não se realizou, devido a não rastreabilidade entre as medições indicadas pelo fabricante, no certificado de calibração e as medidas realizadas por outras entidades. Contudo, é propõe-se a sua realização em trabalhos futuros dentro desse âmbito. As incertezas dos resultados de medições com espectro-radiómetro foram parcialmente estimadas.

Atendendo às potencialidades do sistema de medição, propõe-se como trabalho futuro, a aplicação da norma IEC62478, que faz parte da aplicação da norma EN/IEC62471 na avaliação do efeito da luz azul, com base na determinação da temperatura de cor correlacionada (CCT) de lâmpadas ou sistemas de lâmpadas incluindo luminárias.

Os valores de irradiância e radiância adquiridos nos processos de avaliação, tanto com foto-radiómetro como espectro-radiómetro foram gravados em ficheiro Excel para um CD e anexados a este trabalho.

Abstract

Referring to Directive 2006/95/EC, the work developed in the context of the discipline of Thesis/Project/Internship of Master of Engineering in Instrumentation and Metrology, took place at the IEP (Portuguese Electro-technical Institute) and its main objective was to develop a procedure for evaluating the photo-biological effects on the eye and skin caused by continuous emission sources (LED), hereinafter designed as an alternative method to the reference. The two methods, the alternative and referential use a multi-channel photo-radiometer and a spectrum-radiometer, respectively.

The procedure developed (alternative method) according to the standard EN/IEC62471, consists of the acquisition of the irradiance values using a photo-radiometer and subsequent determination of radiance values, with which an evaluation is made of the photo-biological effects for sources of LED (light Emitting Diode) or GLS (General Lighting Service) light.

A detailed consultation of EN/IEC62471 and research on the concepts, definitions, methodologies and equipment related to the topic in question, was the first step of this project.

Using the two devices, a power LED module (12 LED bulbs) light is measured in relation to the hazards (or risks) Actinic UV and UV-A, to the hazard of blue light and also the thermal hazard to the retina and skin, allowing you a comparative analysis of the results.

The alternative method proved to be very flexible and efficient, providing good results in terms of irradiance and radiance of these photo-biological effects. Comparing these results with the exposure limit values specified in EN/IEC62471 allowed to state that the LED light source is evaluated that has no photo-biological hazards to human health and it's classified in the "exempt" group of risk.

At the completion of the objectives, it was felt that it would be an added value to the work already done, another practical case study. Thus, there was an assessment of the radiation of only one of the LED's that constituted the font used in previous trials, with the spectrum-radiometer (reference method) and a distance of 200 mm between the source and the meter. In this case there have been significant differences in the amounts obtained when compared with normative values. It was concluded that the photo-biological blue light effect is

part of the group of "1" with some risk to human health. However, the thermal effect of the retina, presents a considerable increase in the amount of radiation, although within the "exempt" group of risk.

Considering our results, it can be confirmed that the LED bulbs feature photo-biological safety, given the low values of irradiance and radiance of the studied photo-biological effects.

It can also be stated that the use of photo-radiometer alternatively the radiometer-spectrum reveals more effective from the viewpoint of practical methodology.

This work demonstrates the robustness of these two outfits assessment of photo-biological effects, and seeks to establish a guideline for the prevention of adverse effects on the skin and eyes of all human beings subject to artificial optical radiation.

As the uncertainties of measurements in relation to measurement process with photo-radiometer, it was not performed due to lack of traceability of measurements indicated by the manufacturer certificate of calibration and measurements performed by other entities. However, it proposes to its realization in future work within this framework. The uncertainties of the results of measurements with spectrum-radiometer were partially estimated.

Given the potential of the measuring system, is proposed as future work, applying the standard IEC62478, (part of the EN/IEC62471 application) in the photo-biological effect evaluating of blue light, based on the determination of the correlated color temperature (CCT) of lamp or lamps systems, including luminaries.

The values of irradiance and radiance acquired in assessment processes, both with photo-radiometer as spectrum-radiometer were recorded in Excel file to a CD attached to this work.

Agradecimentos

Agradeço aos responsáveis do IEP, que estiveram direta ou indiretamente envolvidos na realização deste trabalho e que contribuíram para o seu sucesso. Em particular, um agradecimento especial ao Eng.º Esaú Cardoso (orientador e responsável técnico do laboratório de ensaios do IEP), pelo apoio prestado. Agradeço a todos os intervenientes do departamento de física do ISEP, aos diretores do curso e à orientadora Doutora Elizabete Nogueira pelo seu apoio.

Agradeço a todas as outras pessoas, incluindo familiares, colegas e amigos que deram os seus contributos para a realização deste trabalho.

Tabela de Conteúdos

Tabela de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Equações	14
Tabela de Acrónimos	15
Capítulo 1: Introdução	2
1.1 Enquadramento Académico	2
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivos do Trabalho.....	3
1.4 Estrutura do documento	3
1.5 Enquadramento legal.....	4
Capítulo 2: Fontes de luz (LED), radiação ótica e grandezas de medição.....	5
2.1 Radiação ótica artificial, medição radiométrica e fotométrica (norma IEC62471).....	6
2.2 Quantidades radiométricas e fotométricas.....	7
2.2.1 Grandezas radiométricas	8
2.2.2 Grandezas fotométricas.....	11
2.3 Fonte de radiação ótica incoerente	13
2.3.1 LED branco	16
Capítulo 3: Interação da Radiação Ótica com o olho e a pele (Norma EN/IEC62471)19	
3.1 Constituição do olho.....	20
3.1.1 Interação da radiação ótica com o olho.....	21
3.1.1.1 Radiação ultravioleta (UV-C, UV-B, UV-A)	23
3.1.1.2 Radiação visível	24
3.1.1.3 Radiação IR-A, IR-B e IR-C.....	24
3.2 A pele humana.....	25
3.2.1 Interação da radiação ótica com a pele.....	27
3.2.1.1 Radiação ultravioleta (UV-C, UV-B, UV-A)	28
3.2.1.2 Radiação visível	29
3.2.1.3 Radiação IR-A, IR-B e IR-C.....	30

Capítulo 4: Avaliação de uma fonte de luz contínua segundo a norma EN/IEC62471 31

4.1 Princípio base de funcionamento do método de referência.....	31
4.2 Princípio de funcionamento do método alternativo	32
4.3 Fonte versus Detector	34
4.4 Limites de exposição da radiação ótica (olho e pele)	42
4.4.1 Perigo da Radiação Ultravioleta (olho e pele)	43
4.4.2 Perigo da radiação ultravioleta próximo (UV-A) (olho).....	44
4.4.3 Perigo da luz azul (olho)	45
4.4.4 Perigo térmico na retina	47
4.4.5 Perigo da Radiação Infra-Vermelho (olho).....	48
4.4.6 Perigo térmico para a pele	49

Capítulo 5: Avaliação de lâmpadas LED com Foto-radiómetro.....52

5.1 Foto-Radiómetro “ <i>delta ohm HD2402</i> ”	52
5.2 Procedimento de avaliação dos efeitos fotobiológicos com Foto-radiómetro.....	57
5.2.1 ETAPA 1 - Medição de iluminância a 500 lux (distância <i>r</i>)	58
5.2.2 ETAPA 2 - Irradiância e efeitos fotobiológicos	59
5.2.3 ETAPA 3 - Radiância e efeitos fotobiológicos	61
5.2.3.1 Radiância L_B (perigo da luz azul).....	62
5.2.3.2 Radiância L_R (perigo térmico na retina)	64
5.2.4 ETAPA 4 - Classificação e Etiquetagem da fonte de luz (luminária)	66
5.3 Resultados da avaliação de fonte de luz LED (Luminária) com foto-radiómetro	68

Capítulo 6: Comparação de resultados entre foto-radiómetro e espectro-radiómetro69

6.1 Medições realizadas com o Espectro-radiómetro.....	69
6.2 Análise comparativa dos resultados obtidos pelos dois equipamentos	71
6.3 Casos práticos - Medidas realizadas à distância de 200 mm.....	74
6.4 Síntese sobre as incertezas de medições	77

Capítulo 7: Conclusão e Trabalhos Futuros79

7.1 Principais contribuições e reflexões	79
7.2 Trabalhos futuros	80
7.3 Referências bibliográficas	81

Tabela de Figuras

FIGURA 1 - ESPETRO DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	6
FIGURA 2 - FUNÇÃO SENSITIVA DO OLHO HUMANO $V(\lambda)$, ONDE $\lambda_{MAX} = 555 \text{ NM}$	8
FIGURA 3 - ÂNGULO SÓLIDO EM DIFERENTES PERSPECTIVA- A, B	10
FIGURA 4 - IRRADIÂNCIA DA FONTE SOBRE UMA DETERMINADA ÁREA	11
FIGURA 5 - RADIÂNCIA DA FONTE DE UMA DETERMINADA ÁREA	11
FIGURA 6 - ENERGIA LUMINOSA Q_v DE UMA FONTE DE LUZ LED	12
FIGURA 7 - INTENSIDADE LUMINOSA DE UMA FONTE DE LUZ LED	13
FIGURA 8 – LÂMPADAS DE EMISSÃO CONTÍNUA NA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO	14
FIGURA 9 - COMPARAÇÃO DO ESPETRO DE ALGUMAS LÂMPADAS COM O ESPETRO TÍPICO DE UM LED	15
FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÕES DE ENERGIA ESPECTRAL TÍPICA DE LED'S PARA A REGIÃO DO VISÍVEL	16
FIGURA 11 - CURVA DE EMISSÃO ESPECTRAL DE UM LED BRANCO EM COMPARAÇÃO COM A CURVA DE SENSIBILIDADE FOTÓPICA $V(\lambda)$	17
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÕES ESPACIAIS TÍPICAS DA INTENSIDADE LUMINOSA EMITIDA POR UMA VARIEDADE DE LED'S.	18
FIGURA 13 - SECCÃO LONGITUDINAL E VERTICAL DE UM OLHO HUMANO	20
FIGURA 14 - ESTRUTURA BÁSICA DE UM OLHO HUMANO	22
FIGURA 15 - MECANISMOS DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO ÓTICA NO OLHO	22
FIGURA 16 - ESTRUTURA DA PELE HUMANA (EPIDERME E DERME)	26
FIGURA 17 - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO ÓTICA NA PELE	28
FIGURA 18 - MONTAGEM NO MÉTODO DE REFERÊNCIA	31
FIGURA 19 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MÉTODO DE REFERÊNCIA.....	32
FIGURA 20 - MÉTODO ALTERNATIVO – DETERMINAÇÃO DA RADIÂNCIA	33
FIGURA 21 - DISTÂNCIA DE EXPOSIÇÃO ENTRE A FONTE E DETETOR	35
FIGURA 22 - CAMPO DE VISÃO À DISTÂNCIA DE ILUMINAÇÃO DE 500 LUX (OU 200 MM)	35
FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DO F.O.V	36
FIGURA 25 - VARIAÇÃO DO F.O.V COM O TEMPO DE EXPOSIÇÃO	37
FIGURA 26 - RELAÇÃO ENTRE O DIÂMETRO DA PUPILA E A LUMINÂNCIA INCIDENTE NO OLHO.....	37
FIGURA 27 - TAMANHO DA IMAGEM QUE SE FORMA NA RETINA DE ACORDO COM A LUMINÂNCIA	38

FIGURA 28 - FONTE APARENTE E A SUA DIMENSÃO ANGULAR.....	39
FIGURA 29 - RELAÇÃO ENTRE A DIMENSÃO DA FONTE APARENTE A E A ÁREA DA RETINA	39
FIGURA 30 – CURVA DE PONDERAÇÃO ESPETRAL $S(\lambda)$, DO PERIGO ACTÍNICO UV PARA O OLHO E PELE	44
FIGURA 31 - FUNÇÃO DE PONDERAÇÃO ESPETRAL $B(\lambda)$ DO PERIGO DA LUZ AZUL (OLHO)	45
FIGURA 32 - FUNÇÃO DE PONDERAÇÃO ESPETRAL $R(\lambda)$, DE PERIGO TÉRMICO NA RETINA (OLHO E PELE).....	48
FIGURA 33 - FOTO-RADIÓMETRO <i>DELTA OHM HD2402</i>	52
FIGURA 34 - FOTO-RADIÓMETRO <i>DELTA OHM HD2402</i> E LEGENDA DA FIGURA.....	53
FIGURA 35 - CURVAS DE PONDERAÇÃO ESPETRAIS $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ $R(\lambda)$ DE UM FOTO-RADIÓMETRO E $V(\lambda)$	54
FIGURA 36 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA DE RESPOSTA ESPETRAL OBTIDA PELA COMBINAÇÃO DOS SENSORES (COR VIOLETA) E AS CURVAS DE PONDERAÇÃO ESPETRAL (COR PRETA): A) $S(\lambda)$; B) $B(\lambda)$ E C) $R(\lambda)$	55
FIGURA 37 - FONTE DE LUZ LED UTILIZADA NO PROCESSO DE MEDIÇÃO (MÓDULO COM 12 LED's).....	56
FIGURA 38 - FONTE DE LUZ -DISSIPADOR DE CALOR	56
FIGURA 39 - ACESSÓRIOS DE APOIO À MEDIÇÃO DA RADIANCIA DA FONTE (TRIPÉ, FITA MÉTRICA, CARTOLINA PRETA, COMPASSO E X-ATO).....	57
FIGURA 40 – RESUMO DO PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO FOTOBiolÓGICA	58
FIGURA 41 - PAINEL FRONTAL DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO (500 LUX)	59
FIGURA 42 PROCESSO DE MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA PARA O CÁLCULO DA RADIANCIA DO EFEITO DA LUZ AZUL.....	63
FIGURA 43 - PROCESSO DE MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA PARA O CÁLCULO DA RADIANCIA NO PERIGO TÉRMICO NA RETINA	66
FIGURA 44 – IRRADIANCIA TOTAL OBSERVADA NA AVALIAÇÃO DA LUZ AZUL COM ESPECTRO-RADIÓMETRO	74
FIGURA 45 - MEDIÇÃO DO EFEITO DA RETINA TÉRMICA À DISTÂNCIA DE 200 MM	74

Lista de Tabelas

TABELA 1: ESPETRO ELETROMAGNÉTICO DA RADIAÇÃO ÓTICA	7
TABELA 2: EFEITOS FOTOBIOLOGICOS NA PELE E OLHO DEVIDO À EXPOSIÇÃO EXCESSIVA À RADIAÇÃO ÓTICA	19
TABELA 3: CAMADAS CONSTITUINTES DA PELE HUMANA.....	27
TABELA 5: LIMITE DE EXPOSIÇÃO PARA A PELE E OLHO SEGUNDO A NORMA IEC62471.....	51
TABELA 6: FOTO-RADIÓMETRO (CARACTERÍSTICAS DOS CANAIS)	55
TABELA 7: EFEITOS FOTOBIOLOGICOS BASEADOS EM VALORES DE IRRADIÂNCIA	60
TABELA 8: VALORES DE IRRADIÂNCIA DOS EFEITOS FOTOBIOLOGICOS (ACTÍNICO UV, UV-A – OLHO E PELE E TÉRMICO NA PELE)	61
TABELA 9: EFEITOS FOTOBIOLOGICOS BASEADOS EM VALORES DA RADIANCIA	61
TABELA 10 : RISCO DA LUZ AZUL - VALORES OBTIDOS NA MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA E USADOS NO CÁLCULO DA RADIANCIA L_B DA LUZ AZUL	63
TABELA 11: RISCO TÉRMICO NA RETINA - VALORES OBTIDOS NA MEDIÇÃO DA IRRADIÂNCIA E USADOS NO CÁLCULO DA RADIANCIA L_R DO PERIGO TÉRMICO NA RETINA.....	65
TABELA 12: GRUPOS DE RISCO FOTOBIOLOGICO EM LÂMPADAS E SISTEMAS DE LÂMPADAS	67
TABELA 13: ETIQUETAGEM DE LÂMPADAS E SISTEMAS DE LÂMPADAS	67
TABELA 14: LIMITE DE EMISSÃO EM LÂMPADAS CONTÍNUAS PARA GRUPOS DE RISCO FOTOBIOLOGICO	68
TABELA 15: RESULTADOS OBTIDOS PELO FOTO-RADIÓMETRO – MÉTODO ALTERNATIVO	68
TABELA 16: RESULTADOS OBTIDOS COM ESPECTRO-RADIÓMETRO – EQUIPAMENTO DE REFERÊNCIA	70
TABELA 17: RESULTADOS OBTIDOS PELOS DOIS EQUIPAMENTOS NA AVALIAÇÃO DA MESMA FONTE DE LUZ.....	72
TABELA 18: RESULTADOS DE CASOS PRÁTICOS A DISTÂNCIA DE 200 MM	76
TABELA 19: EXEMPLO DA CALIBRAÇÃO DO FOTO-RADIÓMETRO HD2402.....	77
TABELA 20: EXTRATO DE CALIBRAÇÃO DO ESPECTRO-RADIÓMETRO.....	78

Lista de Equações

EQUAÇÃO 1	9
EQUAÇÃO 2	9
EQUAÇÃO 3	10
EQUAÇÃO 4	10
EQUAÇÃO 5	11
EQUAÇÃO 6	12
EQUAÇÃO 7	12
EQUAÇÃO 8	13
EQUAÇÃO 9	13
EQUAÇÃO 10	33
EQUAÇÃO 11	33
EQUAÇÃO 12	34
EQUAÇÃO 13	34
EQUAÇÃO 14	42
EQUAÇÃO 15	42
EQUAÇÃO 16	43
EQUAÇÃO 17	43
EQUAÇÃO 18	44
EQUAÇÃO 19	45
EQUAÇÃO 20	46
EQUAÇÃO 21	46
EQUAÇÃO 22	46
EQUAÇÃO 23	46
EQUAÇÃO 24	46
EQUAÇÃO 25	47
EQUAÇÃO 26	47
EQUAÇÃO 27	48

EQUAÇÃO 28	49
EQUAÇÃO 29	49
EQUAÇÃO 30	49
EQUAÇÃO 31	62
EQUAÇÃO 32	62

Tabela de Acrónimos

ADN	Ácido desoxirribonucleico		
CCT	Temperatura de cor correlacionada	GE	General Electric
CE	Comunidade Europeia	GLS	General Lighting Service
EL	Exposition Limit	HID	Alta Intensidade de Descarga
EN	Norma Europeia	IR	Radiação infravermelha
F.O.V	Field of View	IR-A	Radiação Infravermelho próximo
IEC	International Electrotechnical Commission	LED	Light Emitting Diode
IEP	Instituto Electrotécnico Português	P.	Pequena
IR-B	Radiação Infravermelho média	UV	Ultravioleta
IR-C	Radiação Infravermelho longe	UV-A	Ultravioleta próximo
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto	UV-B	Ultravioleta médio
t.e.v.	térmica, estímulo visual	UV-C	Ultravioleta longínquo

Capítulo 1: Introdução

1.1 Enquadramento Académico

A realização deste trabalho pertence ao âmbito da disciplina de Dissertação, Projeto, Estágio Profissional, do segundo ano do Mestrado de Engenharia em Instrumentação e Metrologia do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O trabalho foi realizado (com visitas previamente estabelecidas), nas instalações do Instituto Electrotécnico Português, localizado em Matosinhos, sob a orientação do Engenheiro Esaú Cardoso, responsável técnico do Laboratório de ensaios daquela Instituição e com a orientação, da Doutora Elisabete Nogueira professora do departamento de física do Instituto Superior de Engenharia do Porto, na escrita da dissertação.

1.2 Motivação

A proposta apresentada pelo IEP foi bastante motivadora, uma vez que permitia que os conhecimentos teóricos abordados ao longo do percurso académico nomeadamente nas disciplinas de instrumentação e metrologia ótica fossem aplicados na experiência laboratorial profissional.

A possibilidade de realizar um projeto num ambiente empresarial de qualificada excelência, com todas as condições necessárias para o cumprimento dos objetivos traçados bem como a aprendizagem da relação interpessoal, contribuiu de forma decisiva na escolha deste projecto.

O facto de que os resultados da avaliação dos efeitos fotobiológicos na pele e olho, pudessem servir de referência para outras instituições, criou em mim entusiasmo para abraçar este projeto, que considero ser de grande importância para a sociedade.

1.3 Objetivos do Trabalho

- Desenvolvimento de um procedimento de medição baseado num foto-radiómetro multicanal em alternativa à utilização do equipamento de referência (espectro-radiómetro) para avaliação dos efeitos fotobiológicos resultantes da utilização de fontes de emissão contínua com base na directiva 2006/95/CE de 12 de Dezembro;
- Realização da comparação entre os dois equipamentos sob as mesmas condições de avaliação das fontes de luz;
- Escrita deste texto como um guia referencial para consulta de outras entidades, no que respeita à análise e avaliação dos efeitos fotobiológicos;

1.4 Estrutura do documento

Este trabalho está estruturado em sete capítulos distintos. A introdução, o âmbito académico, a motivação, os objetivos e enquadramento legal do projeto estão descritos no primeiro capítulo. O segundo capítulo introduz o estado da arte do tema em questão, abordando o domínio da aplicação da norma, conceitos relacionados com a radiação ótica artificial, as grandezas de medição radiométricas e fotométricas, as fontes e algumas das suas características mais relevantes no contexto. O capítulo três aborda a constituição do olho e pele bem como os mecanismos de a interação com a radiação ótica artificial.

No capítulo quatro refere-se aos métodos de referência e alternativo, aborda-se a relação entre a fonte e o detetor dos equipamentos de medição e, descreve teoricamente os mecanismos de cálculo dos limites de exposição de todos os efeitos fotobiológico em estudo. O capítulo cinco descreve de forma detalhada o foto-radiómetro e as diferentes etapas do procedimento de medição dos perigos fotobiológicos e apresenta os resultados por esse equipamento.

Já no capítulo seis, indica-se os resultados obtidos pelo espectro-radiómetro fazendo a comparação dos mesmos com os resultados obtidos pelo foto-radiómetro. Ainda no capítulo seis, apresenta-se um caso prático de medição à distância de 200 mm e, por último faz-se uma breve síntese das incertezas de

medições. As contribuições e reflexões, trabalhos futuros e referências bibliográficas são abordados no sétimo capítulo sobre a conclusão.

1.5 Enquadramento legal

O desenvolvimento deste trabalho teve como principal referência bibliográfica a diretiva 2006/95/CE do parlamento europeu relativa à harmonização da legislação sobre material elétrico destinado a ser utilizado dentro de certos limites de tensão (baixa tensão) e a diretiva 2006/25/CE de 5 de Abril de 2006 relativa às prescrições mínimas de saúde e segurança em matéria de exposição dos trabalhadores aos riscos devidos a agentes físicos (radiação ótica não coerente). Os principais objetivos de segurança do referido material elétrico constam no Anexo I da própria diretiva.

