



Protecção contra radiação não-ionizante: arco eléctrico

Susana Isabel Da Cunha Cerqueira

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Biomédica

Júri

Presidente: Doutor Francisco Paulo de Sá Campos Gil
Orientador: Doutor António Miguel Lino Santos Morgado
Vogais: Doutor Paulo Alexandre Vieira Crespo

Março, 2013



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Protecção contra radiação não ionizante: arco eléctrico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica
na Especialidade de Instrumentação Biomédica e Biomateriais

Autor

Susana Isabel da Cunha Cerqueira

Orientador

António Miguel Lino Santos Morgado

Júri

Presidente	Francisco Paulo de Sá Campos Gil Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	António Miguel Lino Santos Morgado Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Paulo Alexandre Vieira Crespo Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Março, 2013

"No mundo do pensamento, fazemos a cada passo descobertas que nos espantam e nos enlevam. É próprio do 'sage' saber fazer um bom uso de tantos tesouros e guardá-los eternamente para alegrar os seus olhos e o seu coração.", Louis Lavelle

Aos meus pais, irmão e avós,
que sempre acreditaram no meu empenho,
pela amizade, motivação e carinho.

Agradecimentos

Chegar ao fim desta etapa, que representa um marco importante na minha vida pessoal e profissional, e fazendo uma retrospectiva de todo o trabalho surge a consciência de que tal não seria possível executar com sucesso sem o apoio de muitas pessoas. Desta forma, manifesto a minha gratidão a todos os que estiveram presentes nos momentos de angústia, de ansiedade, de insegurança, de exaustão e de satisfação.

Em primeiro lugar gostaria de deixar o meu mais sincero agradecimento ao Doutor Miguel Morgado, meu orientador, pela competência com que me orientou, pelo entusiasmo e motivação, pelo seu apoio e confiança, pela sua amizade, e pelo tempo que generosamente dedicou que foi fundamental para a elaboração deste documento.

Ao Doutor Francisco Gil que me acompanhou desde o primeiro ano que cheguei a Coimbra. Além da sua função como professor teve sempre uma palavra de encorajamento em momentos importantes.

Ao Grupo de Electrónica e Instrumentação e a todos os que me ajudaram, e que não poderei discriminar exaustivamente aqui, o meu muito obrigada.

Aos meus colegas de curso, à Catarina Pereira, à Elisabeth Borges, à Mariana Madeira e à Sofia Sousa, por cada palavra de encorajamento e amizade. Ao João Meneses pela boa disposição transmitida e pela sua paciência, conhecimentos e amizade.

Aos amigos que fiz enquanto estudante de Engenharia Química e que nunca vou esquecer, pois estiveram sempre presentes quando preciso. Aos amigos que encontrei na Quantunna. Aos amigos que sempre me apoiaram e me deram força para continuar. Em especial aos que estiveram mais próximo e que ofereceram os seus conhecimentos e palavras de incentivo e carinho nos momentos mais complicados em que estava mais irritada, desorientada, chateada e triste: à Andreia de Sousa, ao André Pinto, ao João Ferreira, ao João Vicente, ao Marco Taborda, à Marisa Perdigoto, à Marisa Simões e ao Pedro Almeida.

Por último, mas não menos importante, a toda a minha família pelo apoio incondicional, acreditando sempre no meu esforço e empenho.

Aos meus pais, irmão e avó não tenho forma de recompensar o enorme esforço. Deram-me ânimo e ajudaram-me da forma que lhes foi possível, principalmente foram um grande apoio quando pensei que seria impossível acabar esta etapa.

Resumo

Actualmente há uma consciencialização generalizada da necessidade de decrescer o número de acidentes de trabalho e doenças profissionais, assim como da formação especializada dos trabalhadores em questões de segurança do trabalho. Estabeleceram-se então directrizes com o intuito de proteger os trabalhadores e o público em geral contra potenciais efeitos adversos da radiação não-ionizante. Estas directrizes aplicam-se a toda a exposição, aguda ou crónica, proveniente de fontes artificiais, estabelecendo limites de exposição.

Numa primeira fase, este trabalho serviu para verificar se as directrizes em que se baseia a legislação e normas portuguesas e europeias são as adequadas para a garantia de segurança no trabalho dos soldadores com arco eléctrico. Por outro lado, serviu para entender quais os riscos a que um soldador está sujeito devido à emissão de radiação óptica e que equipamentos deve utilizar para se proteger.

Analisámos, com base nas recomendações do ICNIRP, três espectros disponibilizados na literatura (A: GTAW; Corrente do arco: 300A; Eléctrodo: EWth-2; Gás de protecção: Ar AT 20cfm; B: GTAW; 275 A; EWth-2; He AT 50cfm; C: GMAW; 150 A; Linde 85; CO2 AT 40cfm) e um outro por nós medido (TIG; 60A; WT-20; Ar + CO2 a 4.5bar). A medição experimental foi realizada com a ajuda de um espectrómetro de fibra óptica, Ocean Optics USB+ 2000 UV-VIS e obrigou à adopção de uma metodologia de calibração utilizando uma fonte de luz calibrada Ocean Optics LS-1. Nestas análises determinámos a densidade óptica mínima para óculos de protecção.

A análise dos espectros A, C e TIG mostrou que os danos térmicos impunham um limite de exposição mais restritivo relativamente aos danos fotoquímicos. Por outro lado, no caso do espectro C, os efeitos fotoquímicos são restritivos em relação aos efeitos térmicos. A densidade óptica mínima para óculos de protecção varia entre 4.21 (espectro C) e 5.53 (espectro TIG).

Podemos concluir que o mecanismo de interação da luz (térmico ou fotoquímico) com os tecidos oculares, que apresenta maior potencial de dano depende das condições do processo de soldadura. As densidades ópticas que determinámos estão dentro da gama dos valores disponibilizados nos equipamentos de protecção comercializados.

O conjunto de recomendações relativas à exposição dos olhos e pele à radiação óptica incoerente não permite fornecer um limite de exposição único que se aplique de forma prática a todos os processos de soldadura por arco eléctrico. Contudo, penso que mostrámos que a interpretação correcta destas recomendações, algo que exige competências, como, por exemplo, as de um Engenheiro Biomédico, juntamente com a utilização de uma técnica experimental relativamente simples, permite o cálculo correcto dos factores de segurança aplicáveis as diversos processos de soldadura por arco eléctrico.

Palavras-chave: Protecção contra radiação, radiação não ionizante, soldadura, arco eléctrico, acidente de trabalho, equipamento de protecção.

Abstract

Nowadays, there is a widespread awareness of the need to decrease the number of occupational hazards and diseases and of providing specialized training to workers in matters of safety. Guidelines have been established in order to protect workers and the general public against potential adverse effects of non-ionizing radiation. These guidelines establish exposure limits and apply to all types of exposure, acute or chronic, from artificial sources.

Initially, this work served to verify if the guidelines that underpin the Portuguese and European legislation and standards are appropriate enough to ensure the safety at work of electric arc welders. On the other hand, it allowed the understanding of what are the risks to which a welder is subjected due to the emission of optical radiation and what equipment should be used to insure their protection.

Based on the recommendations of the ICNIRP, both three spectra available in the literature (A: GTAW; Arc Current: 300A; Electrode: EWTh-2; Shielding gas: Air AT 20cfm B: GTAW, 275 A; EWTh-2; He 50cfm AT, C: GMAW, 150 A, Linde 85; CO₂ 40cfm TA) and another measured by us (TIG; 60A; WT-20; Ar + CO₂ 4.5bar) were analyzed. The measurements were carried out with the aid of a fiber optical spectrometer, Ocean Optics USB + 2000 UV-VIS which required the adoption of a calibration methodology using a calibrated light source, Ocean Optics LS-1. During this analysis the minimum optical density for welding goggles was determined.

The analysis of the A, C and TIG spectra showed permissible exposure limits for thermal damage should be stricter in relation to the photochemical effects. On the other hand, in the case of spectrum C, the photochemical effects are restrictive in relation to thermal effects. The minimum optical density for welding goggles varies between 4.21 (spectrum C) and 5.53 (spectrum TIG).

We can conclude that the light interaction mechanism (thermal or photochemical) with ocular tissue that presents the greatest damage potential depends on the conditions of the welding process. The determined optical densities are within the range of the values available in the commercialized protection equipment.

The set of recommendations concerning the exposure of eyes and skin to incoherent optical radiation does not allow the setting of a single exposure limit that can be applied to

all arc welding processes. However, I think we have shown that the correct interpretation of these recommendations, which requires a set of skills, which a Biomedical Engineer, for example, has, together with the use of a relatively simple experimental technique enables the correct determination of the safety factors applicable to the various arc welding processes.

Keywords: Protection against radiation, non-ionizing radiation, welding arc, accident at work, protective equipment.

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas	x
Simbologia.....	x
Siglas	xi
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. Motivação	12
1.2. Objectivo.....	14
2. PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÃO NÃO IONIZANTE: RADIAÇÃO ÓPTICA INCOERENTE	15
2.1. Radiação óptica incoerente	15
2.2. Propagação da radiação óptica nos tecidos oculares.....	17
2.3. Propagação da radiação óptica na pele	24
2.4. Mecanismos de interacção da radiação óptica nos tecidos biológicos	27
2.5. Efeitos da radiação óptica nos tecidos oculares	29
2.6. Efeitos da radiação óptica na pele.....	32
3. ARCO ELÉCTRICO	36
3.1. Caracterização da radiação óptica do arco eléctrico	36
3.2. Práticas correntes de protecção contra radiação do Arco Eléctrico	38
4. LIMITES DE EXPOSIÇÃO: AS RECOMENDAÇÕES DO ICNIRP.....	40
5. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL NA UNIÃO EUROPEIA	45
6. ANÁLISE DE ESPECTROS DE RADIAÇÃO DE ARCO ELÉCTRICO.....	50
6.1. Análise de casos já publicados.....	50
6.2. Estudo experimental: espectro de processo de soldadura TIG	56
7. DISCUSSÃO	62
8. CONCLUSÃO.....	65
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
10. Anexo A.....	70
11. Anexo B.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Espectro electromagnético [7].	15
Figura 2: Morfologia do olho humano [13].	17
Figura 3: Coeficientes de absorção para diferentes espécies absorventes em função do comprimento de onda [16].	20
Figura 4: Espectro de transmitância [17] (a) e Espectro de absorção [18] (b) da córnea humana.	21
Figura 5: Espectro de transmitância [17] (a) e o Espectro de absorção (b) do cristalino humano [19].	22
Figura 6: Transmitância ocular [17].	22
Figura 7: Penetração de diferentes comprimentos de onda no olho [2].	23
Figura 8: Morfologia da pele humana [13].	24
Figura 9: Espectro de absorção da pele para diferentes fluoróforos existentes na pele [20].	25
Figura 10: Penetração de diferentes comprimentos de onda na pele [2].	26
Figura 11: Diferentes tipos de cancro de pele: carcinoma das células basais (a), carcinoma espinocelular (b) e melanoma maligno (c).	34
Figura 12: Equipamento de protecção individual básico usado durante a operação de soldagem a arco eléctrico [34].	39
Figura 13: Função de ponderação $S(\lambda)$ retirado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].	41
Figura 14: função de ponderação $B(\lambda)$ retirado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].	42
Figura 15: função de ponderação $R(\lambda)$ retirado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].	43
Figura 16: Sinalização típica utilizada no ambiente de trabalho para avisar da existência de perigos e recomendar a utilização de equipamento de protecção individual. Toda a sinalização de segurança deve cumprir os requisitos da Directiva de Sinalização de Segurança (92/58/CEE) adaptado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].	46

Figura 17: Condições de teste - Processo: GTAW; Corrente do arco: 300A; Eléctrodo: EWth-2; Gás de protecção: Ar AT 20cfm [38].	50
Figura 18: Condições de teste - Processo: GTAW; Corrente do arco: 275 A; Eléctrodo: EWth-2; Gás de protecção: He AT 50cfm [38].	51
Figura 19: Condições de teste - Processo: GMAW; Corrente do arco: 150 A; Eléctrodo: Linde 85; Gás de protecção: CO ₂ AT 40cfm [38].	51
Figura 20: Saída espectral da fonte de luz LS-1.	57
Figura 21: Espectro da fonte LS-1 medido pelo espectrómetro	57
Figura 22: Espectro corrigido da fonte LS-1, com um total de contagens de 14002353,17.	58
Figura 23: Espectro de calibração.	59
Figura 24: Espectro de radiação de arco eléctrico obtido experimentalmente. Condições de teste - Processo: TIG; Corrente do arco: 60A; Eléctrodo: WT-20; Gás de protecção: Ar + CO ₂ a 4.5bar.	59
Figura 25: Espectro de emissão por processo TIG calibrado entre 360nm e 890nm.	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: regiões do espectro óptico [8].....	16
Tabela 2: Resumo dos efeitos adversos no olho devido a exposição prolongada às diferentes gamas de comprimento de onda [2].....	31
Tabela 3: Classificação dos fotótipos de pele segundo Fitzpatrick [27].	32
Tabela 4: Resumo dos efeitos adversos na pele devido a exposição prolongada às diferentes gamas de comprimento de onda [2].....	35
Tabela 5: Potencial de ionização e condutividade térmica de gases de protecção de arco eléctrico [32].....	37
Tabela 6: Exposição máxima admissível (MPE) e Densidade óptica (OD) mínima para materiais de protecção, para os diferentes espectros.	55
Tabela 7: Exposição máxima admissível (MPE) e Densidade óptica (OD) mínima para materiais de protecção para o espectro TIG. Análise feita na gama de comprimentos de onda de 360nm a 890nm.....	61
Tabela 8: Densidade óptica (OD) e <i>shade number</i> para os quatro espectros analisados. ...	61
Tabela 9: Valores limite de exposição para radiação óptica não coerente [2].	71