As orientações para as pesquisas teóricas e procedimentos técnicos estão contidas nos seguintes documentos:

- Norma EN/IEC62471 (1ª edição 2006-07) - documento desenvolvido pela comissão internacional de eletricidade e adotado legalmente pela comunidade europeia no que respeita à segurança fotobiológica de lâmpadas e sistemas de lâmpadas (incluindo luminárias);
- Norma IEC62471-2 (parte 2 da IEC62471) – documento que descreve as orientações sobre os requisitos de fabricação relativos à segurança da radiação ótica de fontes não coerentes (não-lasers);
- Norma IEC624778 baseada no IEC62471 – documento de avaliação do risco da luz azul emitida por fontes de luz contínua e sistemas de iluminação;
- Guia não vinculativo da radiação ótica no âmbito da diretiva 2006/25/CE, (AOR-Guide);
- Lista de publicações de normas harmonizadas no âmbito da diretiva 2011/C256/01 (ou 2013/C255/01).

Capítulo 2: Fontes de luz (LED), radiação ótica e grandezas de medição

O homem está constantemente sob exposição da radiação proveniente de fontes de luz natural (sol) e fontes de luz artificial como lâmpadas de iluminação domésticas, LED's dos computadores, televisores, grandes sistemas de iluminação contendo lâmpadas ou LED's nas indústrias e instituições onde trabalham. A estas radiações, que incluem radiações ultravioletas, visíveis e infravermelhas, estão associados os efeitos fotobiológicos para os olhos e pele. Se as regras de segurança não se cumprirem, poderão originar graves danos como por exemplo o cancro da pele e a lesão da córnea. Na maioria das vezes estamos expostos a essas radiações sem nos apercebermos dos perigos a que estamos sujeitos. Com o avanço das novas tecnologias de investigação, com o desenvolvimento de aparelhos sofisticados e procura crescente de melhor qualidade de vida e de condições de trabalho, o homem sujeita-se à exposição da radiação de fontes de luz artificial. É imprescindível uma avaliação rigorosa, no sentido de garantir a segurança e preservar a saúde de todos os indivíduos, através da realização da medição da radiação em ambiente adequado com instrumentos sofisticados e técnicos especializados.

A norma IEC62471 fornece orientações para avaliação de segurança fotobiológica de lâmpadas e sistemas de lâmpadas, incluindo luminárias. Especifica essencialmente o seguinte:

- O limite de exposição;
- As técnicas de medição de referência e alternativa;
- Classificação e etiquetagem no âmbito da avaliação e controlo dos riscos fotobiológicos da radiação ótica (fontes elétricas incoerentes de banda larga (200 nm e 3000 nm)) incluindo LED's.

Este trabalho faz a avaliação de uma fonte de lâmpadas LED segundo as diretrizes da referida norma. Neste capítulo abordam-se os conceitos teóricos que caracterizam as fontes emissão de radiação contínua (fontes LED) com relevância ao espectro da radiação ótica e às quantidades radiométricas e fotométricas usadas na medição da radiação.

2.1 Radiação ótica artificial, medição radiométrica e fotométrica (norma IEC62471)

A aplicação da norma IEC62471 e diretiva 2006/95/CE implica o conhecimento de diferentes conceitos relativos às medições da radiação ótica artificial.

A diretiva 2006/25/CE define os limites de exposição que cobrem o espectro de comprimentos de onda entre 200 e 3000 nm para fontes de radiação ótica não coerentes e de 180 nm a 1 mm para radiações laser (coerentes). Esses limites estão definidos mais à frente neste relatório.

O atual conhecimento sobre o espectro da radiação eletromagnética diz-nos que se estende desde as ondas rádio aos raios gama. A radiação visível, pequena parte deste espectro, inclui diferentes comprimentos de onda que correspondem a diferentes cores do violeta ao vermelho. Os comprimentos de onda mais curtos estão situados numa das extremidades do espectro da luz visível (luz violeta) e os mais longos na outra extremidade (luz vermelha) conforme mostra a figura 1 que se segue.

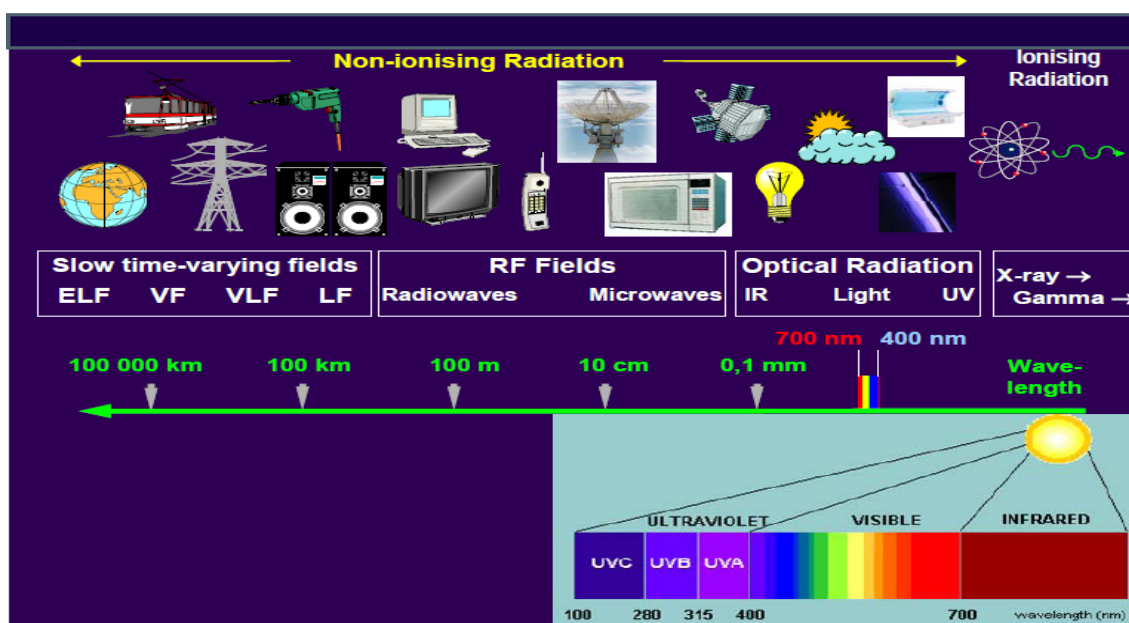


Figura 1 - Espectro da radiação eletromagnética

[1] Algumas porções invisíveis do espectro eletromagnético são incluídas no termo "radiação ótica" e situam-se nas regiões do espectro de ultravioleta e

infravermelho. Embora não podendo ser vistas (a retina não possui detetores para estes comprimentos de onda), estas radiações podem penetrar no olho em maior ou menor quantidade.

De acordo com a diretiva 2006/25/CE, o espectro da radiação ótica divide-se em radiação ultravioleta (UV), radiação visível e radiação infravermelha (IR), em diferentes gamas de comprimentos de onda conforme indica a tabela 1.

Tabela 1: Espectro eletromagnético da radiação ótica

Radiação UV	Radiação visível	Radiação IR
UV-A: 315 – 400 nm	380 – 780 nm	IR-A: 780 – 1400 nm
UV-B: 280 – 315nm		IR-B: 1400 – 3000 nm
UV-C: 100 – 280nm		IR-C: 3000 – 1 mm

Em ótica é habitual representar os espectros dos sinais e as larguras de banda não em termos de frequências mas sim em termos de comprimentos de onda. A relação entre a frequência f e o comprimento de onda λ de uma radiação ótica é dada pela expressão $\lambda f=c$ em que c representa a velocidade da luz no vazio.

2.2 Quantidades radiométricas e fotométricas

[2] No que diz respeito à medição da radiação ótica fala-se de fotometria que é o ramo da ótica que estuda os fenómenos energéticos associados às radiações luminosas. Existem duas formas de abordar a fotometria:

- Fotometria energética ou radiometria quando se consideram apenas métodos físicos de medição, independentes da perceção visual humana;
- Fotometria visual ou fotométrica quando se tem em conta a impressão visual produzida pela radiação.

Toda a quantidade radiométrica é análoga a uma fotométrica. Para as quantidades radiométricas, a radiação é avaliada em unidades de energia e para

as quantidades fotométricas a radiação é ponderada em função da resposta fotópica do olho humano.

Quando a radiação ótica é detetada por um aparelho de medição, a quantidade medida é uma grandeza radiométrica, e quando se inclui a sensibilidade da vista humana à radiação, fala-se de grandeza fotométrica.

De acordo com a Figura 2, o olho humano tem maior sensibilidade à cor verde ($\lambda_{max}= 555 \text{ nm}$) para a luz diurna. Normalmente é designada de visão fotópica, que é a sensibilidade do olho humano em condições de luminosidade que permitem distinguir cores. Relativamente à luz noturna, essa designação é denominada de visão escotópica, que é a visão produzida pelo olho em condições de baixa luminosidade.

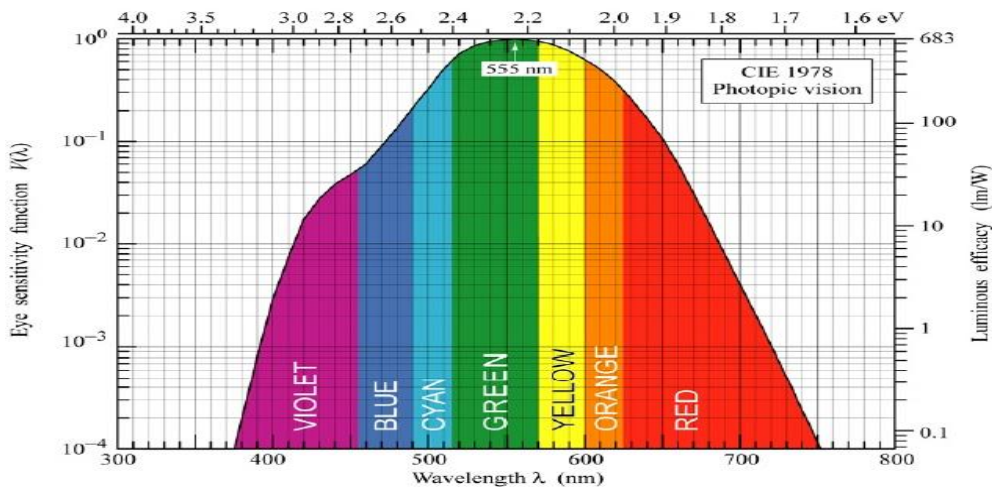


Figura 2 - Função sensitiva do olho humano $V(\lambda)$, onde $\lambda_{max}= 555 \text{ nm}$ [2]

2.2.1 Grandezas radiométricas

Quando a radiação eletromagnética interage com um tecido humano, a transferência de energia no ponto ou superfície de interação pode dar origem a alguns fenómenos físicos. Por exemplo, a luz visível que atinge a retina transfere energia suficiente para desencadear reações bioquímicas que geram um sinal que é enviado através do nervo ótico para o cérebro (visão).

A quantidade de energia disponível nestas interações depende do tipo de radiação (ultravioleta, visível e infravermelha) e da sua intensidade. Como já foi

mencionado anteriormente, a energia de uma radiação eletromagnética depende do comprimento de onda, ou seja, quanto mais curto é o comprimento de onda, mais energética é a radiação. Assim, a luz azul é mais energética do que a luz verde que, por sua vez, é mais energética do que a luz vermelha. O comprimento de onda da radiação determina o grau com que a radiação penetra e interage com os tecidos humanos (olho e pele). Por exemplo, a radiação na gama ultravioleta próximo (UV-A) apesar de ser mais enérgica do que qualquer comprimento de onda visível, é transmitida para a retina de forma menos eficiente do que a luz verde.

De acordo com a norma IEC62471, as grandezas radiométricas estão definidas no texto seguinte.

Energia radiante Q_e – É o tempo integral da energia radiante ou fluxo radiante ϕ_e ao longo de um determinado período de tempo Δt . É expressa em joule (J) pela equação 1.

Equação 1

$$Q_e = \int_0^t \phi_e \cdot dt$$

Potência radiante (Fluxo energético) ϕ_e - Potência emitida, transmitida ou recebida sob a forma de radiação. A sua unidade é watt (W) na equação 2 (derivada da energia radiante Q_e em ordem ao tempo).

Equação 2

$$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Intensidade radiante I_e - Potência radiante emitida ou recebida, por unidade de ângulo sólido. Exprime-se em “watt por esterradiano” (W/sr) na equação 3.

Equação 3

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}$$

Ângulo Sólido Ω - Ângulo que é calculado pela expressão A/r^2 onde A é a área interceptada sobre a superfície de uma esfera de raio r centrada sobre o vértice do cone. A figura 3 ilustra o ângulo sólido. É um número que representa quantas vezes a área é maior que o quadrado do raio.

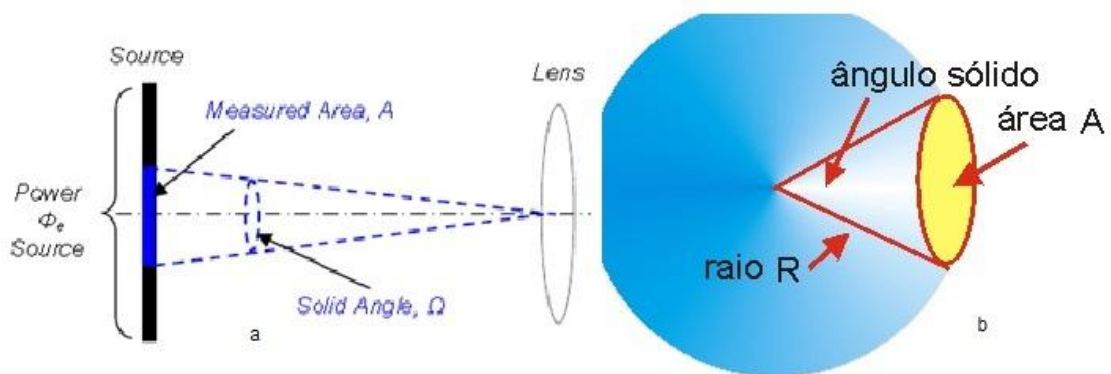


Figura 3 - Ângulo sólido em diferentes perspectiva- a, b [3]

Irradiância E_e (num ponto de uma superfície) - Potência radiante por unidade de área (que contém o ponto) cuja unidade é ($W.m^{-2}$). A figura 4 refere-se a uma irradiância incidente.

Equação 4

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dA}$$

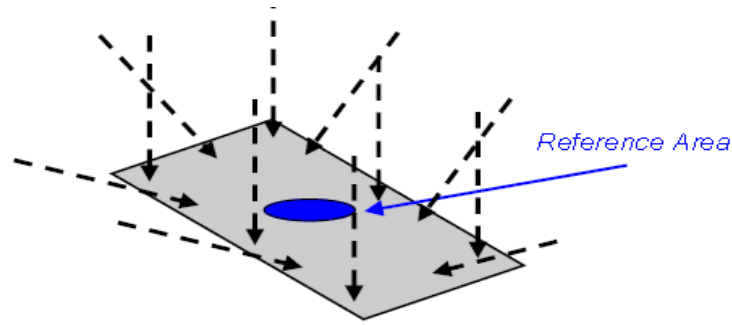


Figura 4 - Irradiância da fonte sobre uma determinada área [3]

Radiância L_e – irradiância emitida ou recebida, por unidade de ângulo sólido, numa certa direção, definida pela equação 5.

Equação 5

$$L_e = \frac{d\phi_e}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}$$

Onde $d\Phi_e$ é o fluxo radiante transmitido por um feixe elementar que passa através de um dado ponto, propagando-se no ângulo sólido $d\Omega$, que contém a dada direção; dA é a área de uma secção com um certo raio que contém o ponto; θ é o ângulo entre a normal da referida secção e a direção do feixe. Vem expressa em ($W/m^2 \cdot sr$) e a figura 5 seguinte ilustra a sua definição.

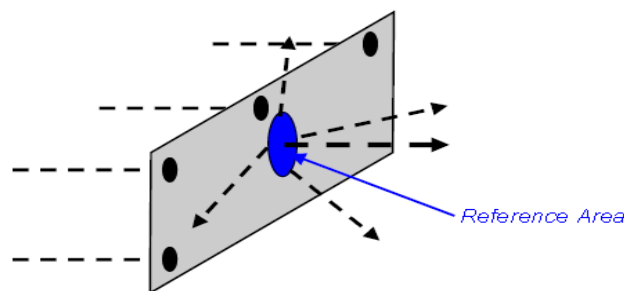


Figura 5 - Radiância da fonte de uma determinada área[3]

2.2.2 Grandezas fotométricas

As medições em fotometria visual estão limitadas ao espectro das radiações eletromagnéticas na região do visível que para um observador médio se

encontra compreendido, como referido na tabela 1, entre os comprimentos de onda de $\lambda_{min} = 380 \text{ nm}$ e $\lambda_{max} = 780 \text{ nm}$.

De acordo com a referida norma, as grandezas fotométricas utilizadas no comprimento de onda da luz verde ($\approx 555 \text{ nm}$) são descritas nos textos que se seguem.

Energia luminosa Q_v - quantidade de energia visível que atravessa uma determinada fronteira. Pode ser emitida ou recebida por um corpo ou simplesmente atravessar essa fronteira (superfície). A energia luminosa ou fluxo luminoso exprime-se em Im.s. A figura 6 mostra a energia luminosa de uma fonte de luz LED.

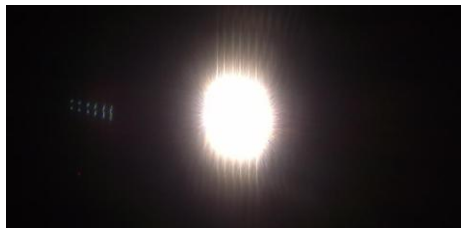


Figura 6 - Energia luminosa Q_v de uma fonte de luz LED

Fluxo luminoso (potência luminosa) ϕ_v - energia luminosa por unidade de tempo. Exprime-se em Im (lúmen).

Equação 6

$$\phi_v = \frac{dQ_v}{dt}$$

Intensidade luminosa I_v - fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido. Exprime-se em candela (cd) e definida pela equação 7. A figura 7 ilustra a intensidade luminosa.

Equação 7

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

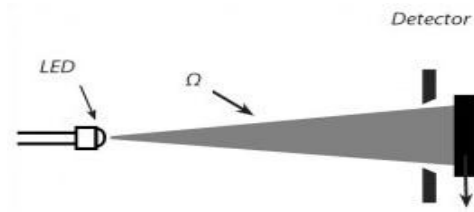


Figura 7 - Intensidade luminosa de uma fonte de luz LED [4]

Iluminância (iluminação) E_v - fluxo luminoso emitido por unidade de superfície. Exprime-se em lux (lx) sendo um lux igual a um lúmen/m².

Equação 8

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA}$$

Luminância L_v (numa dada direcção, num dado ponto de uma superfície real ou fictícia) – Intensidade luminosa por unidade de área numa determinada direcção, definida pela equação 9, em cd·m⁻².

Equação 9

$$L_v = \frac{d\phi_v}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}$$

Onde $d\phi_v$ é o fluxo luminoso transmitido por um feixe elementar que passa por um dado ponto de uma superfície e se propaga num ângulo sólido $d\Omega$ que contém uma dada direcção; dA é a área de uma secção daquele feixe que contém o ponto, θ é o ângulo entre a normal à secção e a direcção do feixe.

2.3 Fonte de radiação ótica incoerente

Uma fonte de radiação ótica é caracterizada pela sua potência radiante, diagrama de radiação, rendimento, espectro de frequências e coerência.

Segundo o regulamento harmonizado para o *Ecodesign* (2009/125/CE) [8], outras características técnicas são consideradas como requisitos da conceção ecológica, tal como: a eficácia da fonte luminosa, o fator da conversão do fluxo luminoso da lâmpada, o fator de sobrevivência da lâmpada, a cromacidade, o fluxo luminoso, a temperatura de cor correlacionada, a restituição de cores e a classificação de proteção contra elementos exteriores.

[5] As fontes incoerentes dividem-se em fontes com espectro de linhas, quando emitem a maior parte da sua radiação em comprimentos de onda discretos que correspondem às características de emissão espectral dos átomos ou iões excitados, e fontes de emissão contínua, quando a emissão de luz é efetuada numa ampla gama espectral em que a intensidade radiante varia com o comprimento de onda.

O diagrama que está representado na figura 8 destaca algumas fontes de emissão contínua referenciadas pela indústria de iluminação incluindo as lâmpadas de alta intensidade de descarga HID (modo de funcionamento das lâmpadas de xénon). Outras fontes incoerentes são por exemplo as lâmpadas de filamento de tungsténio, lâmpadas de sódio entre outras conforme o referido diagrama.

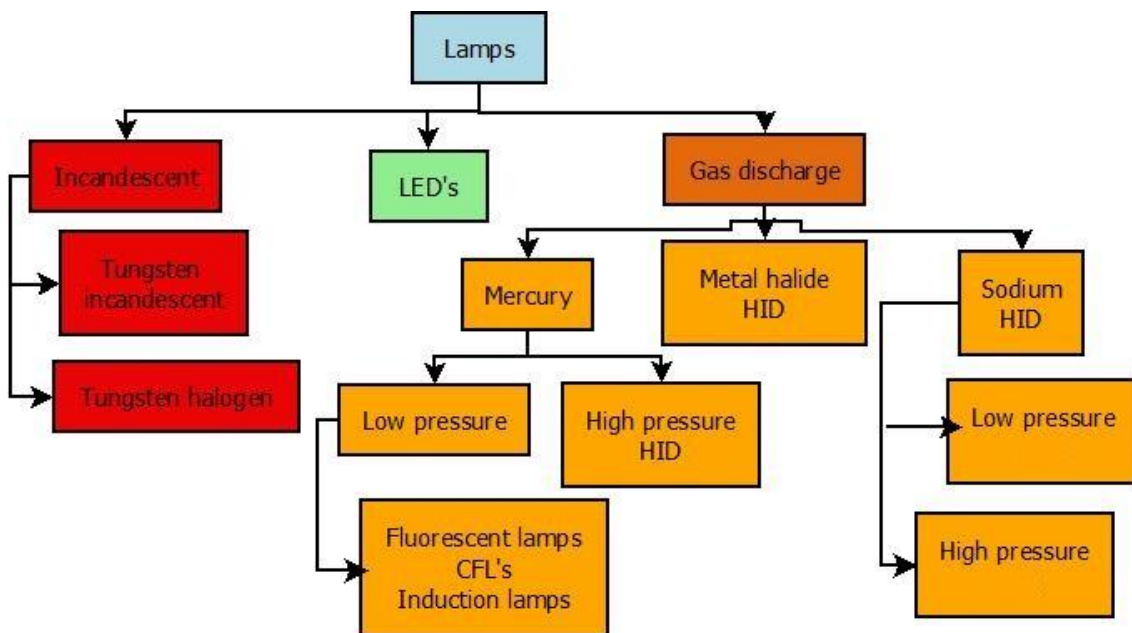


Figura 8 – Lâmpadas de emissão contínua na indústria de iluminação [6]

[9] O uso da tecnologia LED na indústria de iluminação é um fenómeno relativamente novo, principalmente porque só nos últimos anos é que estes dispositivos se tornaram disponíveis.

A iluminação em geral exige o uso da luz branca e efeitos de iluminação sendo por isso uma área onde a iluminação LED conquistou um lugar importante. Os efeitos de iluminação relacionam-se com a cor e obtêm-se por um processo de mistura de aditivos dos LED's vermelho, verde e azul.