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

E_{eff} – Irradiância efectiva normalizada a uma fonte monocromática a 270nm

$[\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}]$

H_{eff} – exposição radiante eficaz: exposição radiante ponderada espectralmente por $S(\lambda)$ $[\text{Jm}^{-2}]$

λ – Comprimento de onda [nm]

E_{λ} – Irradiância espectral $[\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}]$

$S(\lambda)$ – Ponderação espectral: eficácia espectral relativa ao comprimento de onda e os efeitos para a saúde da radiação ultravioleta sobre os olhos e a pele [adimensional]

$\Delta\lambda$ – Largura de banda em nanómetros [nm]

$t, \Delta t$ – tempo, duração da exposição [s]

L_{λ} – radiância espectral da fonte $[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}]$

$R(\lambda)$ – ponderação espectral: tendo em conta a relação entre o comprimento de onda e a lesão térmica do olho causada por radiações visíveis e IVA [adimensional]

$B(\lambda)$ – ponderação espectral tendo em conta a relação entre o comprimento de onda e a lesão fotoquímica causada por radiações de luz azul [adimensional]

L_{R} – radiância eficaz (lesão térmica): radiância calculada ponderada por $R(\lambda)$

$[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}]$

L_{B} – radiância eficaz calculada ponderada espectralmente por $B(\lambda)$ $[\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}]$

E_{B} – irradiância eficaz: irradiância calculado ponderada espectralmente por $B(\lambda)$ $[\text{Wm}^{-2}]$

E_{IV} – irradiância total (lesões térmicas) $[\text{Wm}^{-2}]$

E_{pele} – irradiância total para a pele $[\text{Wm}^{-2}]$

H_{pele} – exposição radiante: integral ou a soma da irradiância em ordem ao tempo e ao comprimento de onda para a radiação visível e infravermelha $[\text{Jm}^{-2}]$

α – Subtendente angular: ângulo subtendido por uma fonte aparente (objecto real ou virtual que forma imagem retiniana mais pequena possível), tal como vista num ponto no espaço [mrad]

Siglas

ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

DF – Departamento de Física

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ADN – ácido desoxirribonucleico

UV – Ultravioleta

UVA – Ultravioleta próximo

UVB – Ultravioleta médio

UVC – Ultravioleta longínquo

IR – Infravermelho

IRA – Infravermelho próximo

IRB – Infravermelho médio

IRC – Infravermelho longínquo

RUV – Radiação ultravioleta

LE – Limite de exposição

CIE – *International Commission on Illumination*

CEN – Comité Europeu de Normalização

NIOSH – *National Institute for Occupational Safety and Health*

AWS – *American Welding Society*

OSHA – *Occupational Safety and Health Administration*

ACGIH – *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*

WHO – *World Health Organization*

MPE – *Maximum permissible exposure* ou exposição máxima admissível

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O conhecimento dos riscos relacionados com a actividade profissional e a minimização dos seus efeitos sobre a saúde e a segurança dos trabalhadores exige uma intervenção específica adequada, capaz de avaliar os problemas existentes e de propor soluções compatíveis com a realidade do mundo do trabalho.

Todos os trabalhadores têm o direito de trabalhar em condições de segurança e num ambiente saudável. Por isso, segurança no trabalho é um conjunto de metodologias que tem como função prevenir os acidentes de trabalho, eliminando as condições inseguras do ambiente e educar os trabalhadores a utilizarem medidas preventivas [1].

Qualquer pessoa que trabalhe em ambiente interior está sujeito à exposição de radiação óptica artificial. Para além das fontes de luz presentes, tais como iluminação e os ecrãs dos computadores, a radiação óptica artificial pode ser produzida deliberadamente, como parte integrante ou consequência de algum processo. Existem actividades económicas onde a exposição à radiação óptica é mais acentuada, nomeadamente e com interesse para este estudo a actividade de soldadura. Esta actividade vem referenciada como uma actividade exposta à radiação óptica numa gama de comprimentos de onda que vai desde os ultravioletas (UV) aos infravermelhos (IR) [2].

Organismos internacionais e nacionais ou peritos individuais são responsáveis pelo desenvolvimento de regulamentos, recomendações ou códigos de boas práticas para proteger os trabalhadores e o público em geral dos potenciais efeitos negativos da radiação, fornecendo princípios básicos de protecção [3].

A soldadura por arco eléctrico gera níveis elevados de radiação ultravioleta, visível e infravermelha. Estes níveis estão relacionados com a corrente do arco, o gás de protecção e o metal a ser soldado [4].

Os perigos da radiação UV e IR são aceites por todos desde há muito tempo, mas só recentemente os perigos da radiação visível foram reconhecidos como prejudiciais para uma exposição excessiva [5].

Existe uma grande controvérsia sobre o balanço benefícios/prejuízos da radiação ultravioleta para a saúde. Embora seja consensual que existem benefícios para a saúde quando há exposição a radiação ultravioleta de baixo nível, existem também efeitos adversos com exposição a níveis elevados desta radiação. Por isso, o estudo dos limites de exposição representa um verdadeiro desafio para alcançar o equilíbrio realista entre os efeitos benéficos e os adversos para a saúde [3].

Diversas entidades, como o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), *American Welding Society* (AWS), *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP), *World Health Organization* (WHO) e, *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) têm feito estudos sobre a actividade de soldadura com o objectivo de promover a segurança desta actividade, mas a realidade é que continuam a existir acidentes.

Na maioria dos casos o excesso de exposição excessiva neste tipo de trabalhador surge por falhas acidentais das medidas de segurança ou equipamentos de protecção. Por isso, nesta área específica da actividade industrial há necessidade de um documento com informação crucial das directrizes fundamentais relativas à protecção contra a radiação não-ionizante emitida por arcos de soldadura. A relação entre as diferentes legislações, normas e regulamentos sobre medidas específicas de segurança para protecção contra diversos tipos de riscos associados à actividade que resultam da irradiância são de extrema importância para a segurança dos trabalhadores.

1.2. Objectivo

O objectivo principal desta tese é a construção de um documento abrangente e de fácil acesso que permita que as entidades que trabalham com arcos eléctricos de soldadura, consigam compreender e aplicar as directrizes de protecção no ambiente de trabalho.

Deste modo ir-se-ão compilar as orientações para a exposição humana à radiação óptica baseadas em espectros de acção que levam em conta os efeitos nos olhos e pele através da pesquisa de leis, normas e regulamentos de protecção contra a radiação não-ionizante emitida por arcos de soldadura.

Os aspectos de segurança neste trabalho focam-se na radiação não-ionizante emitida por arcos de soldadura. Faz-se a análise dos espectros de emissão de arcos de diferentes combinações de corrente de arco, gás de protecção e metal de solda.

2. PROTECÇÃO CONTRA RADIAÇÃO NÃO-IONIZANTE: RADIAÇÃO ÓPTICA INCOERENTE

2.1. Radiação óptica incoerente

A radiação não ionizante não possui energia suficiente para ionizar os átomos e as moléculas com as quais interage, sendo as mais conhecidas e as que importam para este estudo: a luz visível, os infravermelhos e o ultravioleta. O limiar entre o que é radiação ionizante e não ionizante não está definida de modo preciso. Podemos considerar que a radiação UV mais energética (menor comprimento de onda) é ionizante, vindo referenciada na literatura para comprimentos de onda inferiores a 124nm [6]. Como os espectros sob análise apresentam comprimentos de onda superiores a 180nm, considera-se que toda a radiação emitida pelo arco eléctrico é não-ionizante. Estas bandas de radiação óptica pertencem ao espectro electromagnético, figura 1, e ocupam diferentes posições de acordo com a sua energia e comprimento de onda. Esta variação vai resultar em efeitos físicos e biológicos distintos.

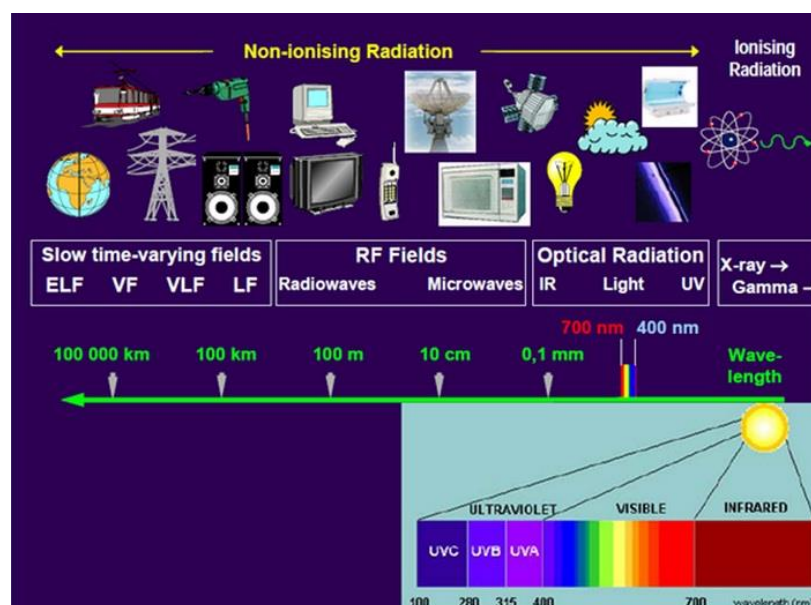


Figura 1: Espectro electromagnético [7].

Designa-se por radiação óptica toda a radiação electromagnética na gama de comprimento de onda entre os 100nm e 1mm. A tabela 1 divide a radiação óptica nas regiões espectrais definidas de acordo com a *International Commission on Illumination* (CIE).

Tabela 1: regiões do espectro óptico [8].

Banda	Comprimento de onda	Designação
UVC	100nm – 280nm	Ultravioleta longínquo
UVB	280nm – 315nm	Ultravioleta médio
UVA	315nm – 400nm	Ultravioleta próximo
Visível	400nm – 780nm	
IRA	780nm – 1.4µm	Infravermelho próximo
IRB	1,4µm – 3.0µm	Infravermelho médio
IRC	3.0µm – 1mm	Infravermelho longínquo

A soldadura por arco eléctrico é umas das operações de indústria que promove a emissão de radiação óptica. Os efeitos deste tipo de radiação no organismo humano limitam-se essencialmente aos olhos e pele uma vez que o poder de penetração da radiação óptica é baixo. O dano provocado nos olhos e na pele depende do mecanismo de interacção envolvido [9]. Para radiação óptica incoerente predominam os mecanismos térmicos e os mecanismos fotoquímicos.

A radiação óptica é não ionizante (com a salvaguarda que o limiar de ionização não está bem definido), isto é, não tem energia suficiente para provocar ionização, e o seu efeito é somático, ou seja, apresenta-se apenas na pessoa que sofreu a irradiação, não interferindo nas gerações posteriores [10].

A dosimetria da exposição do olho e da pele à radiação óptica requer o uso de várias quantidades radiométricas. A irradiância (W/m^2) descreve a energia incidente por unidade de área de todo o espectro electromagnético e a exposição radiante (J/m^2) corresponde à energia radiante acumulada por unidade de área [3].

2.2. Propagação da radiação óptica nos tecidos oculares

O olho é o órgão responsável pela captação e transformação da informação luminosa em sinais eléctricos para serem posteriormente descodificados pelo sistema nervoso [11].

Desde a entrada da luz do meio exterior até à chegada à retina, o olho actua apenas como um instrumento óptico cuja finalidade é produzir na retina uma imagem da cena observada. Na retina, através de processos químicos a luz é convertida em impulsos eléctricos que posteriormente são transportados até ao cérebro através do nervo óptico [12].

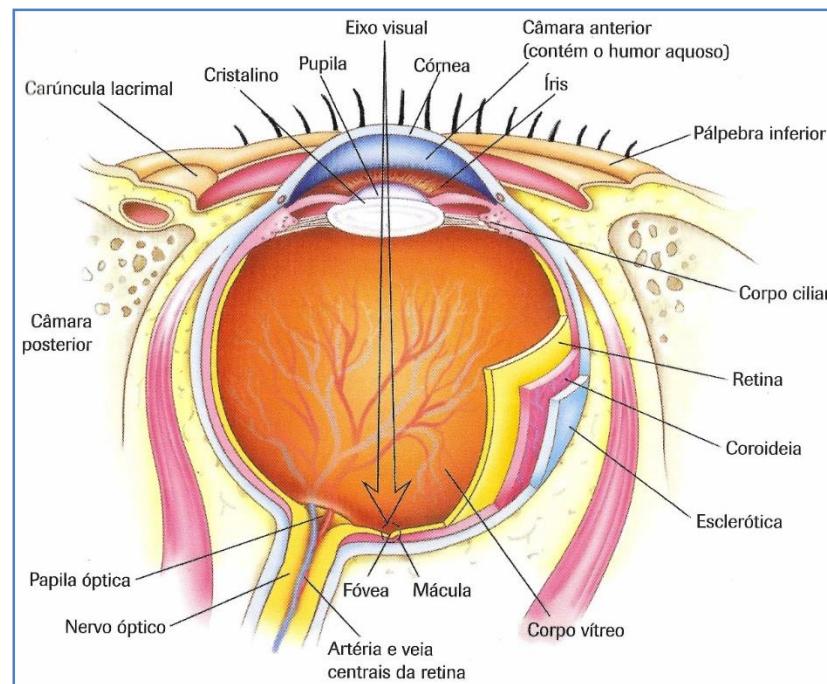


Figura 2: Morfologia do olho humano [13].

O olho é formado pelo globo ocular e cristalino. A parede do globo ocular é composta por 3 camadas: camada externa constituída pela esclerótica e córnea; camada média constituída pelo corpo ciliar e íris; e a camada interna constituída pela retina (ver figura 2) [14].

A esclerótica é a camada externa, firme opaca e branca que delimita a porção colorida do olho. É responsável pela manutenção da forma do olho e pela protecção das estruturas

internas oculares bem como constitui o ponto de inserção para os músculos que movem o olho.

A córnea é uma estrutura avascular e transparente constituída por uma matriz de tecido conjuntivo que permite a entrada da luz no olho. Tem como principais funções proteger a parte anterior do globo ocular e participar nos processos de refacção da luz. Funciona como uma lente que, associada ao cristalino, compõe o sistema óptico responsável pela produção das imagens na retina.

A camada média do globo ocular assume funções vasculares, sendo responsável pela nutrição das restantes componentes do globo ocular. A íris para além de conferir aos olhos a sua cor é uma estrutura contráctil rodeando uma membrana chamada pupila. A luz entra através da pupila e a íris é responsável por controlar a quantidade de luz que chega à retina, ou seja, o tamanho da pupila é determinado pela contracção e relaxamento da íris e varia conforme a intensidade da luz. A pupila torna-se mais dilatada quando há pouca luz para que possam chegar mais fotões à retina; por outro lado contrai-se quando há muita luz.

A retina é a camada mais interior do olho. Está dividida em retina pigmentada, mais externa, e retina sensorial, interna. A retina pigmentada actua como um pano de fundo negro que aumenta a acuidade visual. A retina sensorial responde à luz e é composta por células fotorreceptoras chamadas bastonetes e cones. Os bastonetes são responsáveis pela visão nocturna e os cones pela visão das cores e acuidade visual. A mácula é uma região de 4mm de diâmetro localizada perto do centro da retina onde, por sua vez, no centro se encontra a fóvea. A fóvea é a parte da retina com maior acuidade visual pois é a região que possui a maior concentração de fotorreceptores, sendo nela onde geralmente se foca a luz. A papila óptica é o ponto por onde sai o nervo óptico e por onde os vasos sanguíneos entram no olho. A papila óptica também é chamada de ponto cego do olho porque não possui células fotorreceptoras e conseqüentemente não tem qualquer tipo de resposta à luz.

Existem dois compartimentos principais no olho: um de maiores dimensões posterior ao cristalino e um de dimensões menores anterior ao cristalino. O compartimento anterior ao cristalino divide-se em duas câmaras: câmara anterior, entre a córnea e a íris, e a câmara posterior, entre a íris e o cristalino. O humor aquoso, que preenche a câmara anterior, é uma fonte especializada de nutrição para as estruturas avasculares, córnea e cristalino, e participa também na refacção da luz [5].

A retina delimita o compartimento posterior do olho que é preenchido por uma substância gelatinosa transparente, o humor vítreo. O humor vítreo ajuda a manter a pressão intraocular e mantém o cristalino e retina nos seus lugares. Também participa nos processos de refacção da luz dentro do olho.

O cristalino é uma estrutura biológica transparente e biconvexa, com maior convexidade do lado posterior. Esta lente é responsável pela acomodação: tem a capacidade de alterar a sua curvatura de modo a ajustar-se às diferentes necessidades de focagem.

O aparelho lacrimal proporciona um mecanismo natural de protecção da superfície ocular contra infecções e contra efeitos corrosivos de poeiras e outras partículas que possam atingir o olho através da produção de lágrimas. Estas proporcionam uma superfície húmida e lubrificada que se mantém sobre o epitélio corneano.

Depois de uma breve análise da anatomia e fisiologia do olho estamos em condições de analisar os processos de propagação da luz no globo ocular.

O olho pode ser analisado através de um modelo simples que equivale opticamente a considerar os efeitos produzidos pela córnea, cristalino e humores aquoso e vítreo, designado pelo olho reduzido. São dois os fenómenos que determinam a propagação da luz a nível molecular no interior do globo ocular: a dispersão e a absorção.

A dispersão consiste na absorção do feixe incidente com subsequente reemissão de toda ou parte dessa energia. Em olhos saudáveis, a transparência dos tecidos oculares anteriores é garantida pela ausência de espécies absorventes na região do visível mas também pelo arranjo ordenado que existe a nível dos constituintes da córnea e do cristalino [8]. A dispersão ocorre em meios onde existam flutuações do índice de refacção. Essas flutuações podem resultar da presença de partículas discretas ou corresponder a variações contínuas (p. ex.: impostas por gradientes térmicos) [15].

A absorção por um dado tecido está directamente relacionada com o comprimento de onda da radiação incidente e com os cromóforos presentes. O comprimento de absorção corresponde à distância média percorrida por um fóton no interior do tecido antes de ser absorvido, ou seja, a profundidade média a que ocorre a transferência de energia para o tecido.

A irradiância de um feixe óptico após atravessar um tecido biológico com coeficiente de absorção α é dada por:

$$I = I_0 e^{-\alpha \cdot d}$$

em que I_0 é a irradiância do feixe incidente e d é a distância percorrida no tecido [8].

As características de transmitância resultam do espectro de absorção dos diferentes cromóforos (uma molécula ou de um grupo de moléculas que absorve um fóton de um determinado comprimento de onda moléculas alvo) presentes no tecido. Na figura 3 podemos observar os coeficientes de absorção da água, principal constituinte do estroma corneano, da hemoglobina, presente na parte vascular do olho, da melanina, localizada no epitélio pigmentado da retina.

O conhecimento das características de absorção dos diferentes tecidos oculares é essencial para entender quais os comprimentos de onda que por exposição à radiação óptica são capazes de causar danos nas diferentes estruturas do olho.

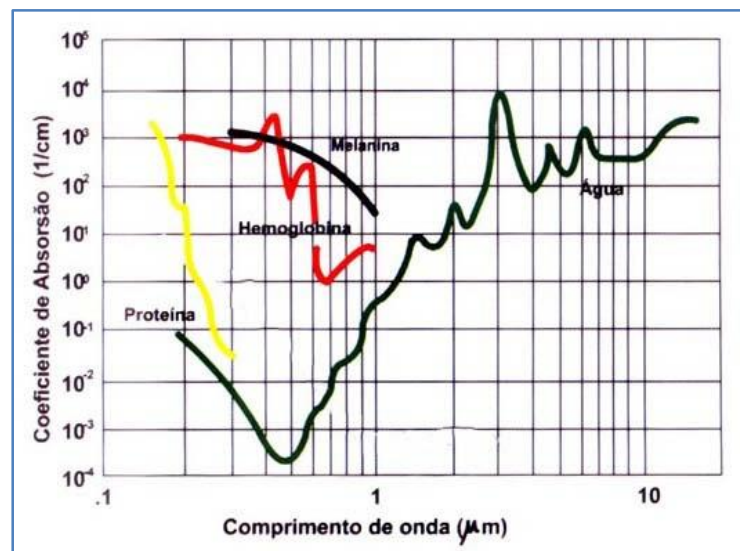


Figura 3: Coeficientes de absorção para diferentes espécies absorventes em função do comprimento de onda [16].

A córnea absorve os comprimentos de onda das bandas espectrais UVC, IRB e IRC, conforme se pode observar na figura 4. A absorção diminui de forma significativa na córnea entre os comprimentos de onda 220 nm e os 240 nm (figura 4b). Esta diminuição acentuada

permite delimitar três regiões entre os 190 nm e 260nm. Para comprimentos de onda abaixo dos 220 nm temos uma zona de elevada absorção, entre 220nm e 240nm a absorção sofre um decréscimo acentuado, e dos 240 nm aos 260 nm temos um segmento de baixa absorção. Numa gama de comprimentos de onda entre os 400nm e os 1200 nm a córnea assume-se como transparente (figura 4a). Estas características de absorção são controladas essencialmente pelo espectro de absorção da água e dos diferentes colagénios presentes no estroma corneano. Já na região do IRB e IRC, o espectro de absorção da córnea segue o espectro de absorção da água.

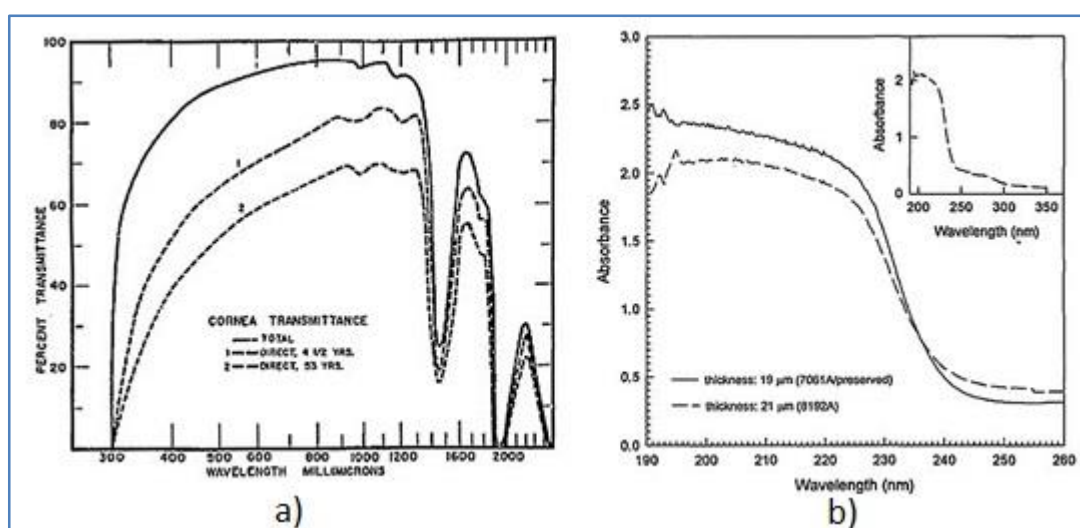


Figura 4: Espectro de transmitância [17] (a) e Espectro de absorção [18] (b) da córnea humana.

A radiação UV transmitida pela córnea (UVB e UVA) é filtrada pelo cristalino como se pode observar na figura 5. As características de transmissão do cristalino variam com a idade. Em cristalinos jovens as características de absorção resultam principalmente dos espectros de absorção da água e do triptofano. A exposição contínua a radiação ultravioleta resulta em processos de fotólise do triptofano (aeróbios e anaeróbios) que levam à acumulação de fluoróforos (cromóforos fluorescentes). É geralmente postulado que esta acumulação de fluoróforos no cristalino serve o propósito de proteger a retina ao longo do processo de envelhecimento [8] contra danos provocados por luz UVA e azul.

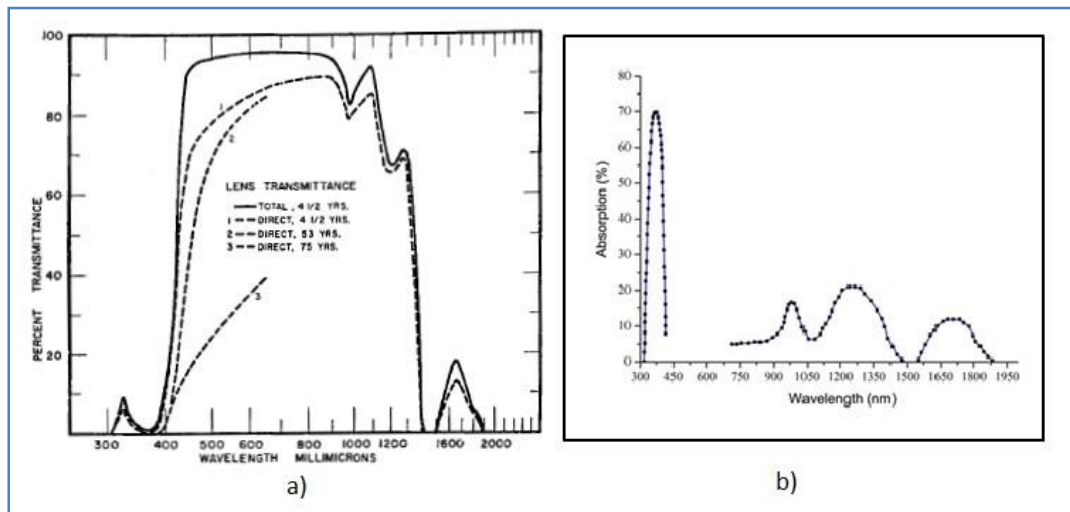


Figura 5: Espectro de transmitância [17] (a) e o Espectro de absorção (b) do cristalino humano [19].

Uma vez conhecidas as características de transmissão da córnea e cristalino é possível determinar a distribuição espectral da luz que atinge o segmento posterior e, consequentemente, a retina.

A luz visível e infravermelho, numa gama de 400nm a 1400nm, atinge a retina, como se pode verificar no espectro de transmissão total do meio ocular (figura 6). Nestas regiões espectrais, as características de absorção vão depender do grupo de cromóforos presentes. Este grupo inclui a melanina, localizada na retina pigmentada, a hemoglobina presente nos vasos sanguíneos, os pigmentos da região macular da retina (luteína e zeaxantina), a lipofuscina, a rodopsina e os foto-pigmentos dos cones [8].

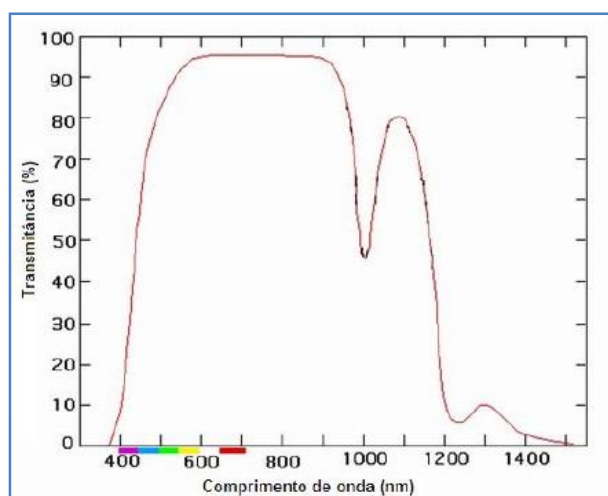


Figura 6: Transmitância ocular [17].