O LED é um dispositivo semicondutor feito a partir de uma combinação química de semicondutores polarizados. A composição química é escolhida para definir a energia dos eletrões que passam através da fronteira entre os dois tipos de semicondutores a qual é convertida em luz. A energia dos eletrões define o comprimento de onda da cor da luz emitida.

De acordo com os objetivos definidos para este trabalho, a fonte de luz sob avaliação quanto aos efeitos fotobiológicos na pele e olho é um sistema de lâmpadas LED. Neste âmbito, apresentam-se os aspectos mais relevantes sobre fontes de luz incoerentes (LED, com particular interesse os LED's de luz branca) que são a distribuição espectral e espacial.

A figura 9 permite observar a distribuição espectral na região do visível de algumas fontes de luz, permitindo compará-las com a da fonte LED. As lâmpadas incandescentes e os LED's apresentam espectros contínuos, ao contrário das lâmpadas fluorescentes que emitem num conjunto de bandas discretas em diferentes comprimentos de onda.

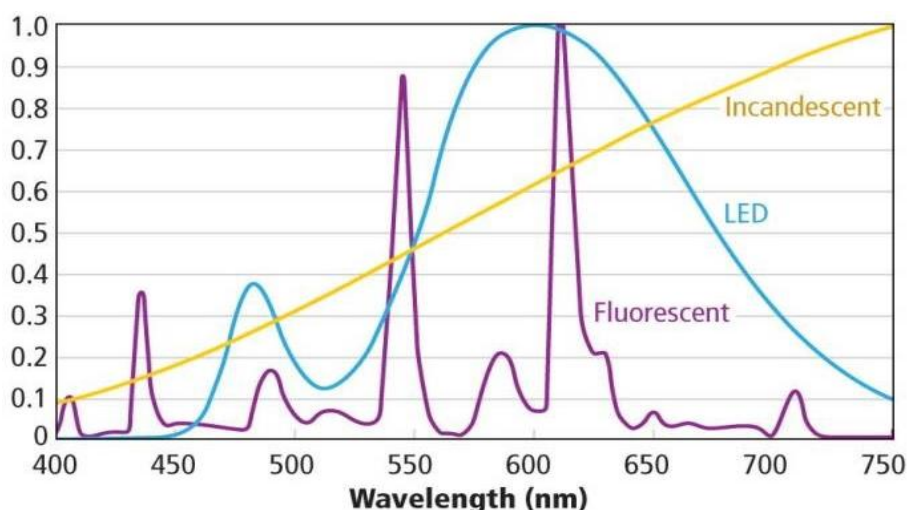


Figura 9 - Comparação do espectro de algumas lâmpadas com o espectro típico de um LED [7]

A distribuição de energia espectral dos LED's típicos de cor única não é monocromática (como emitida pelo laser) nem de banda larga (como das lâmpadas incandescentes), mas algo entre os dois (quase monocromática), com uma largura de banda espectral de algumas dezenas de nanômetros. A figura 10 que se segue ilustra um exemplo da distribuição espectral típica dos LED's para a região do visível.

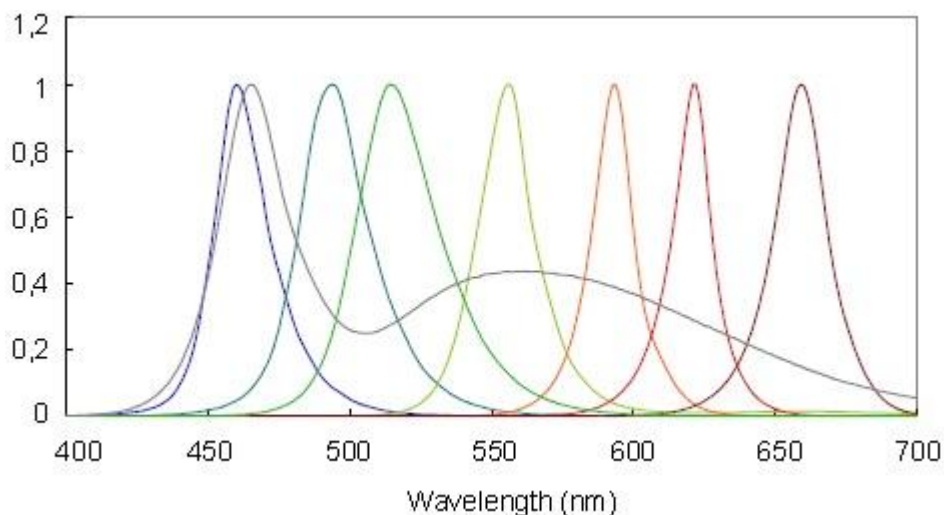


Figura 10 - Distribuições de energia espectral típica de LED's para a região do visível.

2.3.1 LED branco

Os LED's utilizados nos processos de medição realizados no âmbito da avaliação dos efeitos fotobiológicos neste trabalho foram os LED's brancos. Atualmente pode dizer-se que a sua utilização superou o mercado de iluminação (industrial e doméstico) face às tecnologias tradicionais devido à sua alta eficiência, baixo consumo energético, elevado tempo de vida útil e ainda uma maior segurança fotobiológica (olhos e pele).

[10] O LED branco foi desenvolvido por engenheiros da *General Electric (GE)* e emite luz de vários comprimentos de onda que constituem a luz branca.

O fósforo depositado em cima do material semiconductor de um LED ultravioleta faz conversão da luz UV para luz branca, como uma lâmpada fluorescente comum. Outros pigmentos podem ser adicionados para fazer diversos tipos de luz que normalmente não se encontram em LED's. A figura 11 apresenta a curva

de emissão espectral de um LED branco em relação à curva da sensibilidade fotópica $v(\lambda)$.

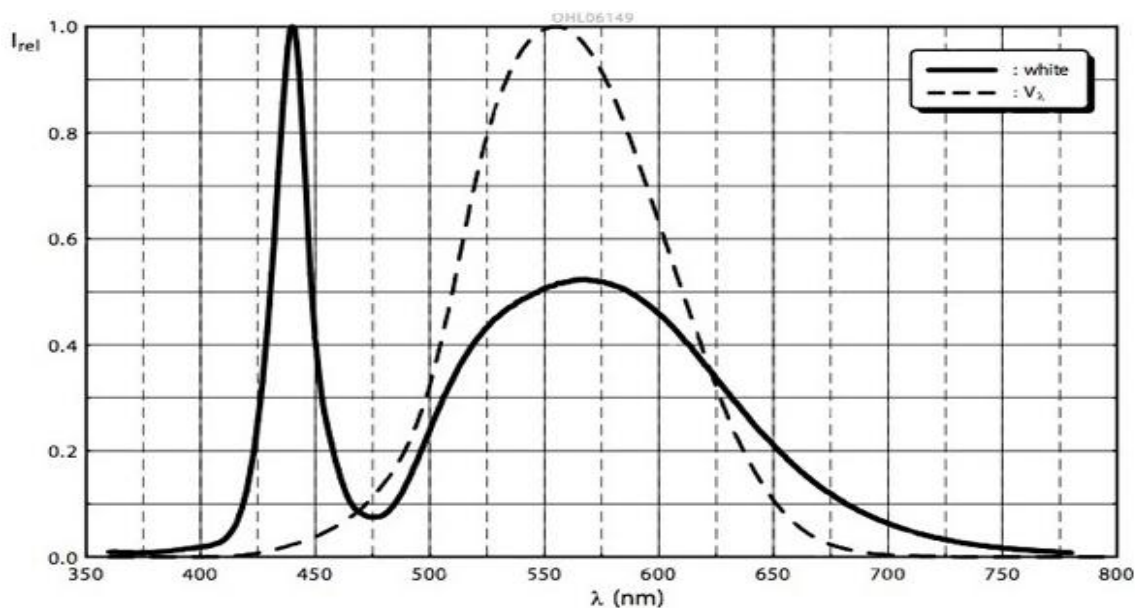


Figura 11 - Curva de emissão espectral de um LED branco em comparação com a curva de sensibilidade fotópica $v(\lambda)$

[9] O LED é um chip semicondutor montado dentro de uma embalagem que o protege durante a operação. Esta embalagem frequentemente altera a distribuição espacial da energia radiante emitida a partir do chip.

A figura 12 ilustra distribuições espaciais de intensidades luminosas de diferentes LED's. Este facto mostra a dificuldade na definição e caracterização de um método de medição da referida grandeza.

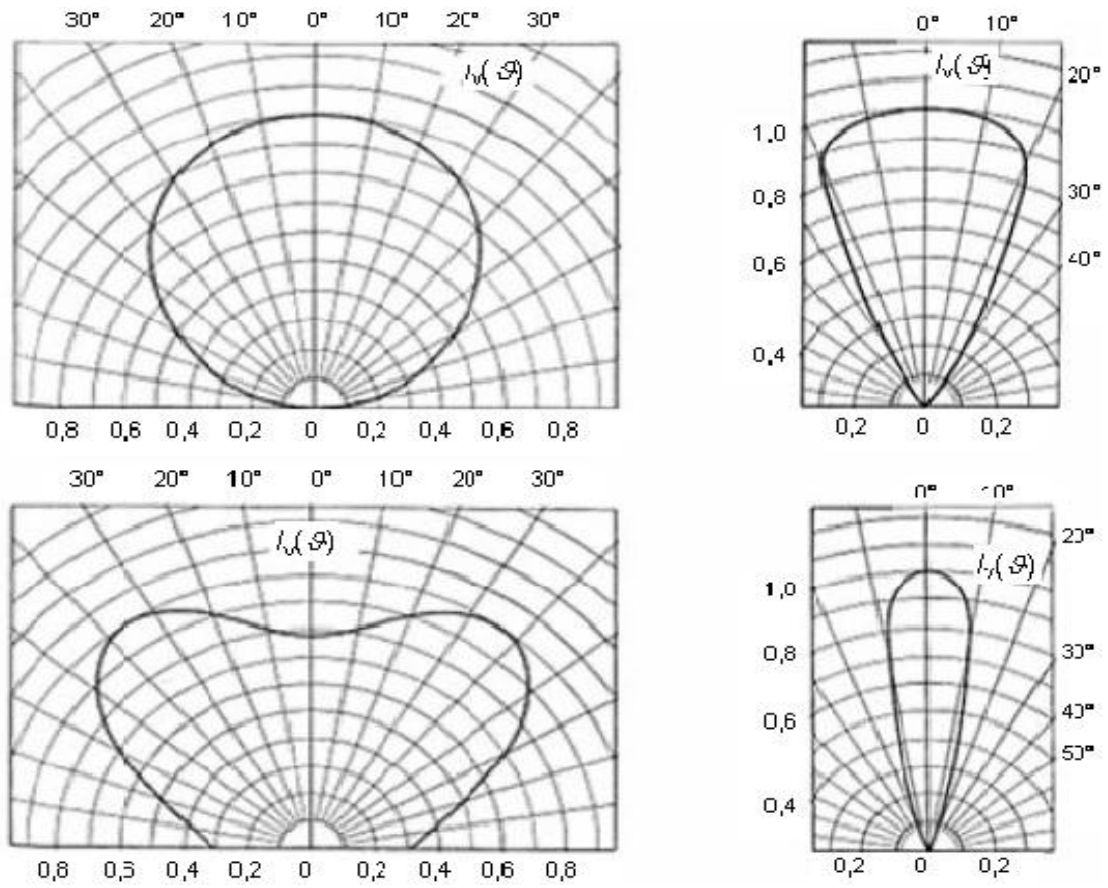


Figura 12 - Distribuições espaciais típicas da intensidade luminosa emitida por uma variedade de LED's.

Capítulo 3: Interação da Radiação Ótica com o olho e a pele (Norma EN/IEC62471)

Neste capítulo, são considerados os perigos fotobiológicos relacionados com o olho e a pele. A norma IEC/EN62471 estabelece uma relação entre as grandezas óticas, o efeito que produz na pele e olho bem como os limites máximos de exposição.

Para uma melhor compreensão deste assunto, descreve-se a constituição do olho e da pele e alguns dos seus mecanismos de funcionamento.

Segundo o guia diretiva 2006/25/CE, os efeitos fotobiológicos no olho e na pele originados pela exposição à radiação com comprimentos de onda na região do ultravioleta, visível e infravermelho estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2: Efeitos fotobiológicos na pele e olho devido à exposição excessiva à radiação ótica

Comprimento de onda	Gama espectral	Efeitos no Olho	Efeitos na Pele
100-280 nm	UV-C	Foto-queratite Foto-conjuntivite	Eritema Cancro da pele
280 – 315 nm	UV-B	Foto-queratite Foto-conjuntivite Catarata	Eritema Elastosis (fotoenvelhecimento) Cancro da pele
315 – 400 nm	UV-A	Foto-queratite Foto-conjuntivite Catarata Danos foto-retinal	Eritema Elastosis (fotoenvelhecimento) Escurecimento imediato de pigmentos Cancro da pele
380 – 780 nm	Visível	Danos foto-retinal (Perigos da luz azul) Queimadura da retina	Queimadura
780 – 1400 nm	IR-A	Catarata Queimadura da retina	Queimadura
1400 – 3000 nm	IR-B	Catarata	Queimadura
3000 – 106 nm	IR-C	Queimadura da córnea	Queimadura

3.1 Constituição do olho

[11] O olho é um sistema constituído por uma lente convergente, o cristalino, que recebe a luz de objetos exteriores e produz uma imagem real dos mesmos sobre uma região sensível à luz, designada de retina. A figura 13 representa esquematicamente o interior do olho segundo uma secção longitudinal e vertical.

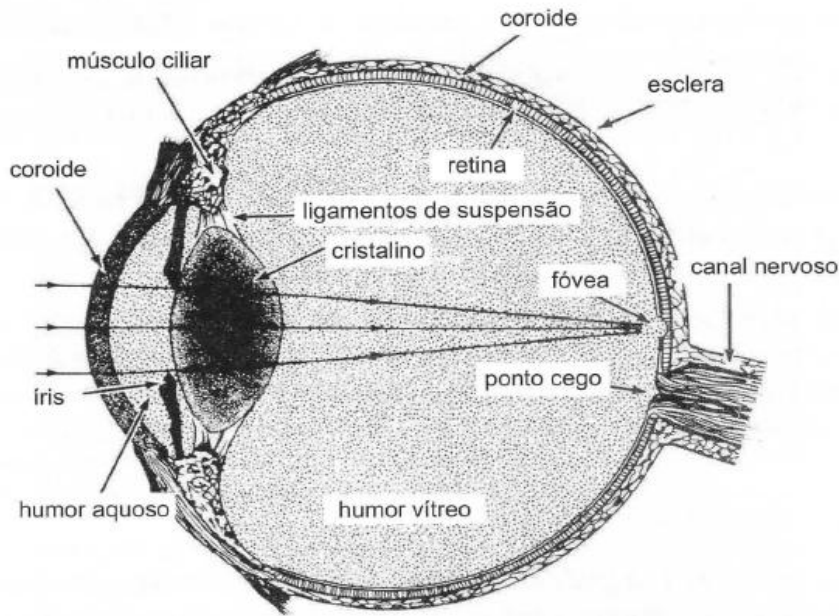


Figura 13 - Secção longitudinal e vertical de um olho humano

O globo ocular (olho) é aproximadamente esférico, com um diâmetro de 22 a 24 mm. A sua parte exterior, opaca e branca, designada de esclera ou esclerótica tem uma função de proteção. Imediatamente a seguir à esclera existe uma camada designada de coróide, a qual é constituída fundamentalmente por vasos sanguíneos que alimentam os restantes tecidos do olho. A córnea transparente é a região em contato com o exterior.

O interior do olho é constituído por três regiões distintas: o cristalino que é a lente principal do sistema ótico com distância focal variável, controlada pelos músculos ciliares, a região interior cheia de uma substância gelatinosa, o humor vítreo, que mantém a forma do olho, e a região anterior entre o cristalino e a córnea que contém o humor aquoso.

Nesta última região encontra-se a íris que dá a cor aos olhos, equivalente ao diafragma da máquina fotográfica com a abertura controlada por meio de músculos.

Finalmente, uma parte muito importante do olho é a retina que é constituída por alguns milhões de células sensíveis à luz distribuídas por toda a zona interior. Estas células são equivalentes aos foto-detetores de uma máquina fotográfica digital com distribuição espacial não uniforme. Existe uma região com 2,5 a 3 mm de diâmetro designada mácula, onde a concentração daquelas células é muito maior. É aqui que se formam imagens de objetos que se encontram na direção para a qual se está a olhar, chamada visão central. A parte central da mácula chama-se fóvea e tem cerca de 0,3 mm de diâmetro.

No olho há dois tipos distintos de células sensíveis à luz: os cones e os bastonetes. Os bastonetes são sensíveis apenas à intensidade luminosa, não detetam qualquer cor. Na retina existem cerca de 125 milhões de bastonetes, sendo a suas dimensões da ordem de 2 μm . Os cones, com 6 μm de dimensão e em número de 6 a 7 milhões, são as células responsáveis pela visão da cor, podendo ser de três tipos de cones, uns sensíveis ao vermelho, outros ao verde e outros ao azul.

Tanto os bastonetes como os cones enviam impulsos elétricos para o cérebro, através do nervo ótico. A imagem que se forma na retina é real e invertida, cabendo ao cérebro a função de inverter a informação e processá-la. A região em que os nervos provenientes das células da retina se juntam para formar o nervo ótico tem uma pequena zona em que não há células sensíveis à luz, chamada de ponto cego. A visão em profundidade é obtida por sobreposição no cérebro de duas imagens quase iguais, cada uma delas proveniente de um dos olhos, que tomam vistas diferentes.

3.1.1 Interação da radiação ótica com o olho

[1] A luz visível que incide no olho passa sequencialmente através da córnea, do humor aquoso, da pupila, do cristalino, do humor vítreo e é focada na retina.

Quando a luz visível atinge a retina, ela deposita energia suficiente para desencadear reações bioquímicas que produzem um sinal enviado ao cérebro através do nervo ótico. O nervo ótico transporta os sinais dos fotorreceptores

da retina para o cérebro. A Figura 14 ilustra a estrutura básica de um olho humano de forma mais simples do que a Figura 13.

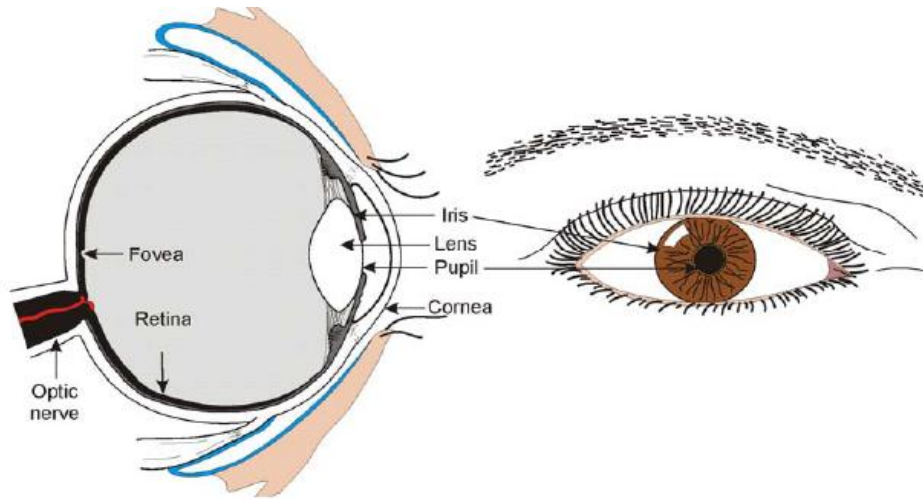


Figura 14 - Estrutura básica de um olho humano

Os comprimentos de onda que constituem a radiação ótica atingem o olho em diferentes partes como se pode observar na Figura 15.

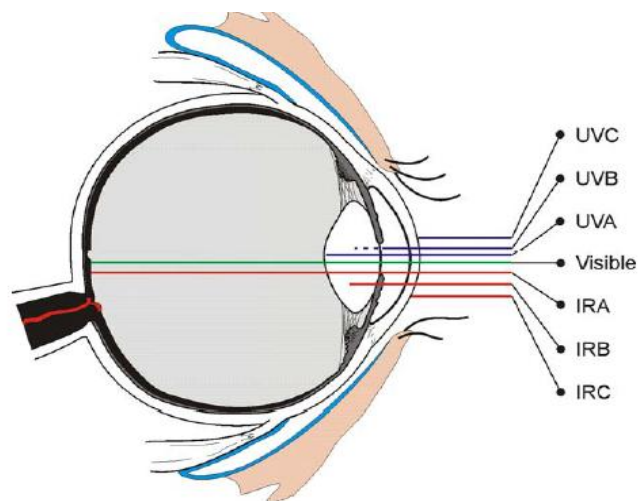


Figura 15 - Mecanismos de penetração da radiação ótica no olho

3.1.1.1 Radiação ultravioleta (UV-C, UV-B, UV-A)

A radiação ultravioleta que incide no olho (córnea) é absorvida pelo cristalino. A córnea absorve fortemente em comprimentos de onda menores que 300 nm. A radiação UV-C é absorvida na camada superficial da córnea e a radiação UV-B é absorvida pela córnea e pelo cristalino. A radiação UV-A passa através da córnea e é absorvida pela lente que é o cristalino.

A resposta do olho humano à superexposição da radiação ultravioleta inclui o aparecimento de foto-queratites e foto-conjuntivites, inflamação da córnea e conjuntiva respectivamente, conduzindo à cegueira. Os sintomas variam desde uma ligeira irritação, sensibilidade à luz e lacrimejamento até à dor severa. Aparecem num período de 30 minutos a um dia dependendo da intensidade da exposição.

A exposição crónica aos raios UV-A e UV-B pode causar catarata devido às alterações de proteínas no cristalino. Normalmente pouca radiação UV-A (menos de 1%) é recebida na retina devido à absorção daquela radiação pelos tecidos do olho anteriores ao cristalino.

A retina é normalmente protegida do dano agudo por respostas de aversão involuntárias à luz visível, mas não à radiação ultravioleta.

A exposição crónica à radiação ultravioleta é uma das principais contribuições para o desenvolvimento dos distúrbios da córnea e da conjuntiva, bem como da gota climática da queratopatia (um acúmulo de cor amarela depositado na na córnea), pterígio (uma massa ou carne vermelha fibrovascular da conjuntiva, que se espalha sobre a córnea) e provavelmente pinguécua (lesão amarela da conjuntiva proliferativa).

Devido ao facto do olho abrir com intermitência, o risco de exposição da retina à radiação ultravioleta visível é maior do que na pele.

Uma lesão pode acontecer na fóvea se olhar para uma fonte de luz brilhante como por exemplo olhar diretamente ao longo de um feixe laser.

Uma medida de proteção natural inclui a aversão à luz brilhante. A resposta da aversão opera em cerca de 0,25 segundos que é o tempo da pupila se contrair. Neste intervalo de tempo, a irradiância na retina pode reduzir-se de um fator de cerca de 30.