Em suma, só a radiação visível e IRA é que é capaz de atravessar todo o olho e chegar à retina, sendo as restantes bandas espectrais absorvidas na córnea ou no cristalino, como ilustra a figura 7.

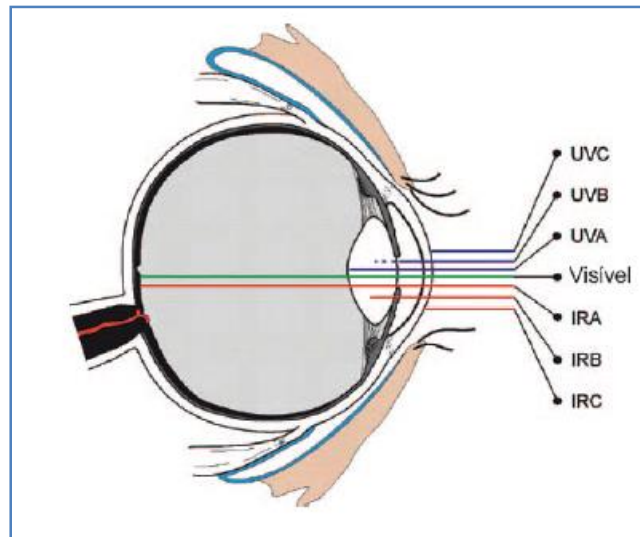


Figura 7: Penetração de diferentes comprimentos de onda no olho [2].

2.3. Propagação da radiação óptica na pele

A pele é o órgão que reveste e protege todo o corpo humano, sendo constituída por duas camadas: uma camada epitelial, a epiderme (camada mais exterior), e uma camada conjuntiva de suporte, a derme (camada mais interna) como ilustra a figura 8 [13].

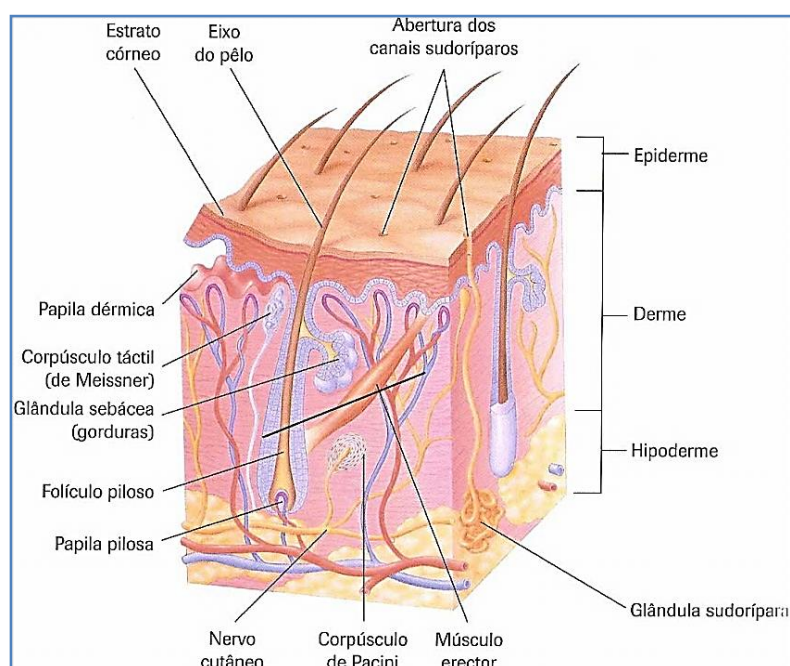


Figura 8: Morfologia da pele humana [13].

A epiderme não contém vasos sanguíneos nem terminações nervosas. É constituída por duas camadas: a camada córnea e a camada mucosa de Malpighi. A camada córnea é constituída por células superficiais com grande quantidade de uma proteína rica em enxofre, a queratina. A camada mucosa de Malpighi diz respeito às células mais profundas da epiderme e constituem a camada viva desta. Estas células têm grande capacidade de multiplicação e regeneração pelo que são capazes de reparar qualquer dano superficial. A melanina encontra-se na camada mucosa de Malpighi. Este pigmento da pele tem como principal função assegurar a protecção contra a radiação luminosa e solar. Por isso desempenha um papel muito importante na absorção e reflexão da radiação [13].

A derme é constituída por tecido conjuntivo que contém proteínas de suporte como o colagénio e a elastina. Nesta camada encontram-se vasos linfáticos e terminações nervosas.

Os raios UV percorrem poucos milímetros da pele, sendo absorvidos na sua totalidade na epiderme. A excepção são os UVA que são capazes de causar vasodilatação e introduzir lesões indirectas no ADN (formação de radicais livres). A radiação visível tem um poder grande de penetração, mas são os IR que conseguem atingir as camadas mais internas do organismo, resultando no aquecimento e vasodilatação dos vasos.

O grau de penetração da radiação óptica varia de acordo com as características da pele de cada individuo e da zona que é afectada. Esta variação deve-se aos principais cromóforos presentes em cada camada da pele. Como se pode observar na figura 9 a absorção da radiação IR deve-se, principalmente, à presença de água na constituição da pele. Por outro lado, a hemoglobina e a melanina são responsáveis para a absorção dos UV e visível.

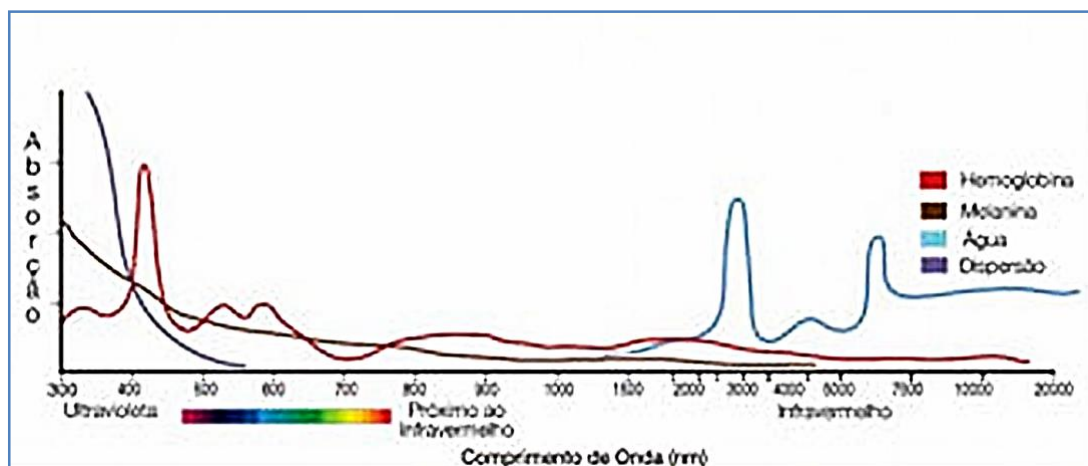


Figura 9: Espectro de absorção da pele para diferentes fluoróforos existentes na pele [20].

A luz visível e a IR são as que têm maior poder de penetração. A radiação UV é absorvida nas camadas mais superficiais da pele como ilustra a figura 10.

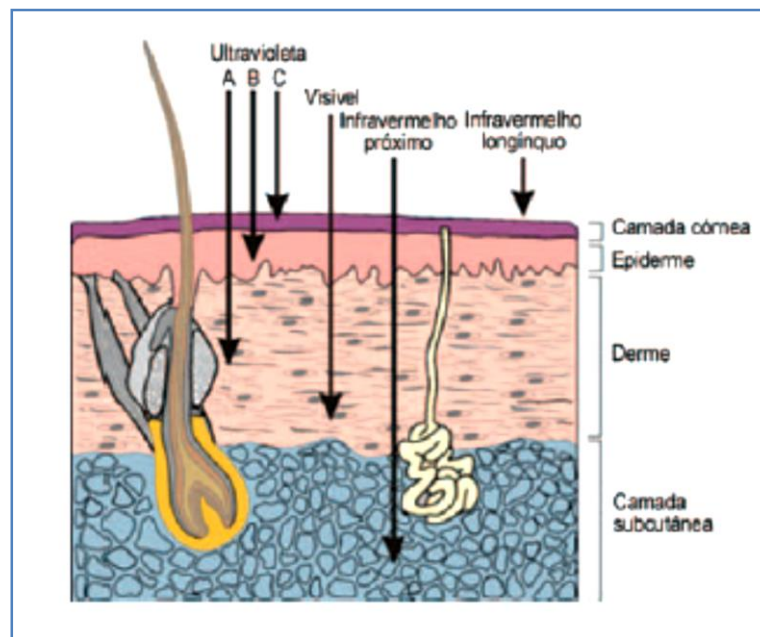


Figura 10: Penetração de diferentes comprimentos de onda na pele [2].

2.4. Mecanismos de interacção da radiação óptica nos tecidos biológicos

Sempre que a radiação electromagnética atravessa um meio material, é provável que deposite alguma energia nesse meio.

A radiação óptica é absorvida essencialmente pelas camadas exteriores do corpo e por esse motivo consideram-se os efeitos biológicos limitados à pele e olhos.

Os efeitos biológicos podem ser divididos em agudos, que ocorrem rapidamente após a exposição, e os crónicos, que ocorrem como resultados de exposições prolongadas e repetidas.

Dependendo do tempo de exposição, comprimento de onda e da zona irradiada, a absorção da radiação pode resultar em mecanismos de interacção distintos. Para radiação óptica incoerente consideram-se apenas dois mecanismos de interacção: os efeitos fotoquímicos, que predominam na região ultravioleta e os efeitos térmicos que predominam na região infravermelha [21]. Na região visível podem coexistir os dois mecanismos.

É essencial compreender os potenciais efeitos biológicos, bem como o conceito de dose biológica efectiva, de forma a compreender os efeitos que ocorrem. A irradiância biológica efectiva, E_{eff} (W/m^2) é calculada pela ponderação espectral do espectro de acção da resposta biológica. Esta ponderação da irradiância espectral, E_{λ} ($\text{W}/\text{m}^2/\text{nm}$), é feita através da função de resposta biológica relativa, $S(\lambda)$. A exposição radiante efectiva, H_{eff} (J/m^2), corresponde à irradiância biológica efectiva multiplicada pelo tempo de exposição.

Num tecido biológico, a produção de mecanismos fotoquímicos corresponde à produção de moléculas a partir de espécies químicas excitadas por absorção de fotões, sem aquecimento do material [8]. Os efeitos fotoquímicos ocorrem para a radiação ultravioleta e para radiação visível na banda de comprimentos de onda dos 300nm aos 700nm.

Existem muitos cromóforos fotoquimicamente activos na pele e nos olhos, mas o ADN é o cromóforo chave para os efeitos retardados [3]. O pico de absorção do ADN ocorre em torno de 260nm com uma queda acentuada na absorção através da faixa dos UVB [22]. O ADN absorve principalmente os menores comprimentos de onda de UV (B e A), absorção

que pode provocar a quebra das cadeias. Aminoácidos aromáticos, como o triptofano, absorvem desde os UVB aos UVA [8].

A absorção de UVA pode levar a ligações cruzadas no ADN. Em geral todas as lesões são corrigidas antes de a célula entrar em divisão, mas muitos mecanismos estão envolvidos e a inactivação dos genes pode resultar em mutações da própria estrutura.

Os mecanismos térmicos resultantes da irradiação óptica incluem a conversão da luz em calor, a transferência de calor dentro dos tecidos e a reacção destes tecidos. Na presença de uma fonte de calor, considera-se um efeito térmico todo o fenómeno em que a luz absorvida é convertida em calor. Esta conversão é um fenómeno muito rápido e ocorre por excitação dos modos de vibração da rede cristalina do tecido. A transferência de calor tem lugar essencialmente por condução térmica, uma vez que os processos de convecção e de radiação são desprezáveis [8]. A transferência de calor através do tecido vai aumentar o volume de tecido aquecido para além do volume de aquecimento primário (que, na ausência de processos significativos de dispersão, corresponde ao volume irradiado), definindo o volume de aquecimento secundário. Para efeitos de estudo da reacção do tecido ao aquecimento, é este último volume se deve considerar.

A radiação IR produz unicamente efeitos térmicos, pois não tem energia suficiente para modificar a configuração electrónica do átomo. Esta pode ser transmitida, absorvida e reflectida pelo organismo [23].

A luz visível consegue penetrar até à retina causando danos térmicos e fotoquímicos. Os danos térmicos são produzidos por luz intensa que levam ao aumento da temperatura da retina 10-20°C. A luz é absorvida no epitélio pigmentado da retina onde a energia é convertida em calor, que causa fotocoagulação dos tecidos. Os efeitos fotoquímicos surgem por exposições prolongadas e repetidas a luz intensa levando a danos na mácula [5].

2.5. Efeitos da radiação óptica nos tecidos oculares

Após a apresentação dos mecanismos de interacção da radiação óptica com os tecidos biológicos é importante ver quais os mecanismos para as diferentes regiões espectrais e os efeitos que eles provocam no tecido ocular.

A exposição do olho a RUV está associada a uma variedade de distúrbios, incluindo danos nas pálpebras, córnea, cristalino, conjuntiva e retina (tabela 2).

Enquanto a radiação UVC é absorvida a nível da córnea e conjuntiva, a radiação UVB e, principalmente, UVA é absorvida a nível do cristalino. Comprimentos de onda abaixo dos 290 nm são quase atenuados na totalidade pela córnea [22]. Assim, podemos considerar que a córnea, conjuntiva e cristalino são os mais prejudicados por exposição inadequada à radiação UV, que actua sempre por mecanismos fotoquímicos. Doenças como a fotoqueratite e a fotoqueratoconjuntivite são consideradas doenças relacionadas com a actividade de profissionais da soldadura.