O aumento da temperatura de 10 a 20 °C na retina pode levar a danos irreversíveis devido à desnaturação de proteínas. Se a fonte de radiação cobrir uma grande parte do campo de visão de modo que a imagem na retina seja grande, as células têm dificuldade em dissipar o calor rapidamente na região central da imagem.

3.1.1.2 Radiação visível

A radiação visível pode provocar o mesmo tipo de dano, induzido fotoquimicamente, que a radiação UV. Em comprimentos de onda na região do visível, a aversão à luz brilhante atua como um mecanismo protetor.

O dano provocado pela luz visível é mais pronunciado em comprimentos de onda em torno de 435-440 nm designando-se por isso de "perigo da luz azul".

A exposição crónica a um ambiente com nível de intensidade da luz visível elevado pode ser responsável por danos fotoquímicos nas células da retina, proporcionando uma fraca percepção de cor e visão noturna.

3.1.1.3 Radiação IR-A, IR-B e IR-C

Tal como a radiação visível, a radiação IR-A, também é focalizada pela córnea na lente e transmitida para a retina podendo causar o mesmo tipo de dano térmico que a radiação visível.

A retina não deteta a radiação IR-A e por isso não há proteção pela resposta natural de aversão. Assim a região espectral dos 380 a 1400 nm (visível e IR-A) designa-se por "região de perigo da retina".

A exposição crónica à radiação IR-A também pode induzir a catarata, mas não tem fótons suficientemente energéticos para provocar riscos de danos fotoquimicamente induzidos.

A retina está protegida para radiações com comprimentos de onda em torno de 1400 nm uma vez que o humor aquoso é um absorvedor muito forte e nos comprimentos de onda mais longos a radiação é atenuada pelo humor vítreo.

O aquecimento do humor aquoso e da íris pode aumentar a temperatura dos tecidos adjacentes, incluindo a lente, que não é vascularizada e assim não pode controlar a temperatura. Este facto juntamente com a absorção direta da radiação IR-B pela lente, induz a catarata que tem sido uma doença profissional importante para algumas indústrias, principalmente para as fábricas de vidro e soldadura.

A radiação IR-C é absorvida pela córnea e por isso o principal risco é a queimadura corneana. A temperatura das estruturas adjacentes do olho pode aumentar devido à condução térmica mas a perda de calor por evaporação e piscar dos olhos, bem como o ganho de calor devido à temperatura do corpo, vão influenciar este processo.

3.2 A pele humana

[12] A pele é o maior órgão do corpo, sendo 16% do peso do corpo, com uma área superficial de 1,8 m². Possui diferentes funções sendo a mais importante a da formação de uma barreira física com o ambiente, o que permite limitar a passagem de água entre o interior e o exterior, a passagem de eletrólitos e outras substâncias ao mesmo tempo. A pele fornece proteção contra os micro-organismos, a radiação ultravioleta, os agentes tóxicos e danos mecânicos. Possui duas camadas estruturais que são a epiderme e a derme como se pode observar na Figura 16. A hipoderme situada abaixo da derme serve de união entre a pele e os órgãos subjacentes.

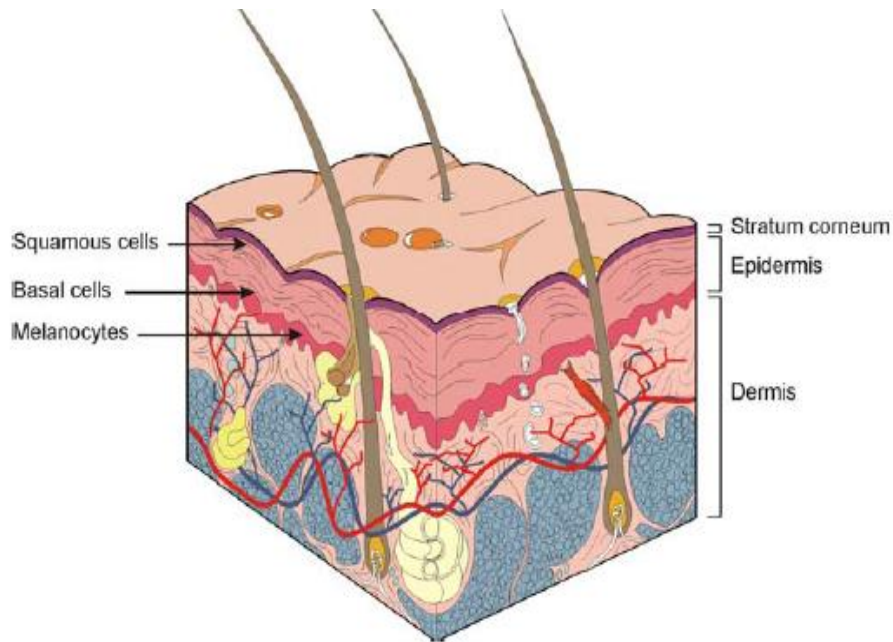


Figura 16 - Estrutura da pele humana (epiderme e derme) [1]

O cabelo, as unhas, as glândulas sebáceas, as glândulas sudoríparas e as glândulas apócrinas são considerados derivados da pele.

A pele é um órgão dinâmico em estado constante de mudança, pois as células das camadas externas são continuamente substituídas por células internas que se movem para a superfície.

Estruturalmente a espessura da pele varia ao longo do corpo e está de acordo com a anatomia local e idade de cada indivíduo.

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** descreve de forma sucinta a constituição das camadas constituintes da pele.

Tabela 3: Camadas constituintes da pele humana

Camada da pele	Descrição
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Epiderme 	<p>Camada externa da pele composta principalmente por queratinócitos e melanócitos, células <i>Langerhans</i> e <i>Merkel</i>.</p> <p>A membrana basal é uma estrutura que forma a junção dermo-epidérmica.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Derme 	<p>Área do tecido conjuntivo (contém glândulas sudoríparas, raízes do cabelo, células nervosas e fibras, vasos sanguíneos e linfáticos) de suporte entre a epiderme e o tecido subcutâneo subjacente.</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hipderme (tecido celular subcutâneo) 	<p>Camada de tecido conjuntivo frouxo e gorduroso sob a derme.</p>

A pele humana é um órgão metabolicamente ativo e complexo, que executa importantes funções fisiológicas. Uma dessas funções é a de proteção contra os efeitos prejudiciais da radiação ultravioleta.

Os melanócitos localizados na camada basal, e a melanina têm papéis importantes na função de barreira da pele, evitando danos por radiação UV. Nas camadas interiores da epiderme, os grânulos de melanina formam um escudo protetor ao longo dos núcleos dos queratinócitos. A melanina absorve a radiação UV protegendo os núcleos da célula.

A Radiação UV induz a proliferação de queratinócitos levando ao aumento de espessura da epiderme. Além da proteção contra radiações ultravioleta, a pele tem a função de termorregulação (mantendo a temperatura do corpo constante através da libertação do suor ou mudanças do volume de sangue que circula no sistema vascular cutâneo) e a função de vigilância imunológica.

3.2.1 Interação da radiação ótica com a pele

[1] A profundidade de penetração da radiação ótica na pele depende do comprimento de onda da radiação conforme se pode observar na Figura 17.

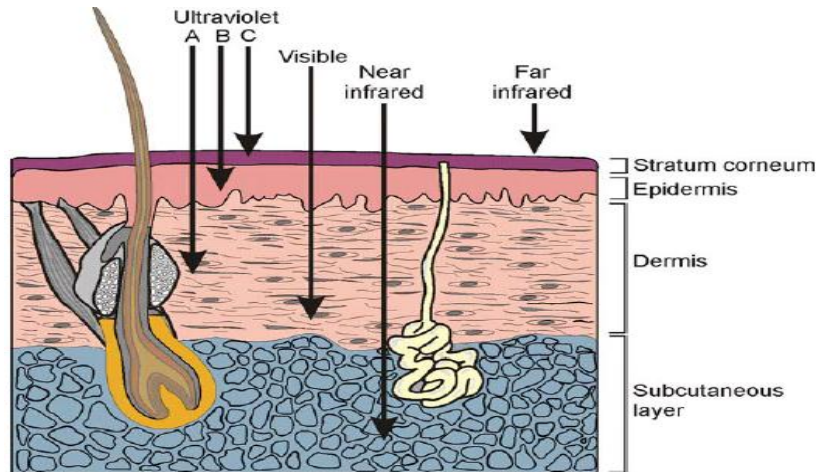


Figura 17 - Profundidade de penetração da radiação óptica na pele

As radiações (UV-B e UV-C) ao incidirem sobre a pele são absorvidas respectivamente pelas duas primeiras camadas. A radiação UV-A é absorvida pela derme.

3.2.1.1 Radiação ultravioleta (UV-C, UV-B, UV-A)

A exposição excessiva à radiação ultravioleta provoca a curto prazo o aparecimento de um vermelhão e inchaço da pele designado por eritema. Os sintomas podem ser graves e o efeito máximo ocorre 8 a 24 horas após a exposição, demorando mais de 3 a 4 dias para a secagem da pele. Isto pode ser seguido por um aumento da pigmentação da pele (bronzamento retardado).

A exposição à radiação UV-A também pode causar uma mudança imediata mas temporária na pigmentação da pele. Algumas pessoas têm reações anormais da pele quando exposta à radiação ultravioleta (fotossensibilidade), devido a anormalidades genéticas, metabólicas e ingestão/contacto com certas drogas/produtos químicos.

O efeito mais grave a longo prazo, que resulta da exposição da pele à radiação ultravioleta é a indução do cancro da pele. Os câncros da pele não-melanomas são os carcinomas baso-celulares e os carcinomas de células escamosas. São relativamente comuns em pessoas brancas, embora sejam raramente fatais. Ocorrem mais frequentemente em áreas do corpo expostas ao sol (rosto e mãos) e a sua incidência aumenta com a idade. Os resultados de estudos

epidemiológicos indicam que o risco de ambos os cânceros da pele pode ser relacionado com a exposição acumulativa da radiação UV, embora a evidência seja mais forte para carcinomas de células escamosas.

O melanoma maligno é a principal causa de morte por câncer da pele, embora a sua incidência seja menor que o câncer cutâneo não-melanoma. A maior incidência é encontrada em pessoas com grande número de nervos, pele clara, cabelos ruivos/louros e com tendência a sardas e com queimaduras solares e elevada exposição ao sol. Tanto os episódios da queima aguda por exposição ao sol como a exposição crônica ocupacional e recreativa podem contribuir para o risco de ocorrência do melanoma maligno.

A exposição crônica à radiação ultravioleta origina o fotoenvelhecimento da pele caracterizado pela perda de elasticidade (enrugamento). A radiação com comprimentos de onda UV-A é a principal responsável deste fenômeno uma vez que pode penetrar nas fibras de colágeno e elastina da derme. Existem estudos que evidenciam que a exposição à radiação UV pode afetar a resposta imunitária do organismo.

O principal efeito benéfico conhecido da exposição à radiação UV é a síntese da vitamina D, sabendo-se que as exposições de curta duração, à luz solar no dia-a-dia, produzem a vitamina D que o corpo humano necessita.

3.2.1.2 Radiação visível

A radiação visível penetra na pele e pode aumentar a temperatura local o suficiente para causar uma queimadura. O corpo ajusta-se a aumentos graduais da temperatura, aumentando o fluxo de sangue (que transporta o calor para fora) e a transpiração.

Se a radiação é insuficiente para causar uma queimadura aguda (em 10 s ou menos), a pessoa sujeita a uma exposição de longa duração é protegida pela resposta de aversão natural ao aquecimento, que se traduz por um aumento da temperatura corporal.

3.2.1.3 Radiação IR-A, IR-B e IR-C

A radiação IR-A penetra alguns milímetros na camada subcutânea da pele e produz os mesmos efeitos térmicos que a radiação visível. A radiação IR-B penetra menos de 1 mm no tecido podendo fazer com que aconteçam os mesmos efeitos térmicos provocados pelas radiações visíveis e IR-A.

A radiação IR-C penetra apenas nas camadas superiores das células da pele (estrato córneo).

Capítulo 4: Avaliação de uma fonte de luz contínua segundo a norma EN/IEC62471

O propósito da norma EN/IEC62471 é fornecer uma técnica normalizada para avaliar os potenciais perigos ou riscos da radiação que podem estar associados com lâmpadas e sistemas de lâmpadas de emissão contínua.

De acordo com a referida norma, o processo de medição da radiação ótica de uma fonte contínua, com o objectivo de avaliar os efeitos fotobiológicos no olho e na pele, envolve a definição de um conjunto de parâmetros que são descritos neste capítulo.

O conhecimento destes parâmetros permite quantificar e qualificar os efeitos fotobiológicos através do estabelecimento do nível de risco e por consequência etiquetar a fonte de luz em questão, de acordo com a norma.

No sentido da melhor percepção desses parâmetros e de toda as suas interligações no campo de avaliação fotobiológica, faz-se uma breve introdução sobre o método alternativo e o método de referência nos textos que se seguem.

4.1 Princípio base de funcionamento do método de referência

Este método utiliza o espectro-radiómetro e, ao contrário do método alternativo, os valores da irradiância são medidos de forma direta, sem recurso ao *stop field* na frente da fonte de luz. O *stop field* é substituído por um diafragma e uma lente (*aperture stop*) de forma a criar um campo de visão imaginário, conforme indica a Figura 18.

O diafragma deixa passar a radiação luminosa da fonte, permitindo assim a formação de um *stop field* imaginário. A Figura 19 apresenta um diagrama esquemático do método de referência.

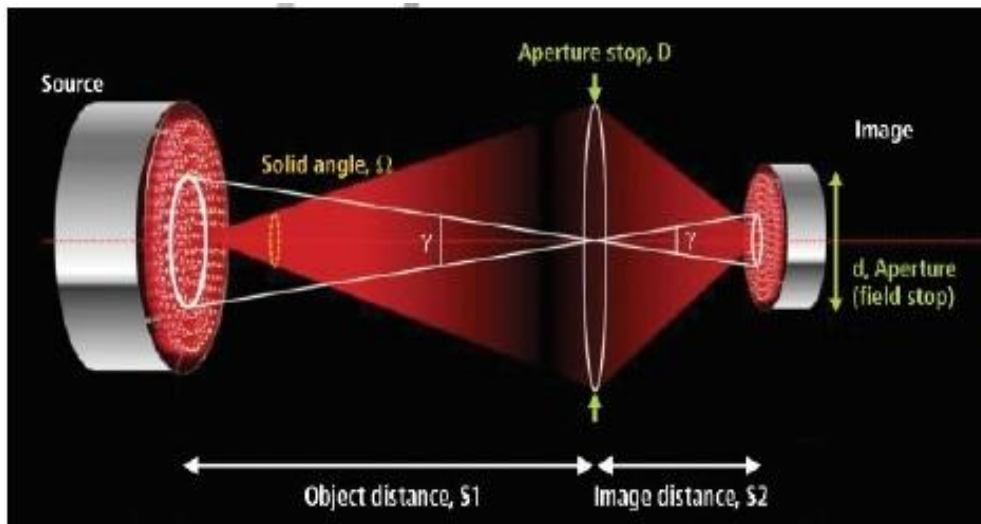


Figura 19 – Diagrama esquemático do método de referência

Os espectro-radiômetros podem ser calibrados para medir a energia radiante ou fluxo radiante de uma fonte de luz, em função do número de contagens e do comprimento de onda. Estes instrumentos separam a luz policromática nos seus componentes constituintes monocromáticos geralmente por meio de prismas ou grelhas. O valor fotométrico medido é calculado *por software* a partir do espectro medido.

A irradiância é obtida em função do número de contagens (proporcional ao número de fótons recebidos pelo sensor) em cada intervalo de comprimento de onda (< 1nm) durante um período de tempo de medição. O espectro da fonte de luz obtido em valores de irradiância é multiplicado pelo fator de ponderação específico de cada efeito fotobiológico (perigo actínico UV, perigo da luz azul e perigo térmico na retina).

4.2 Princípio de funcionamento do método alternativo

A determinação da radiância é efetuada pela medição da irradiância com um campo de visão bem definido com recurso ao foto-radiómetro. A radiância para um determinado campo de visão, pode ser simulada usando uma abertura circular plana na fonte (*stop field*). A forma de medir a irradiância está representada na Figura 20.

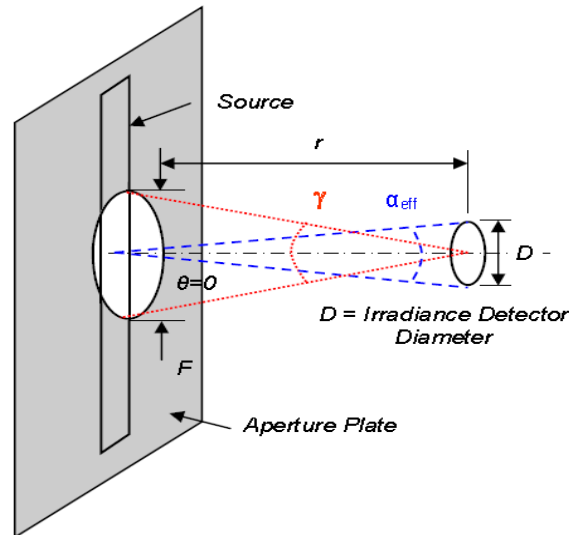


Figura 20 - Método alternativo – determinação da radiância

De acordo com a norma IEC62471, para os efeitos fotobiológicos: perigo actínico UV; UV-A (pele e olho) e IR (olho) e perigo térmico na pele, não é necessária a determinação do diâmetro de abertura (*stop field*), uma vez que o campo de visão é superior ao tamanho da fonte de luz utilizada.

Observando a figura anterior, o diâmetro da abertura F e a distância r entre o detetor e a fonte definem o campo de visão γ através da equação 10.

Equação 10

$$\gamma = \frac{F}{r}$$

Esta configuração experimental implica que o *stop field* seja colocado suficientemente perto da fonte de luz, no sentido de produzir o referido campo de visão.

A relação entre a medição da irradiância E e a radiância L da fonte, quando a deteção é efectuada numa direcção perpendicular à fonte ($\theta=0$) ou para pequenos ângulos sólidos Ω é dada pela equação 11.

Equação 11

$$E = L \cdot \Omega$$

O campo de visão da medida é o ângulo sólido Ω em estereorradianos, ou seja, o ângulo sólido subtendido pelo ângulo planar γ em radianos. Por outro lado,

para pequenos ângulos a relação entre o ângulo planar γ e o ângulo sólido Ω é dada pela equação 12.

Equação 12

$$\Omega = \frac{\pi \cdot \gamma^2}{4}$$

Usando as relações das equações 10, 11 e 12, a irradiância em função da radiância da fonte é dada pela equação 13.

Equação 13

$$E = L \cdot \frac{\pi \cdot \gamma^2}{4} = L \cdot \frac{\pi \cdot F^2}{4 \cdot r^2}$$

4.3 Fonte versus Detector

Os parâmetros que se referem à posição da fonte relativamente ao detector são a distância de exposição (distância ocular de perigo) e o campo de visão F.O.V (variação do F.O.V com o tempo de exposição).

Quanto aos parâmetros que relacionam o diâmetro da retina relativamente à luminância na gama de comprimentos de onda dos efeitos fotobiológicos (risco da luz azul e risco térmico na retina) e ainda a sua relação com a velocidade de movimento ocular são: o diâmetro da pupila e a dimensão angular da fonte aparente.

O texto seguinte apresenta as definições respeitantes aos parâmetros utilizados na avaliação de uma fonte de luz contínua, quanto aos limites de exposição (EL) referentes aos efeitos fotobiológicos na pele e olho humanos.

Quanto à posição relativa da fonte e do detector descrevem-se a seguir as definições da distância de exposição (distância ocular de perigo) e do campo de visão F.O.V (variação do F.O.V com o tempo de exposição).

❖ Distância de exposição r (entre a fonte e o detetor)

É definida pela distância entre o detetor (olho/pele) e o ponto mais próximo da fonte. Este ponto depende do tipo de radiação espacial da lâmpada (sistema de lâmpadas). Para lâmpadas radiantes em todas as direções, a distância é medida a partir do centro do filamento ou do arco da fonte, como mostra a Figura 21.

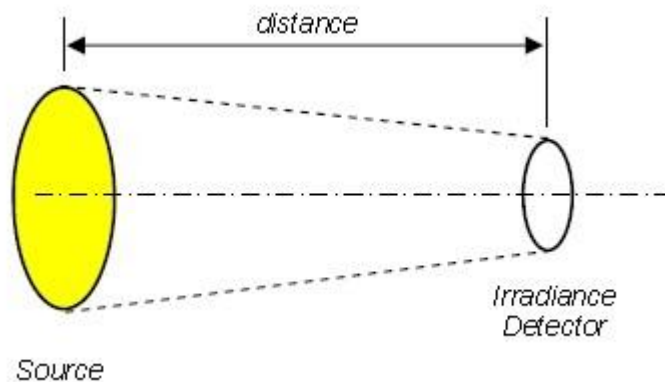


Figura 21 - Distância de exposição entre a fonte e detector [13]

Relativamente à medição da iluminância (fluxo luminoso por unidade de área $\text{lúmen.m}^{-2}=\text{lux}$) de uma fonte de luz, a norma IEC 62471 considera dois grupos de fontes: fontes de serviço de iluminação geral (GLS) e não-GLS.

De acordo com a norma e para fontes GLS, entende-se como distância de 500 lux, a distância entre a fonte de luz e o recetor, para a qual a iluminância é de 500 lux. Na avaliação das fontes não-GLS a norma considera que a distância de medição é 200 mm. A Figura 22 ilustra o F.O.V. para as distâncias de 500 lux e 200 mm.

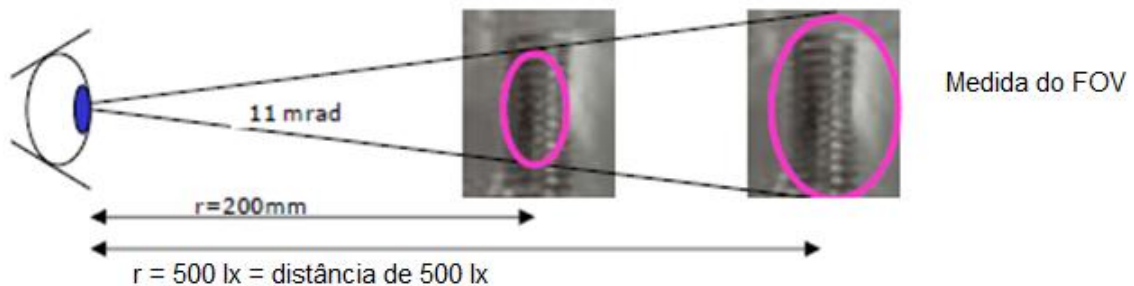


Figura 22 - Campo de visão à distância de iluminação de 500 lux (ou 200 mm) [14]

- A **distância ocular de perigo** é definida como a distância para a qual a radiância ou a irradiância durante um certo período de tempo de exposição excede o limite de exposição aplicável.

❖ Campo de Visão

O campo de visão designado por F.O.V do inglês “*field of view*” é o ângulo de aceitação do olho humano (laboratorialmente simulado por uma lente instalada entre o detetor do foto-radiómetro ou do espectro-radiómetro e a fonte luminosa). É um ângulo sólido que traduz a capacidade do olho em “avistar” a luz de uma fonte, ou seja, de receber a radiação luminosa. Quando um ângulo sólido tem simetria circular pode ser referido como um ângulo plano como se pode ver na figura 24.