A conhecida “queimadura por flash”, uma fotoqueratite, tem uma transição gradual dos sintomas desde a sensação de “areia no olho”, ao aumento do lacrimejamento, à dor e à fotofobia. A sensibilidade à luz vai sendo recuperada devido a reepitelização da córnea [24].

A gravidade da inflamação da córnea e conjuntivo por “queimadura por flash” depende de vários factores [10]:

- Duração da exposição
- Comprimento de onda
- Nível de energia.

Os comprimentos de onda entre 300nm a 400nm são transmitidos através da córnea e 80%, aproximadamente, são absorvidos pelo cristalino. Esta absorção pode levar a alterações estruturais das proteínas do cristalino e conseqüentemente ao desenvolvimento de cataratas, isto é, opacidade parcial ou total do cristalino. Nas células do epitélio do cristalino são produzidas proteínas que tomam um determinado arranjo espacial formando as fibras citoplasmáticas. A taxa de produção destas proteínas vai diminuindo com a idade. Em

conjunto com mudanças químicas e hídricas destas mesmas proteínas surgem vários tipos de cataratas. Uma das causas destas mudanças é a exposição a radiação UV [5].

Estudos também demonstram que certas patologias podem estar associadas à exposição crónica, tais como, pterígio e pinguécula. Pterígio é um crescimento de tecido semelhante ao da conjuntiva sobre a córnea que pode prejudicar a visão. Pinguécula é um tumor não maligno devido à degeneração do tecido da conjuntiva [25] [22].

A córnea e o cristalino protegem a retina de efeitos agudos de exposição à radiação UV já que, normalmente, atinge a retina apenas 1% dos raios UVA [3].

O principal dano da retina para fontes de luz brilhante são as fotoretinites. A fotoretinite, ou lesão da retina (perigo da luz azul), é o resultado de uma reacção fotoquímica após a exposição da retina para comprimentos de onda mais curtos do espectro visível, ou seja, violeta e azul. Estudos sugerem que esta lesão fotoquímica está relacionada com a absorção de comprimentos de onda entre os 380nm e os 520nm pelo epitélio pigmentado e pela coróide. Por outro lado a temperatura da retina tem um aumento na ordem de 2-3°C devido à absorção da melanina num intervalo grande de comprimento de onda, o que sugere uma certa sinergia entre estes dois processos. Também podem ocorrer queimaduras da retina, mais precisamente na mácula, devido à luz visível e IR, que se caracterizam por ofuscamento: a pessoa começa a ver manchas ou reflexos e tem dificuldade para adaptar a visão em ambientes escuros. Devido ao efeito cumulativo, a exposição repetida à radiação óptica pode levar à perda total da visão por degeneração da mácula.

Tabela 2: Resumo dos efeitos adversos no olho devido a exposição prolongada às diferentes gamas de comprimento de onda [2].

Comprimento de onda (nm)		Efeito
100 – 280	UVC	Fotoqueratite Fotoconjuntivite
280 – 315	UVB	Fotoqueratite Fotoconjuntivite Cataratas
315 – 400	UVA	Fotoqueratite Fotoconjuntivite Cataratas Lesões da retina
380 – 780	Visível	Lesões da retina (perigo da luz azul) Queimadura da retina
780 – 1400	IRA	Cataratas Queimadura da retina
1400 – 3000	IRB	Cataratas
3000 - 10 ⁶	IRC	Queimadura da córnea

2.6. Efeitos da radiação óptica na pele

A cor da pele varia com a raça, regiões corporais e latitude, dependendo principalmente da quantidade de pigmentos existentes, nomeadamente, a melanina. Esta é essencial na fotoprotecção contra a RUV, sendo, por isso, a pele, mais sensível à região UV do espectro electromagnético [5].

A sensibilidade à radiação depende do fototipo de pele. De acordo com a classificação de Fitzpatrick, os fotótipos cutâneos são os apresentados na tabela 3 [26]. Nas peles mais pigmentadas a penetração da radiação é menor pelo que o risco diminui.

Tabela 3: Classificação dos fotótipos de pele segundo Fitzpatrick [27].

Fotótipos	Descrição	Sensibilidade
I – branca	Queima com facilidade, nunca bronzeia	Muito sensível
II – branca	Queima com facilidade, bronzeia muito pouco	Sensível
III – morena clara	Queima moderadamente, bronzeia moderadamente	Normal
IV – morena moderada	Queima pouco, bronzeia com facilidade	Normal
V – morena escura	Queima raramente, bronzeia bastante	Pouco sensível
VI – negra	Nunca queima, totalmente pigmentada	Insensível

Quando a pele é atingida pela radiação UV esta fica estimulada a produzir melanina que posteriormente é libertada como tentativa de prevenir os danos causados no ADN. Uma vez que a melanina é um pigmento escuro, a pele adquire uma tonalidade castanha (bronzamento). Substâncias sinalizadoras (citocinas) também são libertadas ou activadas ou sintetizadas por queratinócitos quando a pele é exposta aos raios ultravioleta. Estas

citocinas exercem vários efeitos, nomeadamente no âmbito da resposta inflamatória e também podem contribuir para a adaptação da pele à exposição à radiação [22].

De acordo com a penetração na pele da radiação UV e da dose, podem surgir eritemas (vermelhidão), dor, inchaço, descamação, fotoalergias e queimaduras (tabela 4) [28]. As radiações UVC e UVB penetram unicamente na epiderme enquanto a UVA penetra na derme podendo causar danos nas terminações nervosas.

Devido ao efeito cumulativo podem surgir reacções mais tardias, nomeadamente, envelhecimento precoce, perda da elasticidade (alteração no desenvolvimento normal da derme), principalmente devido à radiação UVA, e alterações celulares que devido a danos no ADN aumentam a predisposição ao aparecimento de cancro de pele e doenças infecciosas [29] [22].

A radiação IR produz unicamente efeitos térmicos sendo perceptível como uma sensação de aquecimento da pele, dependendo do seu comprimento de onda, energia e tempo de exposição. Pode causar efeitos negativos no organismo como, por exemplo, lesões estruturais e funcionais em capilares e nas terminações nervosas, queimaduras de pele e aumento da persistência da pigmentação cutânea [10] [30]. Devido a todas estas características, a radiação IR pode potenciar os efeitos da radiação UV levando mesmo ao desenvolvimento de cancro [5].

A maioria dos cancros de pele resulta de lesões provocadas pelo excesso de exposição à radiação UV. A radiação UV danifica o ADN nas células da epiderme, produzindo mutações. Se estas mutações afectarem os genes que regulam a divisão celular e originarem uma divisão descontrolada, pode produzir-se uma neoplasia que se transformará em cancro.

A probabilidade de desenvolver cancro de pele também está ligada à quantidade de melanina protectora existente. As pessoas pertencentes a um fotótipo de pele com menor concentração de melanina estão geneticamente mais predispostas a desenvolver cancro do que o grupo de pessoas pertencentes ao grupo V e VI da tabela 3.

Existem três formas de cancro de pele: carcinoma espinocelular, carcinoma das células basais e melanoma maligno.

O carcinoma espinocelular (figura 11 – b) desenvolve-se a partir das células da camada espinhosa e pode assemelhar-se a uma verruga ou a uma mancha vermelha descamativa e persistente. A sua causa tem origem numa exposição prolongada à radiação

UV. Este cancro ocorre essencialmente na face, pescoço e braços e a sua incidência está claramente ligada também com a latitude geográfica devido à contribuição da radiação solar.

O carcinoma das células basais (figura 11 – a) é o cancro de pele mais comum, inicia-se nas células da camada basal e o seu aspecto é variável. Embora o carcinoma espinocelular esteja fortemente relacionado com o efeito acumulativo da radiação, esta relação não é tão convincente para a carcinoma das células basais. Mas pode estar relacionado com uma exposição intermitente à radiação, onde o risco aumenta no adulto quando este enquanto criança e adolescente esteve exposto à radiação solar [14].

O melanoma maligno (figura 11 – c) é a forma menos comum, mas mais mortal. Como tem origem nos melanócitos, a maioria dos melanomas são pretos ou de vários tons de castanho, mas ocasionalmente a produção de melanina pode cessar e estes apresentam-se da cor da pele, rosados, vermelhos ou púrpura [14]. Os estudos feitos apontam que este tipo de cancro está associado com maior risco para pessoas que realizem actividades recreativas onde estejam expostas à radiação solar. Por outro lado, pessoas que tenham sofrido queimaduras solares estão mais propensas a desenvolver este tipo de cancro. Estudos mais recentes indicam que a radiação UVB é o principal risco para o desenvolvimento de melanoma maligno. Por isso, pessoas que reúnam estes factores de risco aliados à elevada exposição resultante da sua actividade profissional, como é o caso dos soldadores, não devem descurar a sua protecção.

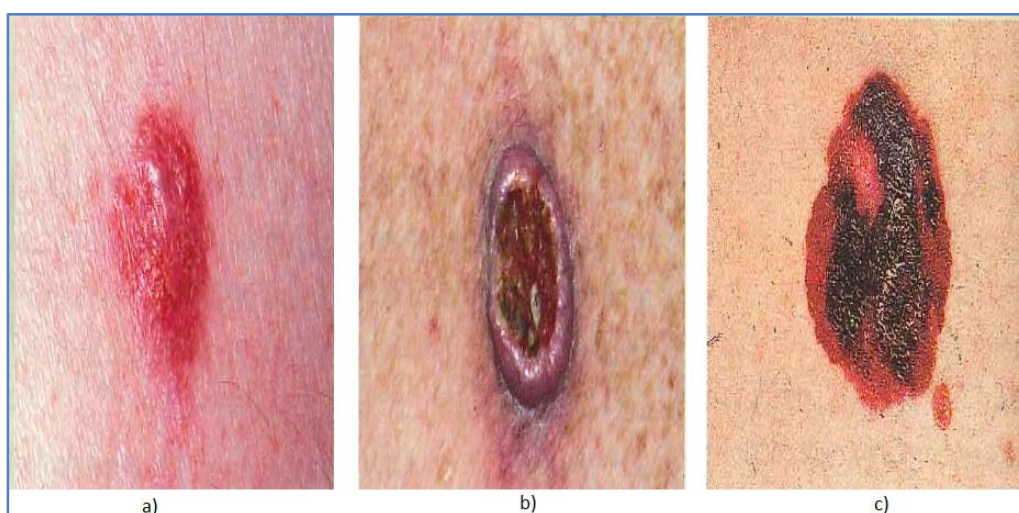


Figura 11: Diferentes tipos de cancro de pele: carcinoma das células basais (a), carcinoma espinocelular (b) e melanoma maligno (c).

Tabela 4: Resumo dos efeitos adversos na pele devido a exposição prolongada às diferentes gamas de comprimento de onda [2].

Comprimento de onda (nm)		Efeito
100 – 280	UVC	Eritema Cancro de pele
280 – 315	UVB	Eritema Fotoenvelhecimento Cancro de pele
315 – 400	UVA	Eritema Fotoenvelhecimento Escurecimento imediato da pigmentação Cancro de pele
380 – 780	Visível	Queimadura
780 – 1400	IRA	Queimadura
1400 – 3000	IRB	Queimadura
3000 - 10⁶	IRC	Queimadura

3. ARCO ELÉCTRICO

3.1. Caracterização da radiação óptica do arco eléctrico

O uso do processo de soldadura está hoje generalizado. É utilizado em muitos produtos e praticamente em todo o tipo de indústria. A actividade de soldadura acarreta diversos riscos, pelo que os profissionais desta actividade devem estar bem cientes dos seus principais riscos de forma a conseguir avalia-los correctamente.

A soldadura é uma operação que permite ligar dois ou mais elementos metálicos ou plásticos. O arco eléctrico pode ser visto como um condutor gasoso através do qual há conversão de energia eléctrica em calorífica. Um dos processos mais usados para gerar calor consiste em fazer passar uma corrente eléctrica entre duas superfícies, as quais oferecem uma resistência à passagem da corrente. O arco eléctrico é constituído por uma coluna de gás ionizado com electrões e partículas metálicas em suspensão que foram arrancados por aquecimento às superfícies de contacto [31].

O arco eléctrico é estabelecido através de uma descarga eléctrica entre dois eléctrodos, a qual é mantida devido ao desenvolvimento de um condutor gasoso gerando uma alta temperatura. Como consequência disto forma-se um plasma constituído pelo gás altamente ionizado e electricamente neutro. O eléctrodo negativo, o cátodo, emite electrões que passam através do gás e são recolhidos pelo eléctrodo positivo, o ânodo.

As propriedades físicas e químicas dos gases de protecção, como o potencial de ionização, a condutividade térmica, entre outras, definem as principais características operacionais do arco eléctrico. Para que o arco se mantenha durante o processo de soldadura é necessário que as partículas carregadas estejam entre os dois eléctrodos. O potencial de ionização (PI), varia com os gases de protecção, corresponde à energia mínima necessária para arrancar electrões com menor energia da camada de valência. A condutividade térmica (CT) do gás de protecção ionizado está relacionada com a quantidade de calor transferido, pelo choque das partículas existentes, na coluna de plasma. [32].

A tabela 5 apresenta os PI e CT para alguns gases de protecção utilizados em soldadura por arco eléctrico. De acordo com o tipo de material e processo a utilizar escolhe-se a melhor opção da combinação destes dois parâmetros.

Tabela 5: Potencial de ionização e condutividade térmica de gases de protecção de arco eléctrico [32].

Gás	Símbolo químico	PI (eV)	CT (mW/m.K)
Árgon	Ar	15,8	16,4
Dióxido de carbono	CO ₂	14,4	14,7
Hélio	He	24,6	142,6
Hidrogénio	H ₂	13,5	168,3
Azoto	N ₂	14,5	24,0
Oxigénio	O ₂	13,2	24,2

Os gases escolhidos para este tipo de aplicação são, tipicamente, o árgon, o hélio, o azoto, pois formam iões positivos por perda de um electrão. São também inertes: quando ionizados não reagem quimicamente com outras moléculas.

Parte da energia produzida pelo arco é perdida por radiação. A quantidade e tipo de radiação emitida dependem da massa atómica e da estrutura química do gás, da temperatura e da pressão. A radiação predominante resulta da excitação atómica e da ionização. Ocorrem estados de ionização mais elevados à medida que a energia do arco aumenta, resultando níveis energéticos superiores.

A perda de energia em radiação pode ultrapassar os 20% se for utilizado árgon, mas para os restantes gases não ultrapassa os 10%.

Todos os arcos emitem radiação ultravioleta, infravermelha e visível. Os filtros utilizados são normalizados e deverão absorver raios infravermelhos e ultravioleta bem como a maioria da luz visível emitida pelo arco [33].

3.2. Práticas correntes de protecção contra radiação do Arco Eléctrico

O equipamento que produz radiação UV pode representar um perigo para a pele e olhos, pelo que deverão ser utilizado equipamentos de protecção adequados.

Em caso de exposição no trabalho à radiação óptica, as zonas da pele onde normalmente ocorre maior risco são as mãos, o rosto, a cabeça e o pescoço, uma vez que as restantes zonas estão geralmente cobertas pelo vestuário de trabalho. O vestuário de trabalho deve ser escolhido considerando a actividade a realizar e deve ser sujeito a verificações periódicas [5]. As mãos podem ser protegidas por luvas com baixa transmissão de radiação óptica perigosa. O rosto pode ser protegido por uma máscara de protecção ou escudo facial, que também pode proporcionar protecção dos olhos. Um capacete adequado irá proteger a cabeça e o pescoço.

De forma a proteger os olhos da radiação devem ser usados óculos de segurança, óculos protectores, máscaras de protecção, escudos faciais. O equipamento de protecção dos olhos deve permitir que o trabalhador veja tudo o que existe na área de trabalho, mas limitar a radiação óptica a níveis aceitáveis, isto é, suficiente para diminuir o nível de exposição abaixo dos LE aplicáveis. A escolha de equipamento de protecção dos olhos apropriado depende de muitos factores, incluindo: comprimento de onda, potência/energia, densidade óptica, necessidade de óculos de prescrição médica, conforto. A transmissão luminosa e a cor do ambiente, conforme visto através dos filtros de protecção, são características importantes do equipamento de protecção para os olhos que podem afectar a capacidade do operador de executar as operações necessárias sem comprometer a segurança da radiação não óptica.

Várias medidas de protecção devem ser tidas em conta, tais como:

- Redução do tempo de exposição;
- Protecção da pele através de vestuário adequado, luvas ou cremes protectores (figura 12);
- Protecção dos olhos através de óculos ou viseiras equipados com filtro adequado em função do tipo de radiação e frequências emitidas (figura 12). Mesmo em curtas operações de soldadura o trabalhador não deverá retirar a protecção.

Não esquecer que as lâmpadas fluorescentes de iluminação emitem geralmente radiação ultravioleta que podem em alguns casos contribuir para a dose anual recebida pelo trabalhador [10].



Figura 12: Equipamento de protecção individual básico usado durante a operação de soldagem a arco eléctrico [34].

4. LIMITES DE EXPOSIÇÃO: AS RECOMENDAÇÕES DO ICNIRP

O ICNIRP é uma comissão internacional que se ocupa com questões relativas aos efeitos adversos que podem ocorrer na saúde humana devido à exposição a radiação não-ionizante. Esta comissão tem como principal objectivo divulgar e aconselhar sobre os riscos da radiação não-ionizante na saúde humana.

Os limites de exposição surgem da combinação entre os resultados da investigação e a avaliação de risco através da colaboração da World Health Organization (WHO) [35]. As directrizes propostas pelo ICNIRP são exclusivamente baseadas em dados científicos, não levando em conta quaisquer considerações económicas ou outras questões não científicas.

Os limites de exposição ou MPE's (exposições máximas permissíveis) são representativos das condições sobre as quais um indivíduo pode estar exposto repetidamente sem ocorrer o risco de efeito agudo ou crónico adverso, tendo conta a eficiência biológica da radiação óptica para provocar danos, em função do comprimento de onda, da duração de exposição e do tecido afectado. As MPE's são expressas em termos de exposição radiante (J/m²) ou irradiância (W/m²) [3].

A exposição à radiação UV deve ser quantificada em termos de irradiância efectiva E_{eff} (W/m²) para uma exposição prolongada

$$E_{eff} = \sum E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

em que E_{λ} é a irradiância espectral da fonte [Wm⁻²nm⁻¹], $S(\lambda)$ é a função de ponderação espectral (eficiência espectral relativa) [adimensional] e $\Delta\lambda$ é a largura de banda [nm].

A função de ponderação $S(\lambda)$ aplica-se de 180 a 400 nm e é utilizada para obter os dados da irradiância espectral tendo em conta a dependência do comprimento de onda com efeitos prejudiciais à saúde, nos olhos e na pele (ver figura 13). Corresponde ao espectro de

acção da radiação UV. Os valores de $S(\lambda)$ podem ser interpolados através de equações matemáticas simples.

Para a região $210 \leq \lambda \leq 270$ nm:

$$S(\lambda) = 0.959^{(270-\lambda)}$$

Para a região $270 \leq \lambda \leq 300$ nm:

$$S(\lambda) = 1 - 0.36 \times \left(\frac{\lambda - 270}{20} \right)^{1.64}$$

Para a região $300 \leq \lambda \leq 400$ nm:

$$S(\lambda) = 0.3 - 0.736^{(\lambda-300)} + 10^{(2-0.0163\lambda)}$$

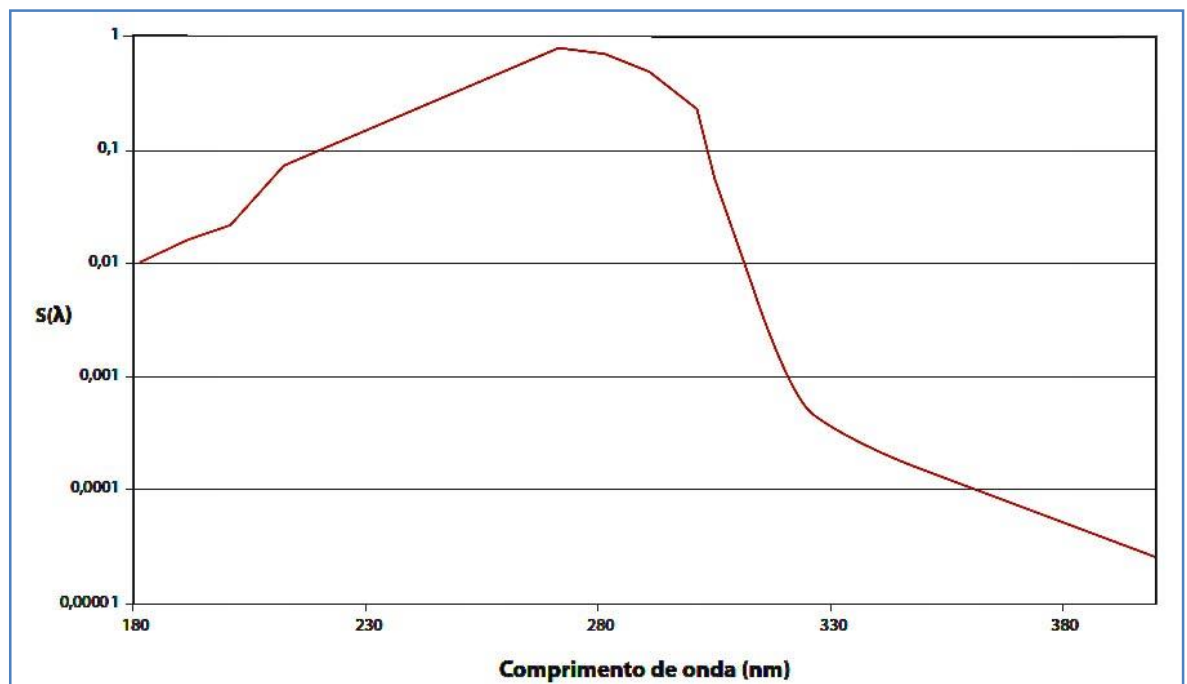


Figura 13: Função de ponderação $S(\lambda)$ retirado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].

Segundo o ICNIRP, para um período de 8h a exposição radiante biológica efectiva não pode exceder os 30 Jm^{-2} entre os comprimentos de onda 180nm a 400nm. Por outro lado

o olho não pode estar exposto a mais de 10^4 Jm^{-2} para comprimentos de onda entre 315nm e 400nm, considerando aqui a irradiância total, não ponderada, dada por:

$$E = \sum_{\lambda=315nm}^{\lambda=400nm} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

onde E_{λ} é a irradiância espectral e $\Delta\lambda$ a largura de banda.

Para os cálculos dos efeitos térmicos e fotoquímicos provocados pela radiação, na gama dos UVA, visível e infravermelho, recorre-se a outras duas funções de ponderação com o objectivo de corrigir os dados da irradiância espectral tendo em conta a dependência do comprimento de onda com os efeitos nefastos nos olhos.

A função de ponderação $B(\lambda)$ aplica-se entre 300 nm e 700 nm para ter em conta a dependência do comprimento de onda do risco de lesões fotoquímicas para os olhos. A dependência do comprimento de onda é representada na figura 14. Trata-se do espectro de acção padronizado para fotoretinite, um processo de dano fotoquímico. Este espectro leva em conta a absorção ocular nas regiões anteriores à retina.

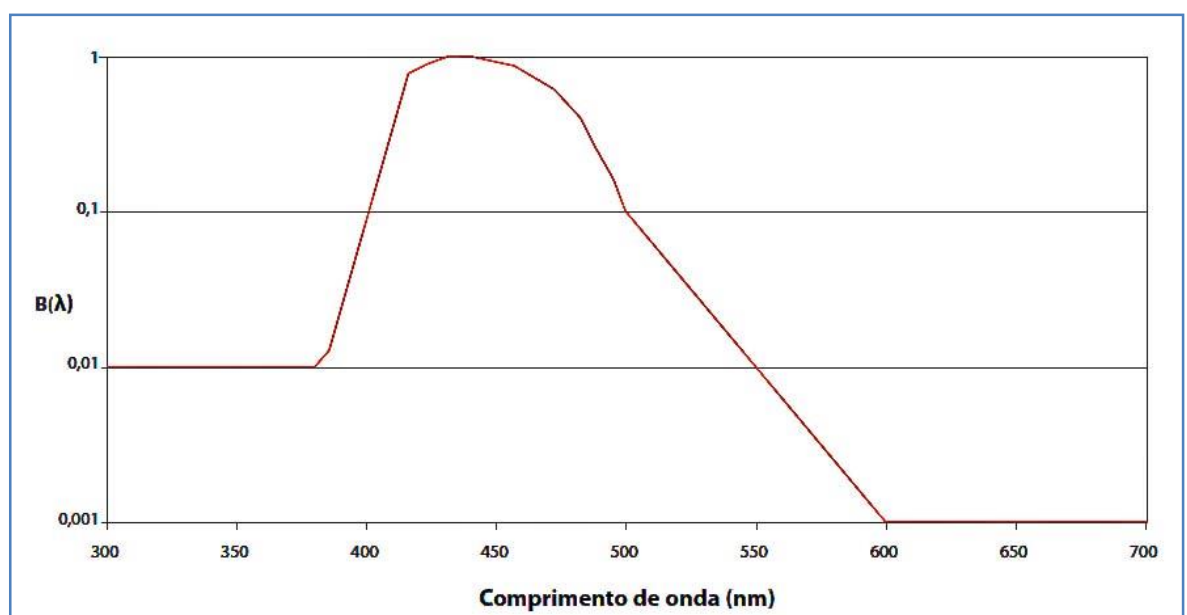


Figura 14: função de ponderação $B(\lambda)$ retirado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].

Para a protecção contra fotoretinites a exposição efectiva não pode exceder os 100 Jm⁻² para t < 10000s. A irradiância E_B é dada pela expressão:

$$E_B = \sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=700nm} E_{\lambda} \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$$

onde E_λ é a irradiância espectral, B(λ) a função de ponderação de efeito fotoquímico (*retinal blue-light function*) e Δλ a largura de banda.

A função de ponderação R(λ) aplica-se entre 380 nm e 1400 nm para ter em conta a dependência do comprimento de onda do risco de lesões térmicas para os olhos. A dependência do comprimento de onda é representada na figura 15.