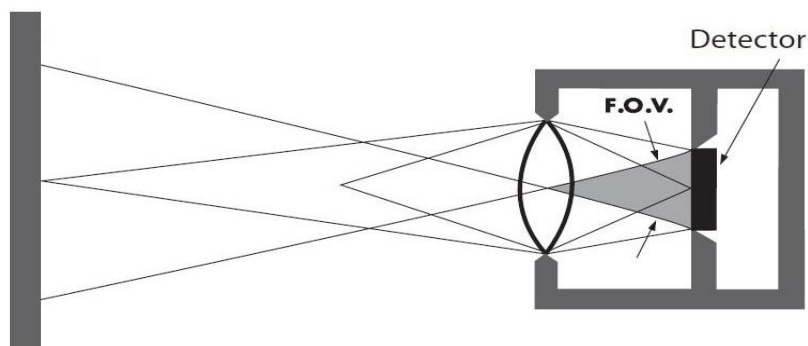


Figura 23 - Representação do F.O.V [4]

O campo de visão na medição da radiância é relevante para a avaliação da exposição do olho à radiação (risco da luz azul e efeito térmico na retina) e não está relacionado com o tamanho da fonte de luz.

▪ **Variação do F.O.V com o tempo de exposição**

A imagem mais pequena que pode ser formada na retina tem um ângulo subtendido máximo de 0.0017 rad. Com mais tempo de exposição, aquele ângulo aumenta para um valor máximo de 0.1 rad, como se pode observar na Figura 25. Este facto é devido à tarefa da movimentação dos olhos.

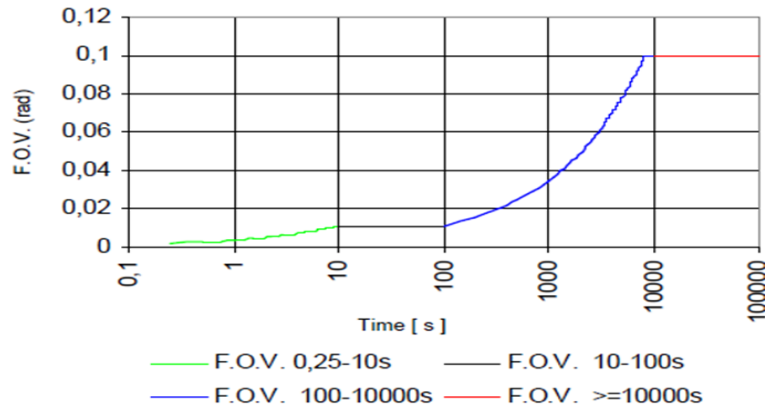


Figura 24 - Variação do F.O.V com o tempo de exposição [3]

❖ Diâmetro da pupila e iluminância

O fluxo radiante na gama de 380 nm a 1400 nm (zona de perigo da luz azul e risco térmico na retina) quando entra no olho é absorvido pela retina e é proporcional à área da pupila.

Quando a luminância é muito baixa (inferior a $0,01 \text{ cd m}^{-2}$) o diâmetro da pupila aumenta de 2 mm para 7 mm (luminância na ordem dos $10\ 000 \text{ cd m}^{-2}$). Assim considera-se: se a iluminância na retina é maior ou igual a $0,01 \text{ cd m}^{-2}$, o diâmetro da pupila mínimo é 3 mm; se a luminância é menor que $0,01 \text{ cd m}^{-2}$ o diâmetro da pupila mínimo é 2 mm. Portanto, quanto menor é a luminância incidente na retina, maior será o diâmetro da pupila e vice-versa como se pode observar na figura 25.

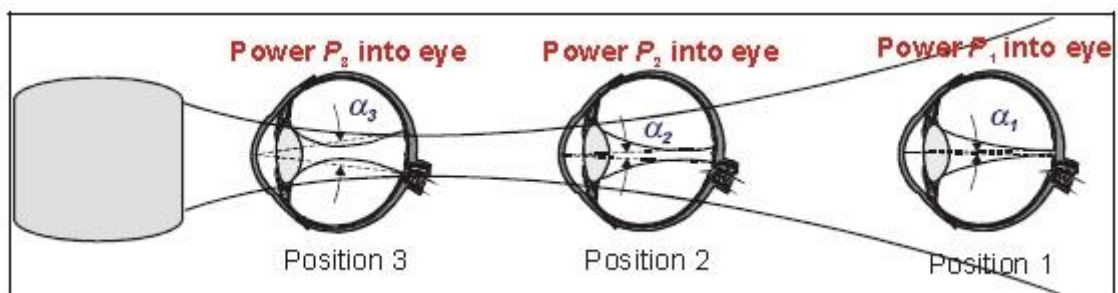


Figura 25 - Relação entre o diâmetro da pupila e a luminância incidente no olho[15]

Na determinação dos limites de exposição na retina são considerados dois diâmetros diferentes da pupila, quanto **ao efeito da luz azul** ou **ao efeito térmico da retina**:

- Diâmetro da pupila de 3 mm (7 mm^2 de área) quando a luminância da fonte é suficientemente elevada ($> 10 \text{ cd m}^{-2}$) e a duração da exposição maior do que 0,25 s.
- Diâmetro da pupila de 7 mm ($38,5 \text{ mm}^2$ de área) quando a luminância da fonte é baixa.

A figura 26 ilustra o diâmetro da retina (cor vermelha) quando a luminância da fonte é baixa e o diâmetro da retina aumenta (cor azul), quando a luminância é elevada, de acordo com as condições supra mencionadas.

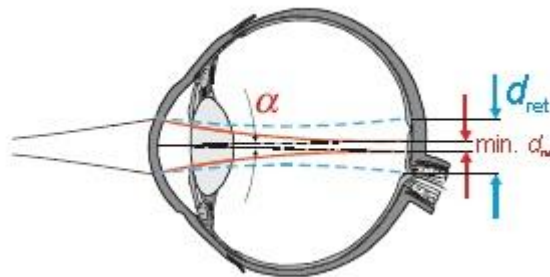


Figura 26 - Tamanho da imagem que se forma na retina de acordo com a luminância [15]

❖ Dimensão angular da fonte aparente e tempo de exposição

A dimensão angular da fonte aparente é o ângulo visual α subtendido pela fonte aparente no olho de um observador ou no ponto da medição. Não deve ser confundido com o campo de visão (ângulo sólido) pois é um ângulo plano.

A figura 28 indica a referida dimensão da fonte aparente.

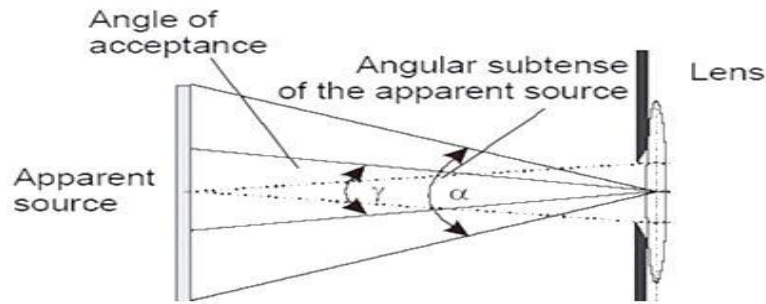


Figura 27 - Fonte aparente e a sua dimensão angular [16]

Na determinação dos limites de exposição, a área da retina que é irradiada é um elemento importante tanto para o efeito da luz azul como para o efeito térmico na retina.

Uma vez que a córnea e o cristalino formam na retina a imagem daquilo que o olho observa, o melhor método para descrever a área irradiada é relacionar essa área com a dimensão angular da fonte aparente de acordo com a figura 29, (ver também a figura 3 do ângulo sólido).

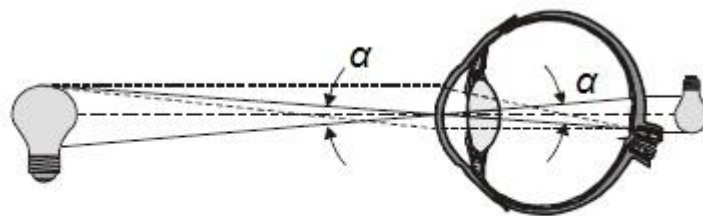


Figura 28 - Relação entre a dimensão da fonte aparente α e a área da retina [17]

Devido a limitações físicas no olho, a menor imagem que se pode formar na retina de um olho é limitada a um valor mínimo da dimensão angular da fonte aparente (ângulo visual), α_{min} , mesmo para uma fonte pontual. A norma IEC62471 refere que o valor de α_{min} é 0,0017 radiano.

O olho normal, quando focado num objeto, move-se num movimento pouco aleatório, com uma frequência de poucos hertz. Este movimento do olho faz com que a imagem de um ponto fique distribuída sobre uma área da retina, e seja equivalente ao ângulo subtendido de cerca de 0,011 radianos.

Além disso, para um tempo de exposição cerca de 100 segundos, a capacidade de olhar fixamente decresce, causando maior espalhamento da energia radiante sobre a retina devido à tarefa de movimento dos olhos (ex:leitura).

Por vezes ocorre um movimento rápido do olho com tempo superior a 0,25 segundos começando a manchar a imagem da fonte para uma posição em relação à fonte a qual se designa “posição angular eficaz” α_{eff} .

Para tempos de exposição de 10 segundos a imagem manchada de uma fonte pontual cobre uma área da retina equivalente a um ângulo α cerca de 0,011 radiano.

Estes dois parâmetros (dimensão angular da fonte aparente e tempo de exposição), no que respeita ao risco de perigo térmico na retina e ao risco da luz azul devem seguir as orientações abaixo indicadas, aquando da determinação dos limites de exposição de acordo com a norma.

No perigo térmico na retina:

- Dimensão angular α de 0,0017 radianos para tempo de exposição de 0,25 s (tempo do reflexo e piscar do olho).
- Dimensão angular α_{eff} de 0,011 radianos para tempo de exposição de 10 s a 100 s.
- Dimensão angular $\alpha_{eff} = \alpha_{min} \sqrt{\frac{t}{0.25}}$ com tempo de exposição entre 0,25 s e 10 s.

No perigo da luz azul:

- Dimensão angular α_{eff} de 0,0017 radianos para tempo de exposição superior a 100 s.
- Dimensão angular α_{eff} de 0,011 radianos para tempo de exposição entre 10 s e 100 s.
- Dimensão angular α_{eff} de 0,11 radianos para tempo de exposição superior a 10000 s.
- Dimensão angular $\alpha_{eff} = 0,011 \cdot \sqrt{\frac{t}{100}}$ para tempo de exposição entre 100 s e 10000 s.
- Dimensão angular α_{eff} é igual a α_{max} para tempo de exposição superior a 10000 segundos.

Refere-se que para uma dimensão angular de fonte aparente máxima, α_{max} , o limite de exposição para os perigos da retina são independentes do tamanho da fonte.

A **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta de forma resumida, a dimensão angular da fonte aparente para diferentes intervalos de tempo de exposição.

Tabela 3: Dimensão angular da fonte aparente para diferentes intervalos de tempo de exposição

Intervalo de exposição (segundos)	Posição angular (rad)			Posição angular (graus)
	α_{min}	α_{eff}	α_{max}	
Até 0.25 s	0.0017			0.1°
0.25s a 10 s		$\alpha_{min} \cdot \sqrt{\frac{t}{0,25}}$		
10 s a 100 s		0.011		0.63°
100 s a 10000 s		$0,011 \cdot \sqrt{\frac{t}{100}}$		
>=10000 s		0.1		5.7°

Qualquer dimensão angular maior do que α_{max} será limitada a α_{max} e qualquer dimensão angular menor do que α_{min} deve ser limitada a α_{min} , antes da determinação da média aritmética.

- Fonte oblonga

A dimensão angular de uma fonte oblonga será determinada pela média aritmética das dimensões angulares máximo e mínimo da fonte. Por exemplo, o ângulo α de uma fonte de comprimento L (mm) e de diâmetro D (mm) a uma distância do detetor à fonte, r (mm) na direção normal ao eixo da lâmpada é determinado a partir da dimensão média Z (mm) obtida pela equação 14.

Equação 14

$$Z = \frac{L + D}{2}$$

A equação 15 permite calcular o valor do ângulo α (rad).

Equação 15

$$\alpha = \frac{Z}{r}$$

4.4 Limites de exposição da radiação ótica (olho e pele)

De acordo com a norma IEC62471, os limites de exposição (EL) referem-se a condições de radiação ótica em que o ser humano pode estar exposto repetidamente, sem sofrer efeitos adversos na saúde.

Os valores dos limites de exposição são obtidos a partir de várias diretrizes da ICNIRP (comissão internacional de proteção contra as radiações não ionizantes), as quais são baseadas nas orientações das melhores informações de estudos experimentais.

Qualquer pessoa que se encontre na vizinhança de lâmpadas e sistemas de lâmpadas não deve ser exposto a níveis de radiação superiores aos definidos como limites de exposição.

Os tempos de exposição não são inferiores a 0,01 ms e não mais do que qualquer período de 8 horas. Estes tempos devem ser utilizados como guias no controlo da exposição à radiação. Os detalhes espectrais de uma fonte de luz geralmente são necessários apenas se a luminância da fonte exceder o valor de 10^4 cd.m^{-2} .

Neste capítulo são descritos os limites de exposição para cada efeito fotobiológico do olho (pele) e as respectivas equações de cálculo.

4.4.1 Perigo da Radiação Ultravioleta (olho e pele)

Como anteriormente foi mencionado vários são os fenómenos químicos que ocorrem no olho e na pele por exposição à radiação ultravioleta. Dizem-se raios actínicos, os que fazem parte da radiação solar rica em raios ultravioleta, pelo que se designa por Perigo Actínico UV.

Os limites de exposição à radiação ultravioleta da pele desprotegida e do olho aplicam-se a um período de exposição de 8 horas consecutivas. O limite para uma exposição radiante efectiva é de 30 Jm^{-2} . A **irradiância** (potência radiante por unidade de área) **espectral integrada** E_s da fonte de luz não deve ultrapassar os limites definidos pela equação 16.

Equação 16

$$E_s \cdot t = \sum_{200}^{400} \cdot \sum_t \cdot E_\lambda(\lambda, t) S_{UV}(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 30 \quad \text{Jm}^{-2}$$

Onde $E_\lambda(\lambda, t)$ é a irradiância espectral em $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$, $S_{UV}(\lambda)$ é a função de ponderação de risco da actínica ultravioleta, $\Delta \lambda$ é a largura de banda em nm, e t é o tempo de exposição em segundos.

O tempo permitido da exposição do olho (pele desprotegida) à radiação ultravioleta deve ser calculado pela equação 17.

Equação 17

$$t_{max} = \frac{30}{E_s} \quad \text{s}$$

A função de ponderação espectral $S(\lambda)$ do perigo actínico UV para a pele e olho, aplica-se na gama de comprimentos de onda 200-400 nm. Esta função traduz a dependência dos efeitos adversos no olho e pele em função do comprimento de onda da luz incidente. Está representada pelo gráfico da Figura 30 e utiliza-se para modificar ou corrigir a irradiância espectral adquirida pelo detetor. Quando

a função de ponderação é aplicada, os valores resultantes são normalmente referidos em termos da irradiância efetiva ou da exposição radiante efetiva.

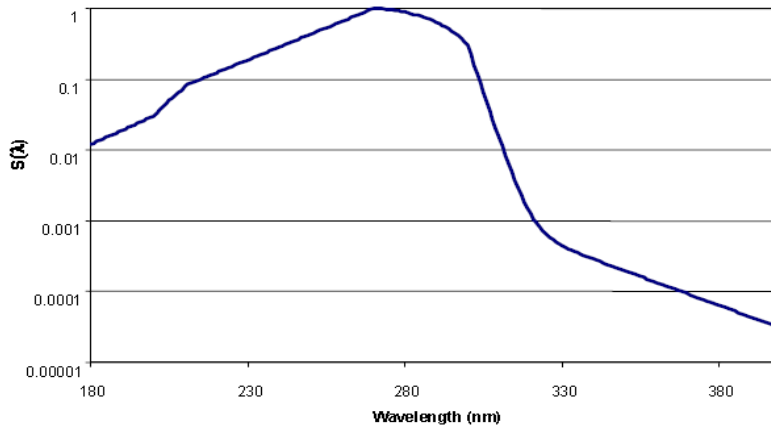


Figura 29 – Curva de ponderação espectral $S(\lambda)$, do perigo actínico UV para o olho e pele

O valor de pico de $S(\lambda)$ ocorre a 270 nm e tem o valor 1. Numa abordagem mais simples assumem-se todas as emissões entre 180 nm e 400 nm como se estivessem a 270 nm e nesse caso $S(\lambda)$ tem o valor máximo de 1, ou seja, a variação da função com o comprimento de onda é ignorada.

4.4.2 Perigo da radiação ultravioleta próximo (UV-A) (olho)

Na região espectral de 315 nm a 400 nm (UV-A) a potência radiante total no olho não deve exceder $10\,000\text{ Jm}^{-2}$ para tempos de exposição inferiores a 10^3 s . Para tempos de exposição superiores a 10^3 s (aproximadamente 16 minutos) a irradiância para o olho desprotegido E_{UVA} , não deve exceder 10 Wm^{-2} .

Equação 18

$$E_{UVA} \cdot t = \sum_{315}^{400} \sum_t E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10000\text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \quad t < 1000\text{ s}$$

$$E_{UVA} \leq 10\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \quad t \geq 1000\text{ s}$$

Onde: $E_{\lambda}(\lambda, t)$ é a irradiância espectral em $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$, $\Delta\lambda$ é a largura de banda em nm, e t é o tempo de exposição em segundos.

O tempo permitido de exposição à radiação UV-A no olho deve ser calculado pela equação 19.

Equação 19

$$t_{max} \leq \frac{10000}{E_{UVA}} \text{ s}$$

4.4.3 Perigo da luz azul (olho)

Para proteger a retina da agressão fotoquímica provocada por exposição crônica à luz azul, a luminância espectral integrada da fonte de luz, é ponderada pela função de risco da luz azul $B(\lambda)$. Esta função de ponderação é aplicada na gama 300nm a 700nm e a sua dependência com o comprimento de onda está representada na Figura 31.

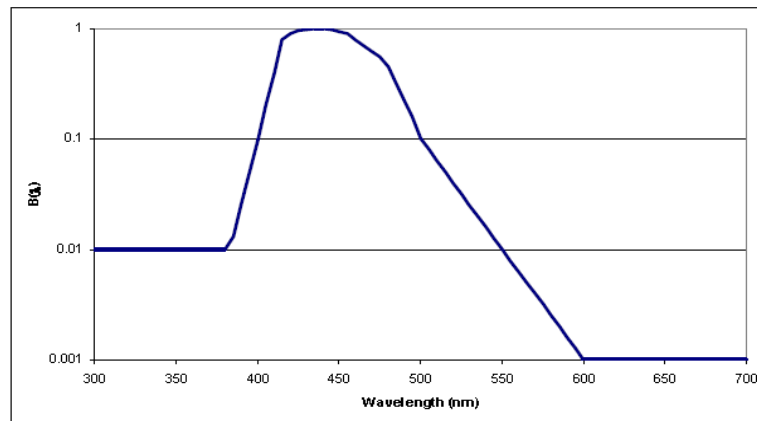


Figura 30 - Função de ponderação espectral $B(\lambda)$ do perigo da luz azul (olho)

O fator de ponderação tem um pico de 1 entre 435 nm e 440 nm quando a radiação emitida pela fonte estiver compreendida entre 300 nm e 700 nm. Assumindo que a função de ponderação espectral para a luz azul $B(\lambda)$ tem sempre o valor da função para 440 nm que é de 1, então esse valor não será excedido aquando de uma avaliação mais detalhada. A radiância ponderada L_B , não deve exceder os níveis definidos pelas equações 20 e 21.

Equação 20

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \cdot \sum_t \cdot L_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10^6 \text{ Jm}^{-2}\text{sr}^{-1} \text{ para } t \leq 10^4 \text{ s}$$

Equação 21

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 100 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1} \text{ para } t > 10^4 \text{ s}$$

A radiância espectral $L_\lambda(\lambda, t)$ vem expressa em $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$. Quando L_B é superior a $100 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, o tempo de exposição máximo admissível t_{max} é obtido pela equação 22.

Equação 22

$$t_{max} = \frac{10^6}{L_B} \text{ s} \text{ para } t \leq 10^4 \text{ s}$$

Se uma fonte de luz subtende um ângulo inferior a 0.011 radianos (pequena largura da fonte), os limites são definidos por uma equação mais simples baseada na irradiância espectral e não a radiância espectral.

Neste caso, a irradiância espectral ponderada E_λ para o olho não deve exceder os níveis definidos pelas equações 23 e 24.

Equação 23

$$E_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \cdot \sum_t E_\lambda(\lambda, t) B(\lambda) \Delta t \Delta \lambda \leq 100 \text{ Jm}^{-2}\text{sr}^{-1} \quad t \leq 100 \text{ s}$$

Equação 24

$$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda B(\lambda) \Delta \lambda \leq 1 \text{ wm}^{-2} \quad t > 100 \text{ s}$$

A irradiância espectral $E_\lambda(\lambda, t)$ vem expressa em $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$. Quando a irradiância ponderada E_B para a luz azul é superior a $0,01 \text{ W m}^{-2}$, o tempo de exposição máximo admissível é calculado pela equação 25.

Equação 25

$$t_{max} = \frac{100}{E_B} \text{ s} \quad t \leq 100 \text{ s}$$

4.4.4 Perigo térmico na retina

A proteção da retina contra lesões térmicas provocadas por exposição à radiação ótica, implica que a radiância espectral integrada da fonte de luz L_λ , ponderada pela função de ponderação do perigo de termico $R(\lambda)$, não exceda os níveis definidos pela equação 26.

Equação 26

$$L_R = \sum_{380}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \leq \frac{50000}{\alpha \cdot t^{0.25}} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1} \quad 10 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s}$$

Na expressão, t é o tempo de exposição, $\Delta\lambda$ é a largura de banda em nm e α representa a posição angular da fonte aparente em radianos.

A radiância espectral L_λ vem expressa em $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ e deve ser calculada por uma média sobre um cone de campo de visão com ângulo incluído não inferior a $0,0017 \text{ rad}$ e não superior a $0,11 \text{ radiano}$.

A função de ponderação $R(\lambda)$ definida entre 380 e 1400 nm está representada na figura 32.