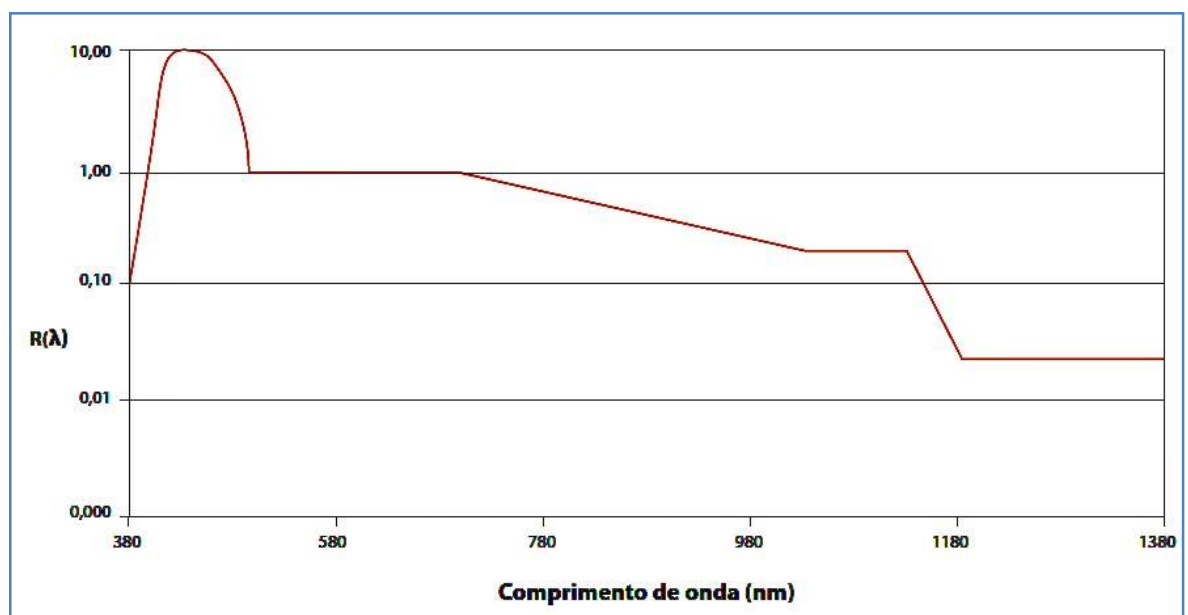


Figura 15: função de ponderação R(λ) retirado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].

A protecção da retina humana contra danos térmicos necessita de uma função de ponderação R(λ) e o tempo de exposição segue a condição de 10μs ≤ t ≤ 10s. Os movimentos naturais da cabeça e dos olhos introduzem uma variação natural da área exposta da retina fazendo com que não seja necessário considerar tempos de exposição superiores a 10s quando se avalia o dano por mecanismos térmicos

A radiância efectiva L_R é dada pela expressão:

$$L_R = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=1400nm} L_{\lambda} \times R(\lambda) \times \Delta\lambda$$

onde L_{λ} é a radiância espectral, $R(\lambda)$ a função de ponderação de efeito térmico e $\Delta\lambda$ a largura de banda.

A irradiância total da exposição aos IR é dada pela expressão:

$$E_{IV} = \sum_{\lambda=780nm}^{\lambda=3000nm} E_{\lambda} \times \Delta\lambda$$

onde E_{λ} é a irradiância espectral e $\Delta\lambda$ a largura de banda.

Para o cálculo da exposição total da pele utiliza-se a expressão seguinte:

$$H_{pele} = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=3000nm} H_{\lambda} \times \Delta\lambda$$

onde H_{λ} é a exposição espectral (Jm^{-2}) e $\Delta\lambda$ a largura de banda.

O Anexo A e B fornecem as expressões para cálculo da radiação óptica para olhos e pele, e os LE, respectivamente, para a diferente gama de comprimentos de onda. Em algumas regiões do espectro será avaliado mais de um limite de exposição. O limite mais restritivo é o aplicado.

5. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL NA UNIÃO EUROPEIA

Numa sociedade democrática, as leis existem para delimitar os direitos e os deveres dos cidadãos. Um indivíduo pode recorrer à Justiça com o objectivo de obter reparação por perdas e danos em consequência de actos ou omissões de terceiros sempre que sentir que os seus direitos foram desrespeitados [36].

Todas as decisões tomadas pela Justiça são com base nas leis em vigor. Aos advogados cabe a tarefa de compreender na totalidade as leis, mas é bom que o trabalhador e entidade empregadora também possuam noções sobre as leis que foram preparadas para proteger os seus direitos sempre numa perspectiva de prevenção. Por isso, é importante saber o que a legislação entende por acidente de trabalho e nos diz sobre prevenção.

Acidente de trabalho é aquele que se verifique no local e no tempo de trabalho e produza directa ou indirectamente lesão corporal, perturbação funcional ou doença de que resulte redução na capacidade de trabalho ou de ganho ou a morte, segundo a Lei n.º 98/2009 de 4 de Setembro. Entenda-se por local de trabalho, todo o lugar em que o trabalhador se encontra, ou donde ou para onde deve dirigir-se em virtude do seu trabalho, e em que esteja, directa ou indirectamente, sujeito ao controlo do empregador.

A Directiva 89/391/CEE, de 12 de Junho, teve por objecto a execução de medidas destinadas a promover no espaço europeu a melhoria da segurança e saúde dos trabalhadores. Esta directiva foi transposta para o direito interno português através do Decreto-Lei n.º 441/91, de 14 de Novembro, alterado posteriormente pelo Decreto-Lei n.º 133/99, de 21 de Abril. Mais tarde, os Princípios Gerais da Prevenção foram assumidos pela Lei n.º 102/2009, de 10 de Setembro, que revoga os diplomas atrás referidos [37].

A Lei n.º 102/2009 de 10 de Setembro diz-nos que a prevenção assenta num conjunto de políticas e programas públicos, bem como disposições ou medidas tomadas ou previstas no licenciamento e em todas as fases de actividade da empresa, do estabelecimento ou do serviço, que visem eliminar ou diminuir os riscos profissionais a que estão potencialmente expostos os trabalhadores.

É de salientar que nestas questões a noção de risco e perigo é distinta conforme designada na Lei n.º 102/2009 de 10 de Setembro. Entenda-se por perigo a capacidade ou

propriedade intrínseca de um componente material do trabalho com potencial para causar dano. O risco é a probabilidade de um acontecimento indesejado e imprevisível ocorrer. A quantificação está dependente do efeito conjugado entre a probabilidade e a correspondente gravidade.

A avaliação dos riscos é um requisito geral da Directiva 89/391/CEE. Uma avaliação completa dos riscos terá de considerar todos os perigos associados à actividade profissional. Contudo, para efeitos da Directiva, apenas o perigo da radiação óptica será aqui abordado.

O desenvolvimento de sinalética simples e inequívoca é um meio de prevenção dos riscos profissionais. Alguns exemplos, referentes às actividades expostas a radiação óptica, são exibidos na figura 16.



Figura 16: Sinalização típica utilizada no ambiente de trabalho para avisar da existência de perigos e recomendar a utilização de equipamento de protecção individual. Toda a sinalização de segurança deve cumprir os requisitos da Directiva de Sinalização de Segurança (92/58/CEE) adaptado do Guia de boas práticas não vinculativo da Directiva 2006/25/CE [2].

A hierarquia de medidas de controlo baseia-se em princípios básicos de prevenção. São nove os princípios gerais da prevenção de acordo com a Directiva 89/391/CEE:

1. Evitar os riscos/ eliminação de perigo: O perigo deve ser objecto de análise sistemática tendo em vista a sua detecção e eliminação. Esta primeira atitude preventiva deve ter lugar não só na fase de laboração, mas, também, na fase de concepção e projecto. É fundamental a integração da prevenção nos momentos decisivos do projecto e do planeamento.

2. Identificar e avaliar os riscos: O risco resulta de um perigo não eliminado que vai persistir na situação de trabalho. Avaliar os riscos significa desenvolver todo um processo que visa obter dos riscos o conhecimento necessário à definição de uma estratégia preventiva (origem do risco, natureza do risco, consequências do risco, trabalhadores expostos ao risco...).

3. Combater os riscos na origem: Tendo em vista a máxima eficácia possível na prevenção, o risco deve ser, preferencialmente, combatido no plano dos factores de trabalho que lhe dão origem. Este princípio deve ser tido em conta particularmente nas abordagens preventivas que tenham lugar sobre os modos operatórios, bem como sobre os equipamentos, materiais e produtos utilizados.

4. Adaptar o trabalho às pessoas: Todos os factores do trabalho devem ser, tanto quanto possível, concebidos e organizados em função das características das pessoas que o executam (concepção e organização produtiva das frentes de obra e da execução dos trabalhos, das ferramentas e equipamentos, dos métodos e processos de trabalho, dos ritmos de trabalho e tempos de trabalho, etc.).

5. Ter em conta o estado da evolução da técnica, bem como de novas formas de organização e do trabalho: Atender à permanente evolução tecnológica, tendo em vista detectar novos riscos, mas, também, novas soluções preventivas integradas nos componentes de trabalho (máquinas mais seguras, produtos não tóxicos, etc.) e novos métodos mais eficazes de avaliar e controlar riscos.

6. Substituir o que é perigoso pelo que é isento de perigo ou menos perigoso: A evolução tecnológica resolve algumas situações de perigo (eliminando-o ou reduzindo-o), devendo isso mesmo ser potenciado na melhoria dos factores de trabalho. Deve, assim, ser conhecida toda a fonte de perigo existente na empresa e permanentemente processar-se a procura de melhores soluções, na medida do possível.

7. Planificar a prevenção com um sistema coerente: As medidas de prevenção só produzem efeito duradouro e eficaz quando se articulam coerentemente entre si (medidas técnicas sobre os componentes materiais do trabalho articuladas com medidas de organização do trabalho e com medidas sobre as competências dos trabalhadores) e com a lógica da produção e com a política de gestão da empresa.

8. Dar prioridade às medidas de protecção colectiva em relação às medidas de protecção individual: As medidas de protecção só deverão ser usadas quando as medidas de

prevenção estiverem esgotadas e não sejam suficientes para controlar o risco. Quanto à protecção individual, refira-se que é o último reduto da protecção do trabalhador e, daí, a sua colocação em último lugar no elenco dos princípios gerais de prevenção. Face à protecção colectiva, a protecção individual deverá entrar quando/e se a protecção colectiva for tecnicamente impossível ou insuficiente. A protecção individual assume, assim, um carácter complementar e, quando utilizada, deve adequar-se: Ao risco; Ao trabalhador; À situação de trabalho.

9. Dar instruções compreensíveis e adequadas às actividades desenvolvidas pelos trabalhadores: A formação e a informação constituem a abordagem preventiva central, na medida em que dela depende o desenvolvimento de competências necessárias à participação generalizada de todos os trabalhadores na prevenção.

A Lei n.º 25/2010 de 30 de Agosto “estabelece as prescrições mínimas para a protecção dos trabalhadores contra riscos para a saúde e segurança devidos à exposição, durante o trabalho, a radiações ópticas de fontes artificiais, transpondo a Directiva n.º 2006/25/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril.”

A Directiva 2006/25/CE determina os requisitos mínimos relativos à protecção de qualquer trabalhador contra riscos para a saúde e segurança resultantes da exposição à radiação óptica no decorrer do seu trabalho. Apresenta, também, os limites de exposição que abrangem a região do espectro de 180 a 3000 nm, relativo à radiação óptica não coerente. Realça o facto de as entidades patronais serem as principais responsáveis por assegurar a não exposição dos seus trabalhadores a níveis que excedam os valores limites indicados, pela mesma, de radiação óptica artificial. Este requisito encontra-se no artigo 4.º: «... a entidade patronal, caso existam trabalhadores expostos a fontes artificiais de radiação óptica, deve avaliar e, se necessário, medir e/ou calcular os níveis de exposição à radiação óptica aos quais os trabalhadores têm probabilidade de ser expostos...»

No que diz respeito às radiações incoerentes a metodologia de avaliação, de medição e/ou de cálculo devem obedecer às recomendações da CIE e do Comité Europeu de Normalização (CEN). A avaliação, a medição e/ou cálculo devem ser efectuados com recurso a directrizes disponíveis, nacionais ou internacionais, cientificamente fundamentadas sempre que as situações de exposição não sejam abrangidas por estas normas e recomendações. Nas situações de exposição que não estejam abrangidas por estas normas

e recomendações, e até que estejam disponíveis normas ou recomendações adequadas da União Europeia, a avaliação, a medição e/ou o cálculo devem ser efectuados com recurso a directrizes disponíveis, nacionais ou internacionais, cientificamente fundamentadas.

Existem várias normas europeias que caracterizam as emissões e abrangem as medidas de protecção relativas à emissão de radiação óptica, sendo elas as seguintes:

- EN 165: 2005 — Protecção individual dos olhos – Vocabulário
- EN 166: 2002 — Protecção individual dos olhos – Especificações
- EN 167: 2002 — Protecção individual dos olhos – Métodos de ensaio ópticos
- EN 168: 2002 — Protecção individual dos olhos – Métodos de ensaio não ópticos
- EN 169: 2002 — Protecção individual dos olhos – Filtros para soldagem e técnicas relacionadas — Requisitos de transmissão e utilização recomendada
- EN 170: 2002 — Protecção individual dos olhos – Filtros ultravioletas – Requisitos de transmissão e utilização recomendada
- EN 171: 2002 — Protecção individual dos olhos – Filtros de infravermelhos – Requisitos de transmissão e utilização recomendada
- EN 175: 1997 — Protecção individual – Equipamento para protecção dos olhos e do rosto durante a soldagem e processos relacionados
- EN 379: 2003 — Protecção individual dos olhos – Filtros de soldagem automáticos
- EN 1598: 1997 — Saúde e Segurança na soldagem e processos relacionados – Cortinas de soldagem transparentes, tiras e telas para processos de soldagem a arco

O Instituto Português da Qualidade (IPQ) tem uma rede de consulta de normas que dá a possibilidade de consultar os seus conteúdos. O acesso às normas só está disponível desta forma ou através da sua compra.