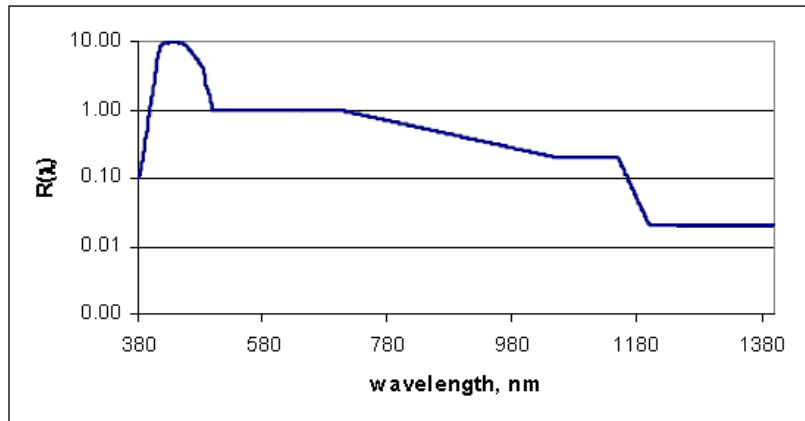


Figura 31 - Função de ponderação espectral $R(\lambda)$, de perigo térmico na retina (olho e pele)

O valor de pico da ponderação espectral $R(\lambda)$ situa-se entre os 435 e 440 nm e tem um valor máximo de 10. Se o limite de exposição não for ultrapassado e assumindo que todas as emissões entre os 380 nm e 1400 nm são cerca de 440 nm, então esse valor não será excedido quando se realizar uma avaliação mais detalhada.

No gráfico da figura 30, pode concluir-se que, para uma lâmpada de radiação infravermelha ou qualquer outra fonte de infravermelho próximo, o estímulo visual é fraco e por isso é desnecessária a ativação da resposta de aversão.

A radiância L_{IR} do infravermelho próximo (780 nm a 1400 nm) vista pelo olho deve ser inferior a valores definidos pela equação 27, quando o tempo de exposição é superior a 10 s.

Equação 27

$$L_{IR} = \sum_{780}^{1400} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \leq \frac{6000}{\alpha} \quad \text{w. m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad t > 10 \text{ s}$$

4.4.5 Perigo da Radiação Infra-Vermelho (olho)

Para evitar lesões térmicas da córnea e possíveis efeitos retardados sobre a lente do olho (cataratogénese), a exposição ocular à radiação E_{IR} na região do

infravermelho (780 nm a 3000 nm) não deve exceder os valores obtidos pela equação 28 quando o tempo de exposição é igual ou inferior a 1000 s.

Equação 28

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \leq 18000 t^{-0.75} \text{ w.m}^{-2} \quad t \leq 1000 \text{ s}$$

No caso do tempo de exposição ser superior a 1000 s, o valor limite da radiação E_{IR} vem dado pela equação 29.

Equação 29

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \leq 100 \text{ w.m}^{-2} \quad t > 1000 \text{ s}$$

A irradiância espectral E_{λ} vem expressa em $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$. A contribuição da radiação na gama do infra-vermelho (IR-C) já está incorporada nestes limites para todas as fontes incoerentes.

4.4.6 Perigo térmico para a pele

A exposição à radiação na gama dos comprimentos de onda visível e infravermelho (380 nm a 3000 nm) sobre a pele deve ser limitada aos valores obtidos na equação 30 quando o tempo de exposição é igual ou inferior a 10 s.

Equação 30

$$E_H \cdot t = \sum_{380}^{3000} \sum_t E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot \Delta t \cdot \Delta\lambda \leq 20000 \cdot t^{0.25} \text{ J.m}^{-2} \quad \text{para } t \leq 10 \text{ s}$$

A irradiância espectral $E_{\lambda}(\lambda, t)$ vem expressa em $\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$. Este limite de exposição é baseado na lesão da pele devida a um aumento da temperatura da pele e aplica-se apenas para pequena área de incidência da radiação.

A **Erro! Auto-referência de marcador inválida.** permite de forma sucinta observar os limites de exposição, acima mencionados (olho e pele) de acordo com a norma EN/IEC62471.

Tabela 4: Limite de exposição para a pele e olho segundo a norma IEC62471

Nome dos perigos	Equações relevantes	Gama de λ (nm)	Duração de exposição (s)	Limite de abertura F.O.V (rad, graus)	EL – constante de irradiância (Wm^{-2})
Limites de exposição (EL) baseados em valores da Irradiância					
Actínico UV Pele e olho	$E_s = \sum E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	200-400	<30000	1.4 (80)	30/t
UV-A Olho	$E_{UVA} = \sum E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	315-400	<=1000 >1000	1.4 (80)	10000/t 10
Luz azul (pequena fonte)	$E_B = \sum E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	300-700	<=100 >100	<0.011	100/t 1.0
IR- Olho	$E_{IR} = \sum E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	780-3000	<=1000 >1000	1.4 (80)	18000/t ^{0.75} 100
Térmico na pele	$E_H = \sum E_\lambda \cdot \Delta\lambda$	380-3000	<10	2 π .sr	20000/t ^{0.75}
Limites de exposição (EL) baseados em valores da Radiância					
Luz azul	$L_B = \sum L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	300-700	0.25-10 10-100 100-10000 >=10000	0,011.v(t/10) 0,011 0,0011.vt 0,11	10 ⁶ /t 10 ⁶ /t 10 ⁶ /t 100
Térmico na retina	$L_R = \sum L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	380-1400	<0.25 0.25-10	0,0017 0,011.v(t/10)	50000/(α .t ^{0.25}) 50000/(α .t ^{0.25})
Térmico na retina (fraco)	$L_{IR} = \sum L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	780-1400	>10	0,011	6000/ α

Capítulo 5: Avaliação de lâmpadas LED com Foto-radiômetro

Atendendo ao princípio de funcionamento do método alternativo mencionado no ponto 4.2, nesta avaliação, foi utilizado o foto-radiômetro para medir a radiação emitida por uma fonte luminosa (módulo de 12 LED).

Com recurso ao foto-radiômetro o qual se descreve no ponto 5.1, determinam-se os valores da radiância através dos valores medidos da irradiância, tendo em conta uma distância de medição cuja iluminância é de 500 lux (GLS).

Este capítulo descreve as diferentes etapas do procedimento de ensaio realizado, para avaliação dos efeitos fotobiológicos provocados por lâmpadas LED ou sistema de lâmpadas (incluindo luminárias).

Alem disso, aborda o modo de operação e constituição do foto-radiômetro, as características elétricas da luminária, os acessórios de apoio à medição, e os fundamentos teóricos de classificação e etiquetagem da fonte de luz utilizada.

5.1 Foto-Radiômetro “*delta ohm HD2402*”

[20] O foto-radiômetro “*DELTA OHM HD2402*” representado na Figura 33 foi utilizado na medição da irradiância de lâmpadas LED. Este equipamento foi especialmente concebido para realizar a avaliação da conformidade destas lâmpadas relativamente à exposição dos trabalhadores aos riscos devidos aos agentes físicos (radiação ótica artificial), com base na diretiva 2006/25/CE.

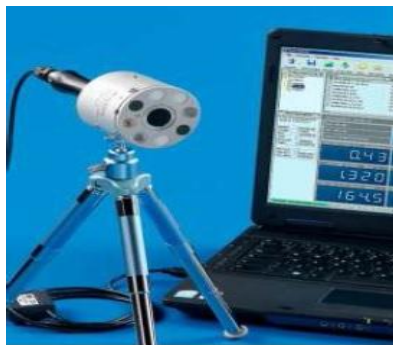
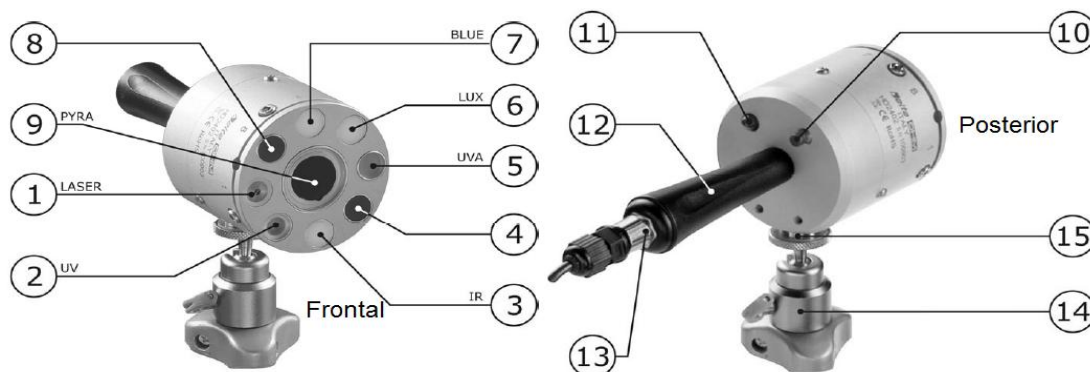


Figura 32 - Foto-radiômetro *DELTA OHM HD2402* [34]

Este dispositivo é alimentado por um cabo USB e incorpora um software de medição designado *DELTA LOG13* que exporta os dados adquiridos para uma folha Excel. Possui um conjunto de sensores de luz que se combinam entre si e detetam a radiação visível em diferentes comprimentos de onda como se pode observar na Figura 34, a qual inclui a legenda. Um apontador laser (acessório) permite ao utilizador ter a indicação do ponto exato de iluminação.



Legenda:

- | | |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1-LASER LED (indicador); | 9-Sensor de termopilha para medição na gama do IR-A; IR-F (400 - 2800 nm); |
| 2-Sensor radiométrico para medição na gama do UV (220 – 400 nm); | 10-Botão de pressão para ativação do ponteiro diodo laser e para o controlo do instrumento quando este não está ligado a um computador; |
| 3-Sensor radiométrico para medição na gama do IR-A (700 - 1300 nm); | 11- Indicador LED: exhibe o estado do instrumento; |
| 4-Não se utiliza; | 12-Manuseador; |
| 5-Sensor radiométrico para medição na gama do UV-A (315 - 400 nm); | 13-Conector M12: para ligação do instrumento a um computador ou a uma unidade de fonte de alimentação; |
| 6-Sensor fotométrico para medição da radiação visível (Luxímetro); | 14-Tripé; |
| 7-Sensor radiométrico para medição na gama da luz azul (400 - 600 nm); | 15-Conexão do tripé ao instrumento; |
| 8-Não se utiliza; | |

Figura 33 - Foto-radiómetro *DELTA OHM HD2402* e legenda da figura

Os sensores são constituídos por fotodíodos com excepção do sensor 9 que é uma termopilha. São recobertos por diversos filtros que permitem um reconhecimento fiável de cada gama de comprimentos de onda.

O foto-radiômetro utiliza detetores de banda larga em conjunto com filtros óticos que simulam a curva de eficiência luminosa espectral do olho humano $V(\lambda)$ (figura 2) e as curvas das ponderações espectrais $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ ou $R(\lambda)$. A figura 35 mostra a combinação das curvas das ponderações espectrais $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ e $R(\lambda)$ com a eficiência luminosa $V(\lambda)$ do foto-radiométrico.

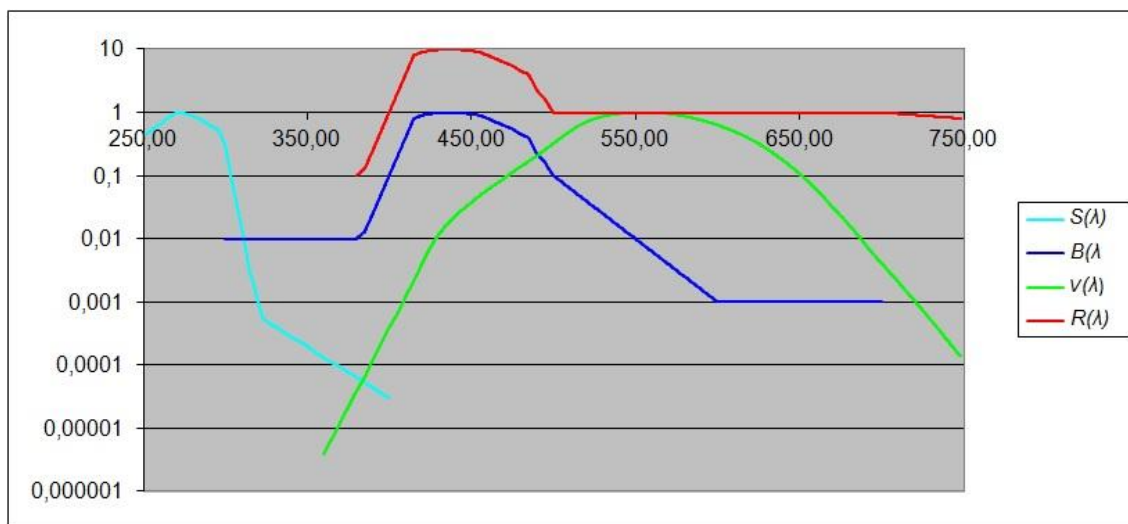


Figura 34 - Curvas de ponderação espectral $S(\lambda)$, $B(\lambda)$, $R(\lambda)$ de um foto-radiômetro e $V(\lambda)$ [18]

As Figuras 36-a, 36-b e 36-c mostram a comparação entre a curva resultante da combinação dos sensores do foto-radiômetro e cada uma das ponderações espectrais.

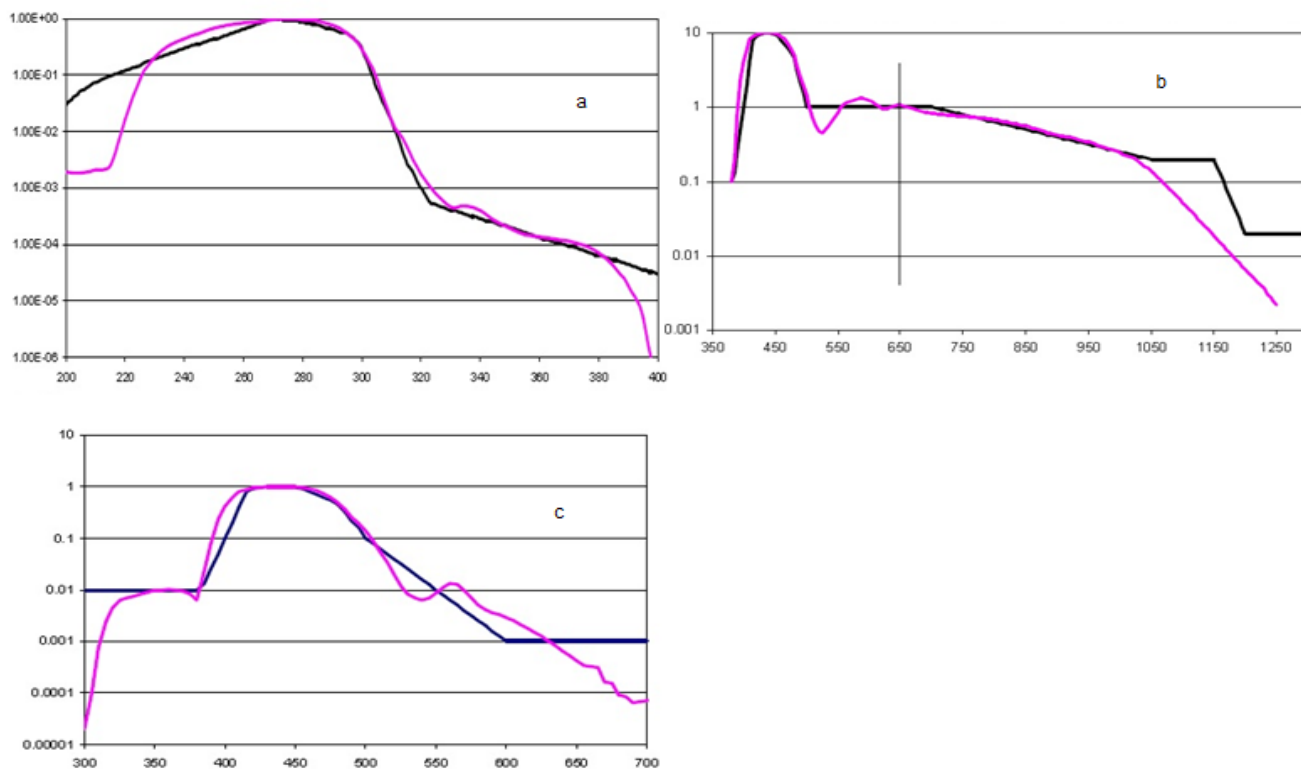


Figura 35 - Comparação entre a curva de resposta espectral obtida pela combinação dos sensores (cor violeta) e as curvas de ponderação espectral (cor preta): a) $S(\lambda)$; b) $B(\lambda)$ e c) $R(\lambda)$ [19]

O foto-radiômetro foi concebido para reproduzir os valores da irradiância com ponderação espectral de acordo com os perigos fotobiológicos como se pode ver na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Tabela 5: Foto-radiômetro (características dos canais)

Canais	Quantidade a medir	Gama espectral e curva de ponderação	Tipo de sensor
6	Iluminância (lux)	380 -780nm; $V(\lambda)$	Fotodíodo +Filtro
2	Irradiância (W/m^2)	220 – 400nm; $S(\lambda)$	Fotodíodo +Filtro
5	Irradiância (W/m^2)	315 – 400nm; UVA	Fotodíodo +Filtro
7	Irradiância (W/m^2)	400 -600nm; $B(\lambda)$	Fotodíodo +Filtro
3	Irradiância (W/m^2)	660 -1300nm; $R(\lambda)$	Fotodíodo +Filtro
9	Irradiância (W/m^2)	400 -3000nm	Termopilha

A fonte de luz ensaiada representada na Figura 37 possui um conjunto de doze díodos (LED's), e as suas características elétricas incluem uma corrente de alimentação entre 305 a 1000 mA e uma potência entre 12 e 36 W.

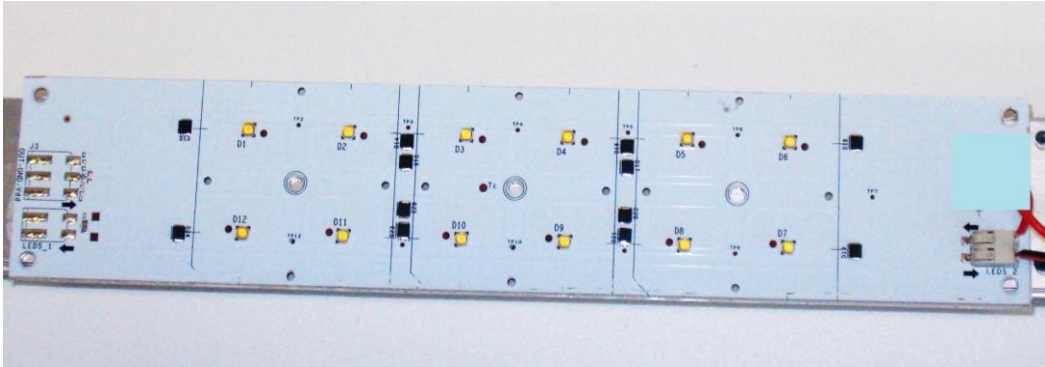


Figura 36 - Fonte de luz LED utilizada no processo de medição (módulo com 12 LED's)

A alimentação dos LEDs foi garantida através de uma fonte de corrente regulável tal como representado na Figura 38.



Figura 37 - Fonte de luz -dissipador de calor

Quanto aos acessórios, foram utilizados um tripé de máquina fotográfica como suporte do foto-radiômetro, cartolina preta, fita-métrica, compasso e x-ato no auxílio à implementação dos diâmetros de abertura (*stop field*) durante o processo de medição da radiância da fonte de acordo com a figura 39.



Figura 38 - Acessórios de apoio à medição da radiância da fonte (tripé, fita métrica, cartolina preta, compasso e x-ato)

5.2 Procedimento de avaliação dos efeitos fotobiológicos com Foto-radiómetro

O procedimento necessário à medição da irradiância da fonte de luz para avaliação dos efeitos fotobiológicos, de acordo com a norma EN/IEC62471 está descrito em diferentes etapas no texto seguinte. A determinação da respetiva radiância a partir da irradiância também se encontra descrita.

Neste procedimento, calcula-se a radiância do efeito da luz azul e do efeito térmico na retina para o máximo valor do campo de visão (F.O.V). No efeito térmico na retina, o limite de exposição é determinado de acordo com a dimensão angular da fonte aparente α . No fim destas análises, faz-se a classificação e etiquetagem da fonte, de acordo com a referida norma. O diagrama da figura 40 resume o procedimento de avaliação dos efeitos fotobiológicos estudados.

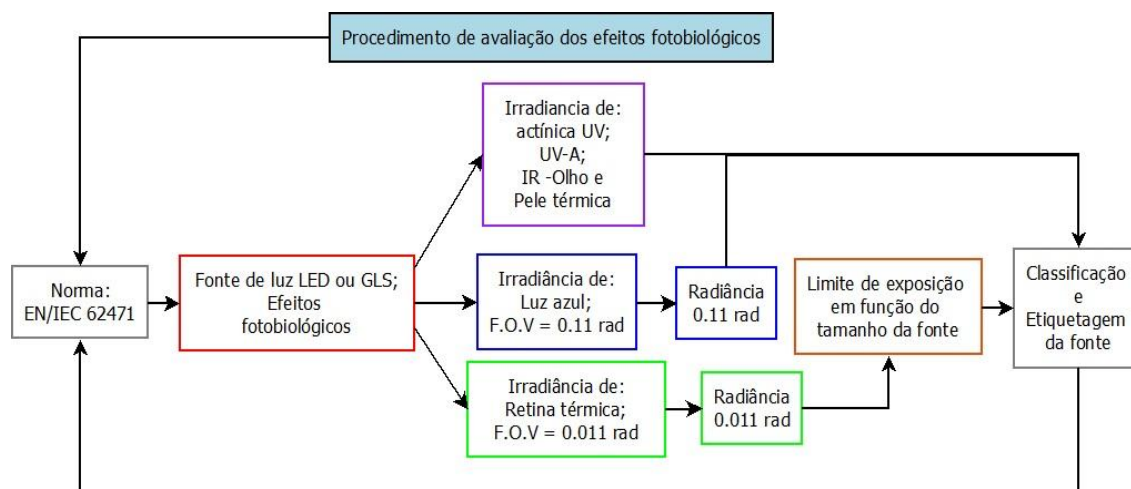


Figura 39 – Resumo do procedimento de avaliação fotobiológica

Os efeitos fotobiológicos podem ser relacionados com os valores de irradiância lidos diretamente pelo foto-radiômetro, ou com os valores da radiância calculados. A avaliação fotobiológica é efetuada com base no maior valor lido para cada um deles.

5.2.1 ETAPA 1 - Medição de iluminância a 500 lux (distância r)

Para fontes de luz GLS, a avaliação de todos os efeitos fotobiológicos é efetuada a uma distância correspondente à iluminância de 500 lux. Assim, previamente à realização das medições abaixo mencionadas, é determinado o ponto de medição e a correspondente distância r .

A distância r correspondente à iluminância de 500 lux é determinada pela monitorização do sensor (canal 6 – luxímetro). A figura 41 ilustra o painel frontal do equipamento de medição (foto-radiômetro) que apresenta o valor da medição de 0.502 Klux. Os restantes valores de irradiância que se verificam nos outros displays (canais) na referida figura, só serão considerados na aquisição dos valores de irradiância para cada efeito fotobiológico.

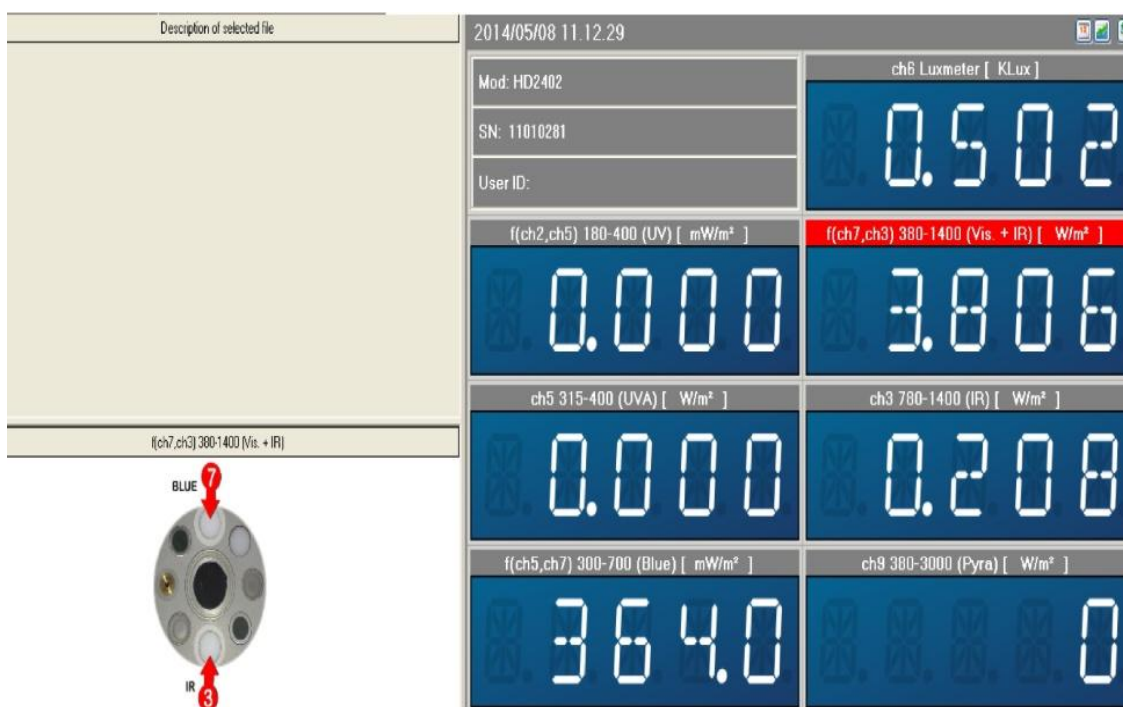


Figura 40 - Painel frontal do equipamento de medição (500 lux)

É importante realçar que a determinação do diâmetro de abertura F do *stop field* (Figura 20) é efetuada com base nesta distância r e no F.O.V associado a cada risco fotobiológico em valores de radiância tal como se descreve etapa 3.

Nota: Para efeitos de cálculo, o diâmetro de abertura F corresponde ao diâmetro D , referido na equação 14.

5.2.2 ETAPA 2 – Irradiância e efeitos fotobiológicos

O *software* de aquisição de dados do foto-radiómetro fornece os valores da irradiância, registados de segundo a segundo para cada gama de comprimentos de onda. O processo de aquisição termina com a gravação do ficheiro em Excel para a devida análise de avaliação dos efeitos fotobiológicos. Os valores de irradiância adquiridos neste processo incluem a ponderação espectral $S(\lambda)$ do risco da actínica UV para a pele e olho.

Na Tabela 7 as letras *a, b, c, d, m, n* e *o*, são parâmetros fornecidos pela diretiva 2006/25/CE que correspondem aos valores da irradiância registados pelo foto-radiómetro.

Tabela 6: Efeitos fotobiológicos baseados em valores de irradiância

O (*)Segundo a directiva 2006/25/CE, para os efeitos (IR-olho e térmico na pele), os parâmetros (m.n e o) são atribuídos de forma separada. Nas medições, o foto-radiómetro atribui-lhes combinações de forma automática, uma vez que a gama de comprimentos de onda do efeito térmico na pele sobrepõe-se à do efeito IR-olho. Por essa razão, avaliando o efeito da pele térmica na retina, o IR-olho também se está a ser avalhado.

Risco	EN/IEC62471	λ (nm)	Directiva 2006/25/CE	Foto-radiómetro
Actínico UV pele e olho	E_s	200-400	a.	a.
UV-A Olho	E_{UVA}	315-400	b.	b.
Luz azul (pequena fonte)	E_B	300-700	c. d.	c. d.
IR-olho	E_{IR}	780-3000	m. n.	(*) m. n. o.
Térmico na pele	E_H	380-3000	o.	

A tabela 8 indica os valores de irradiância exportados para uma folha Excel nesta etapa de aquisição e os parâmetros para cada efeito fotobiológico de acordo com a directiva.

Tabela 7: Valores de irradiância dos efeitos fotobiológicos (Actínico UV, UV-A – olho e pele e térmico na pele)

N	DATE	Lux/Lum [Lux]	a. 180-400 [W/m2]	b. 315-400 [W/m2]	m.n.o. 380-3000 [W/m2]
0	2014/05/08 11.15.09	501	0	0	0
1	2014/05/08 11.15.10	501	0	0	0
2	2014/05/08 11.15.11	501	0	0	0
3	2014/05/08 11.15.12	501	0	0	0
4	2014/05/08 11.15.13	501	0	0	0
5	2014/05/08 11.15.14	501	0	0	0
6	2014/05/08 11.15.15	501	0	0	0
7	2014/05/08 11.15.16	501	0	0	0
8	2014/05/08 11.15.17	501	0	0	0
9	2014/05/08 11.15.18	501	0	0	0
10	2014/05/08 11.15.19	501	0	0	0
11	2014/05/08 11.15.20	501	0	0	0
12	2014/05/08 11.15.21	501	0	0	0
13	2014/05/08 11.15.22	501	0	0	0
14	2014/05/08 11.15.23	501	0	0	0
15	2014/05/08 11.15.24	501	0	0	0
16	2014/05/08 11.15.25	501	0	0	0
17	2014/05/08 11.15.26	501	0	0	0
18	2014/05/08 11.15.27	501	0	0	0
19	2014/05/08 11.15.28	501	0	0	0
			0	0	0
			Actínia UV:OLHO/PELE	UV-A:OLHO/PELE	Pele térmica

5.2.3 ETAPA 3 - Radiância e efeitos fotobiológicos

Nesta etapa são considerados os efeitos fotobiológicos indicados na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Os parâmetros *c, d, g, h, i, j, k* e *l*, são fornecidos pela diretiva 2006/25/CE e são equipalentes às irradiâncias registadas pelo foto-radiómetro apresentadas na tabela 10 do ponto 5.2.3.1.

Tabela 8: Efeitos fotobiológicos baseados em valores da radiância

Risco	EN/IEC62471	λ (nm)	2006/25/CE	Foto-radiómetro
Luz azul	L_B	300-700	c. d.	c. d.
Retina térmica	L_R	380-1400	g. h. i.	g. h. i.
Retina térmica (estímulo visual fraco)	L_{IR}	780-1400	j. k. l.	j. k. l.

Atendendo à equação do método alternativo, a radiância L pode ser calculada pela expressão seguinte.

Equação 31

$$L = E \frac{4 \cdot r^2}{\pi \cdot F^2} \quad (W/m^2sr)$$

O foto-radiómetro regista valores de irradiância de segundo a segundo. O valor da irradiância E (para cada risco fotobiológico) corresponde ao maior valor de todos os registados. Recorda-se que r é a distância do detetor à fonte de luz e F o diâmetro de abertura (*stop field*).

5.2.3.1 Radiância L_B (perigo da luz azul)

No procedimento de cálculo da radiância para o perigo da luz azul, considera-se um campo de visão (F.O.V) de 0.11 rad, para um tempo de exposição igual ou superior a 10000 s (fonte de luz contínua). Determina-se o diâmetro de abertura livre F , multiplicando o valor do F.O.V. pela distância da fonte ao detetor do radiómetro r pela equação 31.

Equação 32

$$F = (F.O.V.)r$$

A seguir, coloca-se o diâmetro de abertura livre (*stop field*) à frente da fonte de luz como se pode observar na figura 42 e registam-se em ficheiro Excel os valores da irradiância emitidos pela fonte de luz nestas condições.

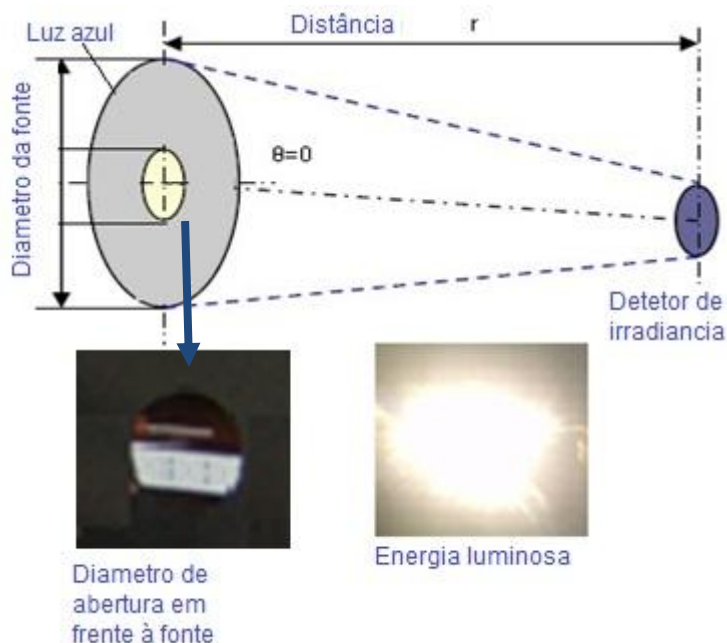


Figura 41 Processo de medição da irradiância para o cálculo da radiância do efeito da luz azul

Tabela 9 : Risco da luz azul - valores obtidos na medição da irradiância e usados no cálculo da radiância L_B da luz azul

N	DATE	Lux/Lum [Lux]	c.d. 300-700 [W/m ²]
0	2014/05/08 12.13.33	502	0,365
1	2014/05/08 12.13.34	502	0,365
2	2014/05/08 12.13.35	502	0,365
3	2014/05/08 12.13.36	502	0,365
4	2014/05/08 12.13.37	502	0,365
5	2014/05/08 12.13.38	502	0,365
6	2014/05/08 12.13.39	501	0,365
7	2014/05/08 12.13.40	501	0,365
8	2014/05/08 12.13.41	501	0,365
9	2014/05/08 12.13.42	501	0,365
10	2014/05/08 12.13.43	501	0,365
11	2014/05/08 12.13.44	501	0,365
12	2014/05/08 12.13.45	501	0,365
13	2014/05/08 12.13.46	501	0,365
14	2014/05/08 12.13.47	501	0,365
15	2014/05/08 12.13.48	501	0,365
16	2014/05/08 12.13.49	501	0,365
17	2014/05/08 12.13.50	501	0,365
18	2014/05/08 12.13.51	501	0,365
19	2014/05/08 12.13.52	501	0,365
			Luz Azul

Na avaliação do efeito da luz azul, só se efectua a medição da radiância, caso o tamanho da fonte aparente seja superior a 0.011 rad (superior ao diâmetro de abertura F). Caso contrário, a avaliação deste risco é efetuada através da medição da irradiância. Os valores da irradiância incluem o valor da ponderação espectral $B(\lambda)$ correspondente ao risco da luz azul.

5.2.3.2 Radiância L_R (perigo térmico na retina)

A determinação da radiância para o perigo térmico na retina, inclui a avaliação de dois riscos fotobiológicos que são:

- Perigo térmico na retina L_R na gama de comprimentos de onda de 380 nm a 1400 nm. O tempo máximo de exposição é de 10 s (devido ao efeito de aversão) que corresponde ao F.O.V de 0,011 rad;
- Perigo térmico na retina de fraco estímulo L_{IR} na gama de comprimentos de onda de 780 nm a 1400 nm. O tempo de exposição é superior a 10 s com um F.O.V correspondente a 0,011 rad.

Para efeitos de ordem prática, e assumindo uma fonte de luz de emissão contínua, considera-se o F.O.V de 0,011 rad para a avaliação de ambos os riscos de perigo térmico na retina.

Caso os limites de exposição no primeiro perigo não sejam cumpridos, é necessário efetuar nova medição com um tempo de exposição inferior a 10 s e correspondente F.O.V.

Considerando a distância da fonte ao detetor do radiómetro igual à do procedimento para o perigo da luz azul, determina-se um novo diâmetro de abertura F (stop field).

Após colocar a nova abertura em frente da fonte, adquirem-se os valores da irradiância, para o cálculo posterior da radiância do efeito fotobiológico em questão. Os valores da irradiância já incluem a ponderação espectral $R(\lambda)$ do risco térmico da retina sem e com estímulo visual fraco.

Tabela 10: Risco térmico na retina - valores obtidos na medição da irradiância e usados no cálculo da radiância L_R do perigo térmico na retina

N	DATE	Lux/Lum [Lux]	g.h.i. 380-1400 [W/m ²]	j.k.i. 780-1400 [W/m ²]
0	2014/05/08 12.28.05	40,4	0,2996	0,017
1	2014/05/08 12.28.06	40,3	0,2996	0,017
2	2014/05/08 12.28.07	40,3	0,2986	0,017
3	2014/05/08 12.28.08	40,4	0,2986	0,017
4	2014/05/08 12.28.09	40,4	0,2996	0,017
5	2014/05/08 12.28.10	40,5	0,2996	0,017
6	2014/05/08 12.28.11	40,4	0,2996	0,017
7	2014/05/08 12.28.12	40,3	0,2996	0,017
8	2014/05/08 12.28.13	40,5	0,2986	0,017
9	2014/05/08 12.28.14	40,5	0,2996	0,017
10	2014/05/08 12.28.15	40,5	0,2996	0,017
11	2014/05/08 12.28.16	40,5	0,2996	0,017
			0,2996	0,017
			Retina térmica	R. térmica (Est. visual fraco)

Antes de fazer a medição, movimenta-se o stop field em frente da fonte de luz a medir, procurando encontrar o sinal óptimo a medir (ponto com maior luminosidade). Como a amostragem dos valores é efectuada de segundo a segundo é fácil detectar o valor máximo do do sinal a medir.

Neste caso, mediu-se a luz de apenas um LED, tendo em conta que o diâmetro de abertura utilizado foi menor que a fonte de luz (luminária). Por essa razão, aproximou-se o equipamento de medição da luz LED de forma a captar maior luminosidade, o que fez com que a distância de medição correspondesse a uma iluminância de 40 lux, não tendo qualquer influência no nos valores lidos de irradiância.

A figura 43 ilustra a posição entre fonte e detector para estes perigos fotobiológicos.

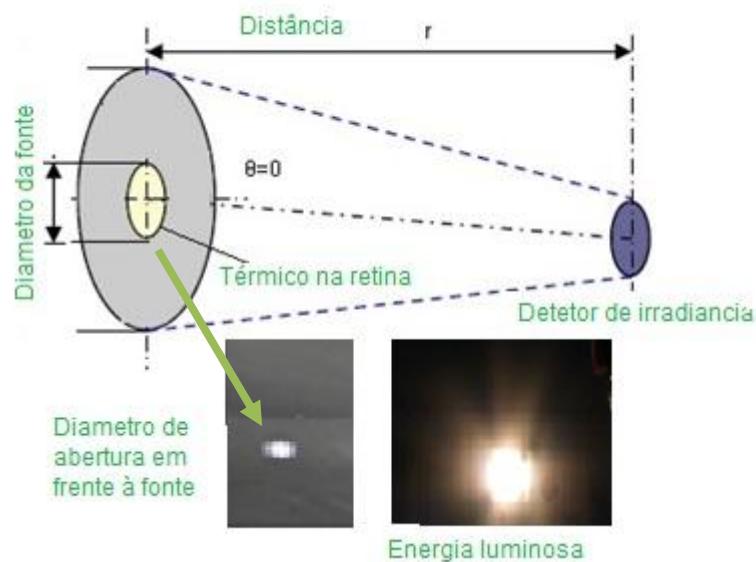


Figura 42 - Processo de medição da irradiância para o cálculo da radiação no perigo térmico na retina

A norma EN/IEC62471 fornece os valores dos limites de exposição para cada efeito fotobiológico, os quais são utilizados na análise dos valores lidos de irradiância e calculados de radiação.

Para obter o limite de exposição do efeito da retina térmica, foi necessário determinar a dimensão angular da fonte aparente α conforme se refere as equações 14 e 15.

O comprimento L , e o diâmetro de abertura F da fonte aparente estão sempre compreendidos entre os valores do campo de visão de 0,0017 rad a 0,11 rad.

5.2.4 ETAPA 4 - Classificação e Etiquetagem da fonte de luz (luminária)

Segundo a norma EN/IEC62471, as lâmpadas ou os sistemas de lâmpadas (fontes de emissão contínua) estão classificadas em quatro grupos de risco fotobiológico conforme indica a Tabela 12.

Tabela 11: Grupos de risco fotobiológico em lâmpadas e sistemas de lâmpadas

Etiqueta	Nome	Tempo de Exposição máxima (s)	Significado
RG0	Isento	>10 000	Sem perigo fotobiológico
RG1	Baixo risco	100 -10 000	Sem perigo fotobiológico abaixo do limite do comportamento normal
RG2	Risco moderado	0.25 -100	Não representa nenhum perigo devido à resposta de aversão à luz brilhante ou desconforto térmico
RG3	Alto risco	< 0.25	Perigosa mesmo que a exposição seja momentânea

A etiquetagem de lâmpadas ou sistemas de lâmpadas, atendendo à sua classificação, efetua-se de acordo com a Tabela 13.

Tabela 12: Etiquetagem de lâmpadas e sistemas de lâmpadas

Riscos	Isento	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
	RG0	RG1	RG2	RG3
Ultravioleta 200 nm- 400 nm	Desnecessária	AVISO Emissão UV neste produto	CUIDADO Emissão UV neste produto	ATENÇÃO Emissão UV neste produto
Luz azul para a retina 300 nm - 400 nm	Desnecessária	Desnecessária	CUIDADO Possível perigo de emissão de radiação ótica neste produto	ATENÇÃO Possível perigo de emissão de radiação ótica neste produto
Térmico na Retina 400 nm - 780 nm	Desnecessária	Desnecessária	CUIDADO Possível perigo de emissão de radiação ótica neste produto	ATENÇÃO Possível perigo de emissão de radiação ótica neste produto
Infravermelho 780 nm - 3 000 nm	Desnecessária	AVISO Emissão IR neste produto	CUIDADO Emissão IR neste produto	ATENÇÃO Emissão IR neste produto
Térmico na retina Estímulo visual fraco 780 nm - 1 400 nm	Desnecessária	ATENÇÃO Emissão IR neste produto	ATENÇÃO Emissão IR neste produto	ATENÇÃO Emissão IR neste produto

5.3 Resultados da avaliação de fonte de luz LED (Luminária) com foto-radiómetro

De acordo com o anexo EU_GD_IEC62471A da norma EN/IEC 62471, os limites exposição ou de emissão de lâmpadas ou sistemas de lâmpadas de emissão contínua para grupos de risco fotobiológico são apresentados na Tabela 14. A apresentação dos resultados obtidos nesta avaliação está de acordo com a tabela a referida tabela.

Tabela 13: Limite de emissão em lâmpadas contínuas para grupos de risco fotobiológico

Risk	Action spectrum	Symbol	Units	Emission Measurement					
				Exempt		Low risk		Mod risk	
				Limit	Result	Limit	Result	Limit	Result
Actinic UV	$S_{UV}(\lambda)$	E_s	$W \cdot m^{-2}$	0,001	-	-	-	-	-
Near UV		E_{UVX}	$W \cdot m^{-2}$	0,33	-	-	-	-	-
Blue light	$B(\lambda)$	L_b	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	100	-	10000	-	4000000	-
Blue light, small source	$B(\lambda)$	E_b	$W \cdot m^{-2}$	0,01*	0,028	1,0	0,028	400	-
Retinal thermal	$R(\lambda)$	L_R	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	$28000/\alpha = 3916017$	2827,6	$28000/\alpha$	-	$71000/\alpha$	-
Retinal thermal, weak visual stimulus**	$R(\lambda)$	L_{Rk}	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	545000	-				
				$0,0017 \leq \alpha \leq 0,011$					
				$6000/\alpha$	-				
				$0,011 \leq \alpha \leq 0,1$					
IR radiation, eye		E_{IR}	$W \cdot m^{-2}$	100	-	570	-	3200	-

Com recurso ao foto-radiómetro, obtiveram-se os valores de irradiância (exportados para uma folha Excel) com os quais se calcularam os valores da radiância para os efeitos fotobiológicos designados por perigo térmico na *retina* e perigo térmico de estímulo visual fraco na *retina* bem como os respetivos limites de exposição tendo em conta o tamanho α da fonte aparente. **A Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta estes resultados.

Tabela 14: Resultados obtidos pelo Foto-radiómetro – Método alternativo

							Limites de Emissão para grupos de riscos de lâmpadas contínuas		
Riscos	λ (nm)	Ponderação Espectral	Símbolo	Unidades	Valores medidos	Incerteza (%)	Isento Limite	Risco baixo Limite	Risco moderado Limite
Actínico UV	200-400	Suv (λ)	Es	W.m-2	0	--	0,001	0,003	0,03
UV-A	315-400		Euva	W.m-2	0	--	0.33	33	100
Luz azul	300-700	B (λ)	Lb	W.m-2.sr-1	38,4	--	100	10000	4000000
Luz azul (p. fonte)	300-700	B (λ)	Eb	W.m-2	0,363	--	0.01*	1	400
Térmico na retina	380-1400	R (λ)	Lr	W.m-2.sr-1	3154,2	--	$28000/\alpha = 4482328,5$	4482329	$710000/\alpha = 11365904,4$
Térmico na retina (fraco)	780-1400	R(λ)	Lir	W.m-2.sr-1	178,9	--	$6000/\alpha$	$6000/\alpha$	$6000/\alpha$
IR-olho	780-3000		Eir	W.m-2	0 *	--	100	570	3200
Térmico na pele	380-3000		Eh	W.m-2	0	--	--	--	--

O módulo de LEDs avaliado enquadra-se no grupo de risco “isento” considerando a fonte de luz avaliada como GLS.

Capítulo 6: Comparação de resultados entre foto-radiómetro e espectro-radiómetro

Em qualquer medição ou sistema de medição, a comparação de resultados experimentais com utilização de diferentes meios e diferentes metodologias, é um fator importante para a validação do sistema. Neste trabalho ela permite-nos avaliar, além dos efeitos fotobiológicos, todo o processo de medição, incluído casos práticos e incertezas associadas às medições.

Para esse efeito, realizou-se medições dos efeitos fotobiológicos com recurso ao espectro-radiómetro, de acordo com a norma EN/IEC62471 na gama espectral entre os 250 nm e os 750 nm. Os resultados estão apresentados no subcapítulo que se segue.

6.1 Medições realizadas com o Espectro-radiómetro

Na mediação com o espectro-radiómetro, a irradiância é obtida em função do número de counts (proporcional ao número de fótons recebidos pelo sensor) em cada intervalo de comprimento de onda ($< 1\text{nm}$) durante um período de tempo de medição conhecido.

O espectro da fonte de luz, obtido por este processo em valores de irradiância, é seguidamente multiplicado pelo fator de ponderação específico de cada efeito fotobiológico (actínica UV, luz azul e retina térmica).

Após este procedimento, o tratamento dos valores e a metodologia a aplicar são idênticas às do método alternativo (com foto-radiómetro).

A tabela 15 apresenta os resultados e as incertezas de medições obtidas com o espectro-radiómetro na avaliação da mesma fonte de luz utilizada no processo que envolve o foto-radiómetro multicanal.

Tabela 15: Resultados obtidos com Espectro-radiômetro – equipamento de referência

							LE_EN/IEC 62471		
Riscos	λ (nm)	Ponderação Espectral	Símbolo	Unidades	Valores medidos	Incerteza (%)	Isento Limite	Risco baixo Limite	Risco moderado Limite
Actinico UV	200-400	Suv (λ)	Es	W.m-2	0,0009	8,8	0,001	0,003	0,03
UV-A	315-400		Euva	W.m-2	0,006	6,1	0.33	33	100
Luz azul	300-700	B (λ)	Lb	W.m-2.sr-1	38,9	4,1	100	10000	4000000
Luz azul (p. fonte)	300-700	B (λ)	Eb	W.m-2	0,37	4,1	0.01*	1	400
Térmico na retina*	380-1400	R (λ)	Lr	W.m-2.sr-1	4334,1	4,0	28000/ α	28000/ α	71000/ α

* Avaliação limitada a 750 nm

6.2 Análise comparativa dos resultados obtidos pelos dois equipamentos

A tabela 17 apresenta os resultados obtidos pelos dois equipamentos na avaliação da mesma fonte de luz LED, tendo em conta os limites de emissão da norma.

A análise dos resultados, quer dos valores da irradiância quer dos valores da radiância para os efeitos fotobiológicos em questão, estão dentro dos limites de exposição mencionados na norma EN/IEC62471, enquadrados no grupo de risco isento, ou seja, a fonte avaliada não representa nenhum perigo para os olhos e pele.

Constata-se que a radiância nos riscos da retina térmica, tanto para um como para outro equipamento são muito baixos em relação aos limites normalizados e o valor obtido com o foto-radiómetro, é inferior em cerca de $1000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$.

Tabela 16: Resultados obtidos pelos dois equipamentos na avaliação da mesma fonte de luz

							LE_EN/IEC 62471
Riscos	λ (nm)	Ponderação Espectral	Símbolo	Unidades	Valores do Foto-radiómetro	Valores do Espectro- radiómetro	Isento Limite
Actínico UV	200-400	Suv (λ)	Es	W.m-2	0	0,0009	0,001
UV-A	315-400		Euva	W.m-2	0	0,006	0.33
Luz azul	300-700	B (λ)	Lb	W.m-2.sr-1	38,4	38,9	100
Luz azul (p. fonte)	300-700	B (λ)	Eb	W.m-2	0,363	0,37	0,01
Térmico na retina	380-1400	R (λ)	Lr	W.m-2.sr-1	3154,2	4334,1	4482328,5
Térmico na retina* (fraco)	780-1400	R(λ)	Lir	W.m-2.sr-1	178,9	--	6000/ α
IR-olho	780-3000		Eir	W.m-2	0	--	100
Térmico na pele	380-3000		Eh	W.m-2	0	--	--

*Avaliação limitada a 750 nmm

A radiância da luz azul obtida com o foto-radiómetro é praticamente igual ao valor obtido no equipamento de referência, situando-se no grupo de risco esento. Os efeitos do actínico UV e UV-A, não apresentam diferenças significativas.

Pode afirmar-se também que com o foto-radiómetro multicanal (equipamento alternativo) conseguem obter-se melhores resultados da avaliação do efeito da retina térmica, actínica UV e UV-A já que este foto-radiómetro apresenta uma gama de comprimentos de onda de operação mais alargada bem como apresenta melhor relação sinal-ruído de forma geral.

O foto-radiómetro multicanal fornece os valores de irradiância, incluindo ponderações espectrais, no intervalo de comprimento de onda entre os 200 e 3000 nm e o sinal eléctrico gerado pelo detetor é uma resposta à radiação visível incidente na sua área ativa. Além disso, os sensores absorvem os fotões visíveis, que provocam alterações nas suas características, permitindo assim a deteção nos diferentes comprimentos de onda.

No espectro-radiométrico, as ponderações espectrais são obtidas separadamente com os valores de irradiância obtidos num intervalo de 250 a 750 nm.

Uma outra análise que se pode fazer quanto aos resultados obtidos tem a ver com a relação sinal ruído (ou gama dinâmica de funcionamento) dos próprios equipamentos de medição. No espectro-radiométrico, aplicaram-se filtros numéricos para remover valores de sinal aleatórios muito pequenos (ruído) no espectro da irradiância total fruto da baixa gama dinâmica de funcionamento deste equipamento. A figura que se segue ilustra o espectro de irradiância total observada no processo de medição da radiância da luz azul por exemplo.

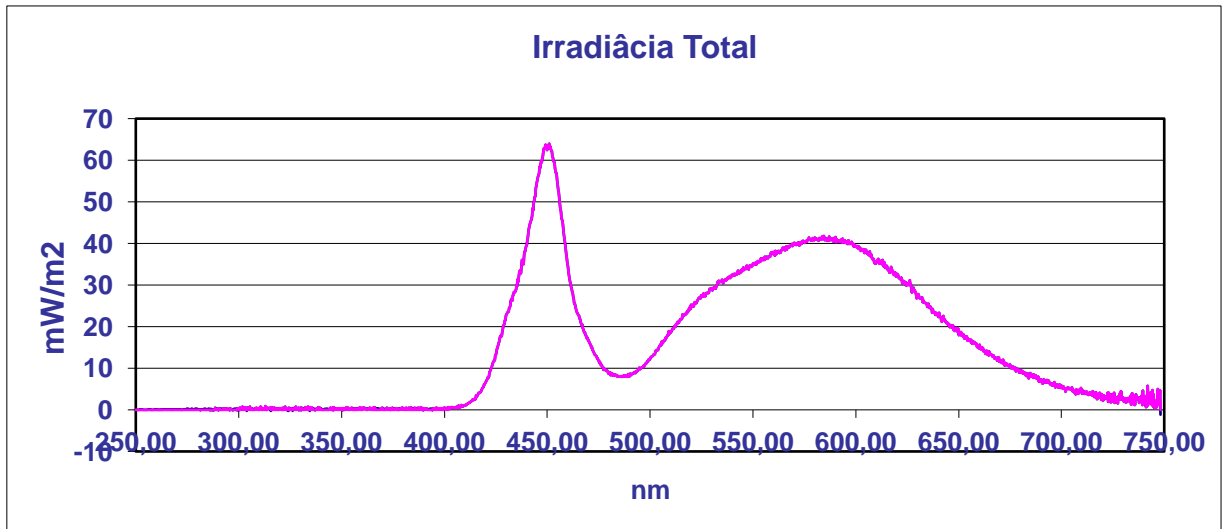


Figura 43 – Irradiância total observada na avaliação da luz azul com espectro-radiómetro

6.3 Casos práticos – Medidas realizadas à distância de 200 mm

Neste caso, o procedimento é basicamente igual ao que foi executado anteriormente. A única diferença está relacionada com a distância da fonte ao recetor cujo valor é 200 mm (fonte de luz não-GLS). A figura 45 ilustra um exemplo de medição do efeito da retina térmica.

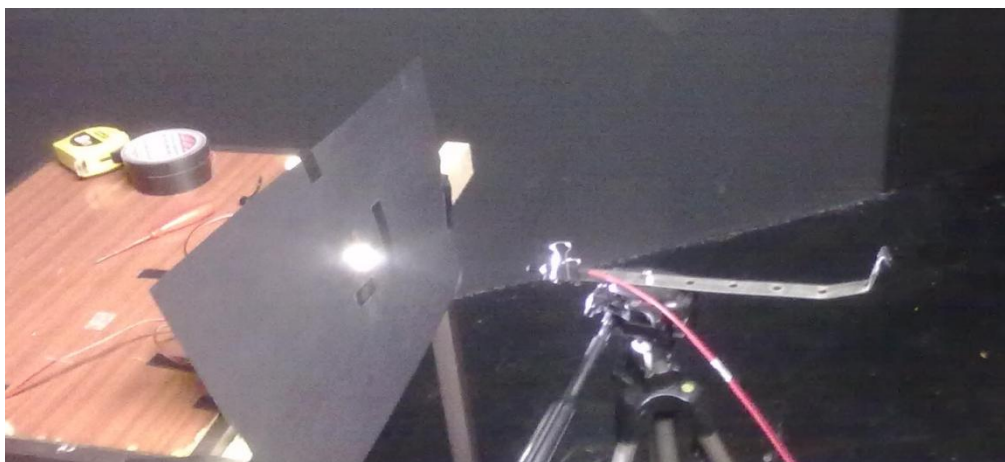


Figura 44 - Medição do efeito da retina térmica à distância de 200 mm

A tabela 18 indica os valores dos efeitos fotobiológicos obtidos pela medição com espectro-radiómetro.

Dado que, para a avaliação dos riscos fotobiológicos baseados na radiância, o LED do módulo utilizado apresenta uma dimensão inferior aos respectivos F.O.V, verifica-se que, neste caso particular, não existe diferença de procedimento entre o método alternativo e o método de referência descritos na norma IEC/EN62471.

Tabela 17: Resultados de casos práticos a distância de 200 mm

							LE_EN/IEC 62471		
Riscos	λ (nm)	Ponderação Espectral	Símbolo	Unidades	Valores medidos	Incerteza (%)	Isento Limite	Risco baixo Limite	Risco moderado Limite
Actínico UV	200-400	Suv (λ)	Es	W.m-2	0,0007	7,8	0,001	0,003	0,03
UV-A	315-400		Euva	W.m-2	0,014	6,1	0.33	33	100
Luz azul	300-700	B (λ)	Lb	W.m-2.sr-1	187	4,1	100	10000	4000000
Luz azul (p. fonte)	300-700	B (λ)	Eb	W.m-2	1,78	4,1	0,01	1	400
Térmico na retina*	380-1400	R (λ)	Lr	W.m-2.sr-1	238794,5	4,0	$28000/\alpha = 4482329$	$28000/\alpha$	$71000/\alpha$

(*) Avaliação limitada entre 250 a 750 nm;

De acordo com os resultados obtidos, constata-se que à distância de 200 mm, para a fonte de luz LED utilizada (um LED), não existe riscos da actínica UV e UV-A, mas, já se considera de risco 1 (baixo risco), podendo apresentar algum perigo para o olho, o efeito da luz azul. Quanto ao efeito da retina térmica, apesar de se manter no grupo isento de risco, nota-se um aumento significativo.

6.4 Síntese sobre as incertezas de medições

A incerteza é um parâmetro que em qualquer tipo de medição ou sistemas de medições, que influencia direta e indiretamente os resultados que se podem obter. Ela existe para todos os equipamentos, processos ou sistemas de medições individuais e combinada. Está intimamente relacionada com os resultados dos testes e de todo o processo de medição.

As Incertezas de equipamentos individuais são normalmente identificadas, mas os seus valores relativos na prática, e os seus valores combinados com outros equipamentos ou processo no mesmo teste, são conceitos alusivos. A incerteza total combinada dos resultados das medições é importante para a repetibilidade das medidas comparativas dos produtos LED's, face as outras tecnologias, bem como os produtos concorrentes.

Neste trabalho, os resultados foram obtidos através de dois equipamentos diferentes de medição: o foto-radiómetro e o espectro-radiómetro.

Segundo o certificado do fabricante, o foto-radiómetro é calibrado através do instrumento padrão secundário. Cada comprimento de onda associa-se a um sensor/canal de medida da intensidade da luz monocromática. A incerteza estimada é de 95% de confiança (com um fator de conversão $k=2$), à temperatura e humidade relativa de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $50.0\% \text{ R.H.} \pm 10,0\% \text{ R.H.}$, respetivamente, conforme a tabela que se segue.

Tabela 18: Exemplo da calibração do foto-radiómetro hd2402

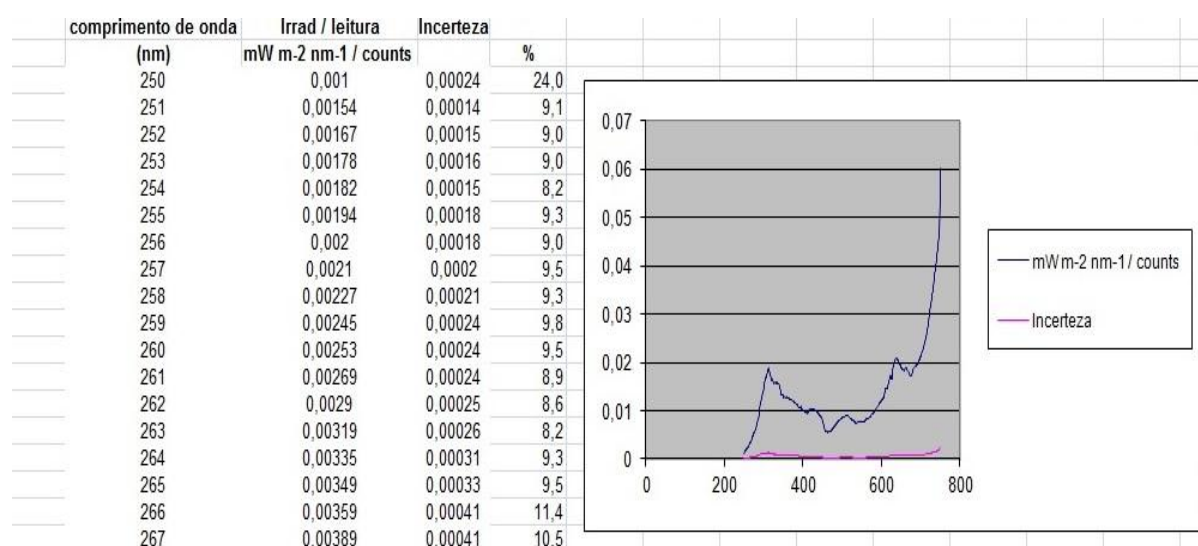
Efeitos	Sensor/canal	Calibração
UV	2	280 nm
UVA	5	365 nm
Luz azul	7	450 nm
IR	3	680 nm
Temperatura: $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; Humidade: $50.0\% \text{ R.H.} \pm 10,0\% \text{ R.H.}$		

De acordo com a diretiva 2006/25/CE, a gama de comprimentos de onda vai de 200 a 3000 nm. Como se pretende uma incerteza de medição que abranja cada

intervalo de comprimento de onda, afirma-se portanto, que não existe uma garantia da rastreabilidade entre as medições realizadas. Sendo assim, não é possível uma estimativa completa das incertezas das medições realizadas com o foto-radiómetro delta ohm 2402.

Relativamente ao espectro-radiómetro, a calibração é feita em $\text{mW.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}/\text{n.}^\circ$ de counts, para cada intervalo de comprimento de onda ($< 1\text{nm}$), permitindo assim conhecer a incerteza de cada comprimento de onda ao longo da gama de 250 a 750 nm. A tabela 20 ilustra um pequeno extrato de calibração do referido equipamento.

Tabela 19: Extrato de calibração do espectro-radiómetro



Desta forma, os resultados obtidos por este processo incluem as incertezas de medição associadas.

Capítulo 7: Conclusão e Trabalhos Futuros

7.1 Principais contribuições e reflexões

O estudo realizado neste trabalho é, de importância vital para todo o setor de atividade, uma vez que, fornece informações teóricas e práticas sobre segurança fotobiológica, no que respeita aos limites de exposição das radiações óticas artificiais de fontes de emissão contínua, podendo assim contribuir para a investigação e prevenção dos efeitos adversos para a pele e olho.

A tecnologia LED insere-se no grupo de lâmpadas de emissão contínua e, actualmente tem sido utilizada com maior frequência nos serviços de iluminação geral. Por esse motivo, torna-se essencial a avaliação do seu desempenho em todas as suas vertentes e, principalmente no que toca a segurança fotobiológica para garantir o cumprimento dos requisitos da norma IEC62471.

De acordo com os resultados obtidos da avaliação desse tipo de fonte de luz, verifica-se que de facto, ela possui uma alta segurança fotobiológica, tendo em conta os baixos valores de irradiância e radiância encontradas, podendo assim ser classificada no grupo de risco isento, sem nenhum perigo para a saúde.

Além disso, verifica-se que a metodologia alternativa é mais eficaz (do ponto de vista prático) e mais flexível do que a de referência, apesar da necessidade de realização de cálculos auxiliares à sua completa execução.

Em termos espectrais, a desvantagem do foto-radiómetro face ao espectro-radiómetro está na dificuldade em conceber um filtro que, quando combinado com um detetor, se encaixa exactamente na curva de ponderação que se pretende avaliar.

Um outro fator importante nos processos de avaliação fotobiológica é a gama de comprimentos de onda, ou seja, no método alternativo, a gama encontra-se entre os 200 e os 3000 nm, enquanto no método de referência está entre os 250 a 750 nm (neste estudo particular), o que limita a avaliação dos efeitos fotobiológicos existentes nas extremidades desses comprimentos de onda.

O estudo de toda a gama de comprimentos de onda recorrendo a espectro-radiómetros implica a combinação de diversos espectro-radiómetros especializados em gamas de comprimentos de onda específicos.

Verifica-se também que, a determinação da incerteza de medição com a utilização de foto-radiômetros é actualmente uma questão não resolvida pela indústria deste tipo de equipamentos, que se torna em mais uma desvantagem desse equipamento face ao espectro-radiómetro.

Contudo atendendo às proximidades dos resultados obtidos entre os dois equipamentos de medição, considera-se na prática que os valores obtidos são aceites, podendo ter uma incerteza de cerca de 15 a 20 %.

7.2 Trabalhos futuros

As fases seguintes do desenvolvimento deste trabalho deverão incidir claramente na proposta de optimização e melhoria do sistema de avaliação dos efeitos fotobiológicos, principalmente no campo das incertezas, no que respeita a todas as grandezas de influência dos resultados de medições.

Como perspectiva de trabalho futuro, é proposto que seja elaborado um estudo no âmbito da norma IEC 62778, que fomente a aplicação da norma IEC62471, na avaliação do efeito fotobiológico da luz azul de lâmpadas e sistemas de lâmpadas (incluindo luminárias), com base na determinação da temperatura de cor correlacionada do espectro de emissão da luz.

Essa avaliação incidirá sobre todos os produtos de iluminação GLS, que têm a principal emissão no espectro da luz visível (380 nm a 780 nm). Os princípios fundamentais de investigação baseiam-se em: transferência de informação de segurança fotobiológica, a partir duma componente de uma fonte de luz para outro produto de iluminação de mais alto nível, com base nessa componente; fazer as recomendações sobre a distância de medição e classificação dos riscos nos diferentes grupos. As referidas recomendações baseam-se também na análise das quantidades fotométricas relevantes para o efeito da luz azul, através de cálculos e considerações óticas espectrais.

7.3 Referências bibliográficas

- [1] A. N.-B. G. t. t. A. O. R. D. 2006/25/EC, “Radiation Protection Division, Health Protection Agency”.
- [2] “Human eye sensitivity and photometric quantities”.
- [3] G.-O. T. Note e A. V. S. -. Matemática, “Basic of Light Hazard Measurements,” 2011.
- [4] G. S. -. L. M. Solutions, “<http://www.gamma-sci.com/>,” [Online]. [Acedido em 10 2014].
- [5] A. C. d. Costa, “Fontes de luz, detetores e monocromadores”.
- [6] N. F. f. E. Efficiency, “The Basics of Efficient Lighting,” 2009.
- [7] ledsmagazine, “<http://www.ledsmagazine.com/>,” [Online].
- [8] E. Cardoso, “Luminárias Requisitos legais e normativos,” 2013.
- [9] I. C. o. Illumination, “Technical Report -Measurements of LEDS,” CIE.
- [10] a. e. I. Wikipédia, “http://pt.wikipedia.org/wiki/LED_branco,” 25 11 2013. [Online]. [Acedido em 2014].
- [11] G. Silva, Instrumentação Industrial, volume - 2ª Edição, Setubal: Escola Superior de Tecnologia de Setubal, 2004.
- [12] Aromadermatology, “Skin structure and function”.
- [13] D. U.-1.-A. /. G.-O. GmbH, “Basic of Light Hazard Measurements,” Gigahertz-Optik GmbH, D 82299 Türkenfeld, 2011.
- [14] CELMA, “Optical safety of LED lighting,” 2011.
- [15] K. Schulmeister, “The dependence of the apparent source on exposure position,” San Jose, USA, 2005.
- [16] M. -T. i. m. f. d. w. light, “Ensuring the next generation of LED Lighting is safe,” Mondoarc, 10 2007. [Online]. [Acedido em 10 2014].
- [17] S. A. U. G. a. G. V. Karl Schulmeister, “Location and size of the apparent source for laser and optical radiation ocular hazard evaluation,” ARC Seibersdorf research, A-2444 Seibersdorf, Austria.
- [18] E. Cardoso, “Luminárias Requisitos legais e normativos,” 2013.

- [19] D. O. S. S. D. MISURA, “MANUFACTURER’S DECLARATION OF CONFORMITY,” 2010/09/28.
- [20] D. O. S. S. D. MISURA, “MANUFACTURER’S DECLARATION OF CONFORMITY,” 35030 Caselle di Selvazzano (PD) Italy Via Marconi, 5, 2010.
- [21] [Online].
- [22] G. d. Silva, Instrumentação Industrial, Setúbal: Escola Superior de Tecnologias de Sitúbal, 2004.
- [23] H. P. A. Radiation Protection Division, “A Non-Binding Guide to the Artificial Optical Radiation Directive 2006/25/EC”.
- [24] H. P. A. Radiation Protection Division, “A Non-Binding Guide to the Artificial Optical Radiation Directive 2006/25/EC”.
- [25] “Human eye sensitivity and photometric quantities”.
- [26] “Human eye sensitivity and photometric quantities,” p. 8.
- [27] L. I. 9. REGISTERED, “Technical Guide Relative Eye Reponse,” *The Radiometry of Light Emission Diodes*, p. 18.
- [28] H. P. Agency, “A Non-Binding Guide to the Artificial Optical Radiation Directive 2006/25/EC”. *Radiation Protection Division, Health Protection Agency*.
- [29] profelectro, “<http://www.profelectro.info/?tag=fotometria>,” [Online].
- [30] digikey, “<http://www.digikey.com>,” [Online].
- [31] osram-os, “<http://www.osram-os.com>,” [Online].
- [32] C. C. R. Timothy Hitchcock, “Evaluation of LED and Broadband Sources,” North Carolina.
- [33] N. P. L. Emma R. Woolliams, “Determining the uncertainty associated with integrals of spectral quantities,” EURAMET - Metrology for Solid State Lighting, April 2013.
- [34] C. Suárez, “Medición de Radiaciones Ópticas Incoherentes,” VERTEX TECHNICS.