6. ANÁLISE DE ESPECTROS DE RADIAÇÃO DE ARCO ELÉCTRICO

6.1. Análise de casos já publicados

Analisámos três espectros de emissão, digitalizados a partir de *Transparent welding curtains*, publicação científica da autoria de *Sliney et al.*, com diferentes combinações de corrente do arco, gás de protecção, eléctrodo e metal de soldadura (figuras 17 – 19). Todos os espectros foram registados a uma distância de 1 m da fonte de luz. Considerou-se que o raio do arco era de 3×10^{-3} m. Esta análise foi feita com base nas recomendações do ICNIRP para exposição a radiação incoerente. Como resultado desta análise obtivemos o valor máximo permitido para a exposição bem como a densidade óptica mínima para óculos de protecção para as condições consideradas.

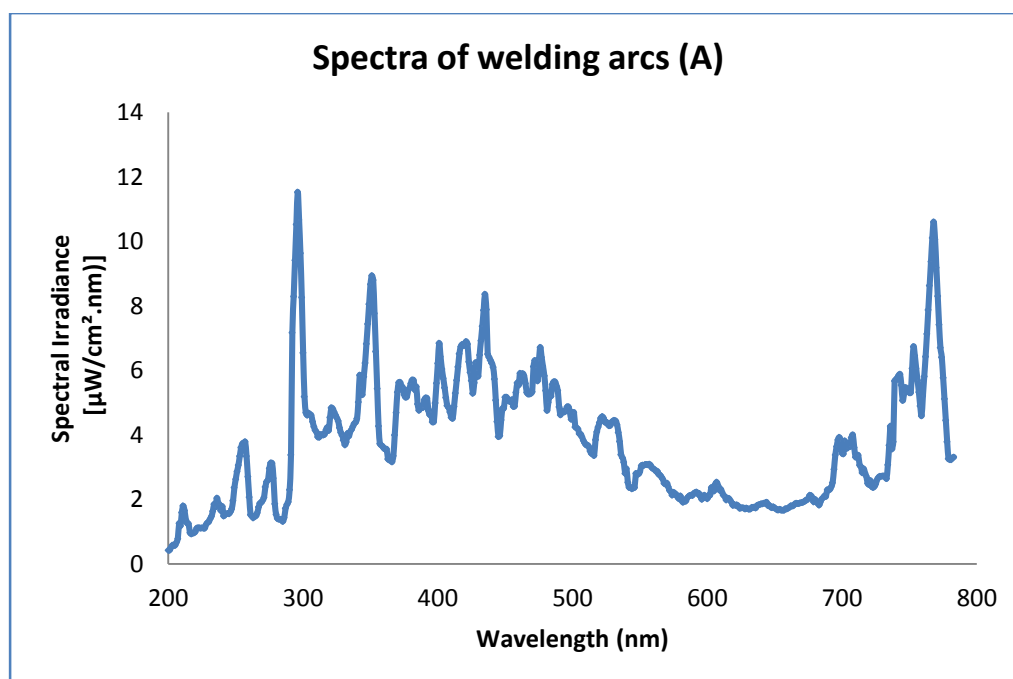


Figura 17: Condições de teste - Processo: GTAW; Corrente do arco: 300A; Eléctrodo: EWth-2; Gás de protecção: Ar AT 20cfm [38].

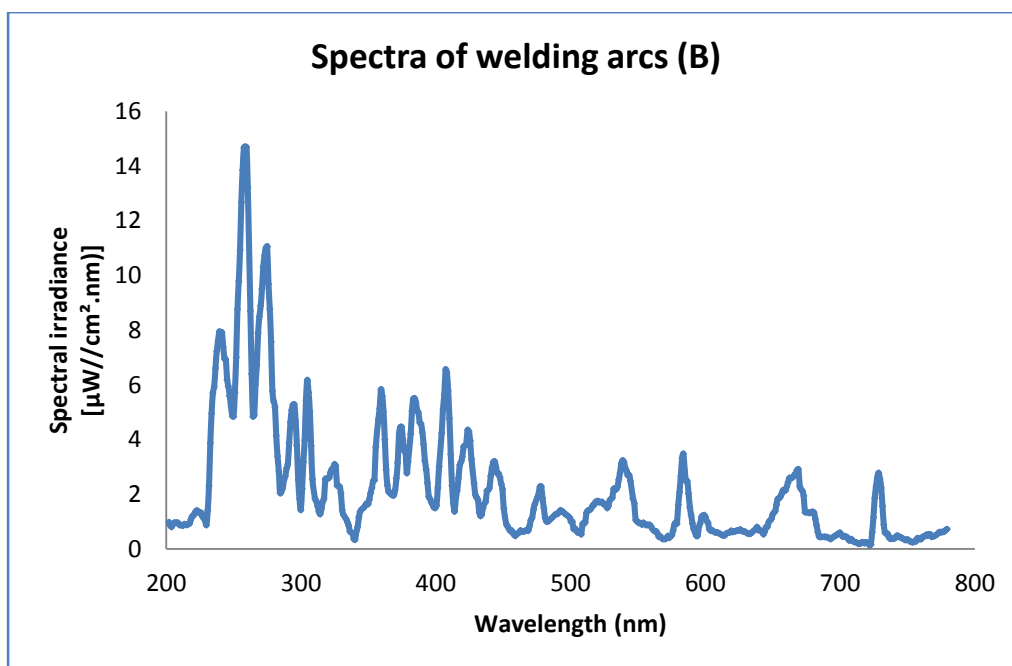


Figura 18: Condições de teste - Processo: GTAW; Corrente do arco: 275 A; Eléctrodo: EWth-2; Gás de protecção: He AT 50cfm [38].

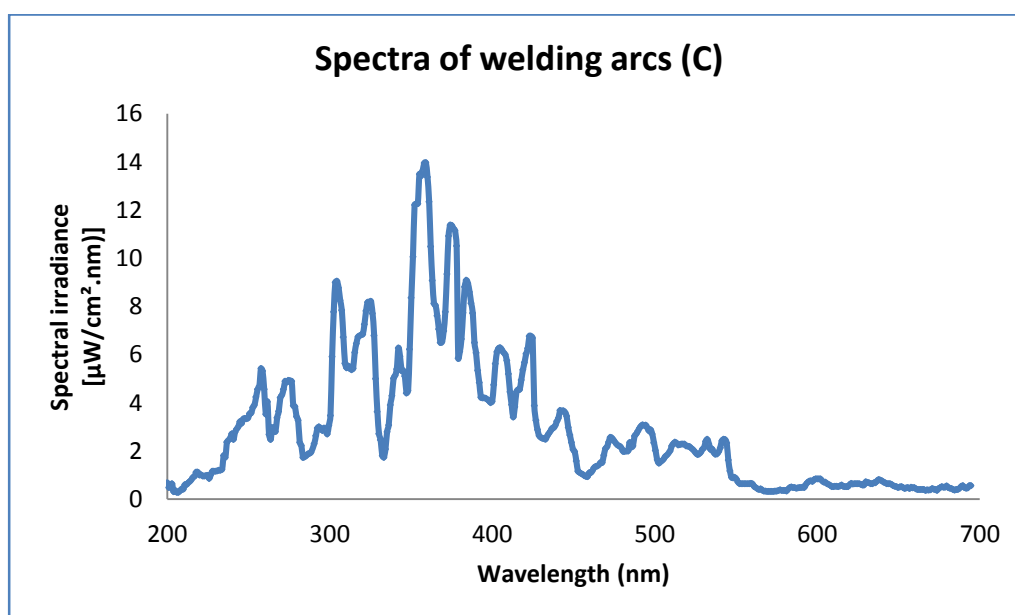


Figura 19: Condições de teste - Processo: GMAW; Corrente do arco: 150 A; Eléctrodo: Linde 85; Gás de protecção: CO₂ AT 40cfm [38].

Comparando estes três espectros podemos desde logo concluir que a irradiância espectral média não varia significativamente com a UV e com o IRA apesar das variáveis experimentais.

Com o objectivo de calcular as diferentes irradiâncias/ radiâncias e as respectivas OD para as diferentes gamas de comprimentos de onda e tecidos afectados, foi necessário em primeiro lugar converter irradiância espectral em potência. Utilizou-se a seguinte expressão:

$$\Phi = E_s \times 4\pi r^2$$

onde Φ é potência radiante espectral [Wnm^{-1}], E_s é a irradiância espectral da fonte [$\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$], r é a distância à fonte [m].

De seguida calculou-se a irradiância espectral na abertura da pupila, de acordo com a expressão:

$$E_\lambda = \frac{\Phi}{A_{pupila}} = \frac{\Phi}{\pi \times r_{pupila}^2}$$

onde E_λ é a irradiância espectral [$\text{Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}$], Φ é potencia espectral [Wnm^{-1}], A_{pupila} é a área da pupila [m^2] e r_{pupila} é o raio padrão da pupila [$3.5 \times 10^{-3}\text{m}$].

Pelas recomendações do ICNIRP é nos dado a saber que a exposição da pele e do olho não pode exceder os 30Jm^{-2} de irradiância espectral ponderada para um período de 8 horas entre os comprimentos de onda 180nm a 400nm. Por outro lado o olho não pode estar exposto a mais de 10^4Jm^{-2} para comprimentos de onda entre 315nm e 400nm.

Conforme já vimos, calcula-se a irradiância efectiva E_{eff} através da expressão:

$$E_{eff} = \sum_{\lambda=180nm}^{\lambda=400nm} E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

onde E_λ é a irradiância espectral, $S(\lambda)$ a função de ponderação de efeitos biológicos e $\Delta\lambda$ a largura de banda.

A irradiância não ponderada é dada por:

$$E = \sum_{\lambda=315nm}^{\lambda=400nm} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

onde E_{λ} é a irradiância espectral e $\Delta\lambda$ a largura de banda.

Para a protecção contra fotoretinites, a exposição efectiva não pode exceder os 100 Jm^{-2} e a radiância efectiva L_B não pode exceder $1 \times 10^6 Wm^{-2}sr^{-1}$, para $t < 10000s$. A radiância L_B é dada pela expressão:

$$L_B = \sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=700nm} L_{\lambda} \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$$

onde L_{λ} é a radiancia espectral, $B(\lambda)$ a função de ponderação de efeito fotoquímico e $\Delta\lambda$ a largura de banda. A radiancia espectral L_{λ} é dada pela expressão:

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi}{A_{Ffotoquímica} \times \Omega} = \frac{\Phi}{\pi \times r_{fotoquímico}^2 \times \Omega} = \frac{\Phi}{\pi \times \tan\left(\frac{\alpha_{fotoquímica}}{2}\right) \times d \times \Omega}$$

onde Φ é potência espectral [Wnm^{-1}], $A_{Ffotoquímica}$ é a área da fonte para efeito fotoquímico [m^2], Ω é o ângulo sólido [sr], d é a distância do ponto de medição à fonte e $\alpha_{fotoquímica}$ é a subtendente angular da fonte para efeito fotoquímico [1.1×10^{-2} rad].

A protecção da retina humana contra danos térmicos baseia-se na ponderação por uma função de dano térmico na retina $R(\lambda)$ e tem que ser avaliada para o intervalo de tempo de exposição $10\mu s \leq t \leq 10s$.

O valor da exposição máxima permitida, expressa em termos de radiância [$Wm^{-2}sr^{-1}$] é dada pela expressão:

$$MPE = \frac{5 \times 10^4}{\alpha \times t^{0,25}} = 1,65 \times 10^7$$

onde α é a subtendente angular [1.7×10^{-3} rad] e t é o tempo de exposição [s]. Neste caso para efeito de cálculo considerou-se 10s pois é o limite máximo imposto pela avaliação de danos térmicos. Para o cálculo deste limite fez-se uma aproximação a zero no intervalo de comprimento de onda entre os 800nm e os 1400nm no caso dos espectros A e B, e no intervalo de 700nm aos 1400nm no caso do espectro C.

A radiância efectiva L_R é dada pela expressão:

$$L_R = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=1400nm} L_{\lambda} \times R(\lambda) \times \Delta\lambda$$

onde L_{λ} é a radiância espectral da fonte, $R(\lambda)$ a função de ponderação de efeito térmico e $\Delta\lambda$ a largura de banda. Neste caso L_{λ} é dado por:

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi}{A_{fonte} \times \Omega} = \frac{\Phi}{\pi \times r_{fonte}^2 \times \Omega}$$

onde Φ é potência espectral [Wnm^{-1}], A_{fonte} é a área da fonte [m^2] e Ω é o ângulo sólido [sr].

A densidade óptica (OD) corresponde à absorvância de um dado material, sendo representativa da atenuação da radiação que ocorre quando esta passa através de um filtro de protecção. É dada pela expressão seguinte [39]:

$$OD = \log_{10} \frac{H_0}{MPE}$$

em que H_0 é o maior valor de exposição e a MPE é a exposição máxima admissível.

Tabela 6: Exposição máxima admissível (MPE) e Densidade óptica (OD) mínima para materiais de protecção, para os diferentes espectros.

Casos	180nm – 400nm			315nm – 400nm			380nm – 1400nm			300nm – 700nm		
							Danos térmicos da retina			Dano fotoquímico da retina		
	H _{eff} (J/m ²)	MPE (J/m ²)	OD	H (J/m ²)	MPE (J/m ²)	OD	L _R (w/m ² /sr)	MPE (W/m ² /sr)	OD	L _B (w/m ² /sr)	MPE (W/m ² /sr)	OD
A	4,05x10 ⁵	30	4,13	1,39x10 ⁶	10 ⁴	2,14	5,42x10 ¹¹	1,67x10 ⁷	4,52	1,34x10 ¹⁰	1x10 ⁶	4,13
B	9,71x10 ⁵		4,51	7,55x10 ⁵		1,88	2,00x10 ¹¹		4,08	4,8x10 ⁹		3,68
C	4,85x10 ⁵		4,21	2,03x10 ⁶		2,31	2,67x10 ¹¹		4,21	7,23x10 ⁹		3,86

Podemos concluir que os danos térmicos sobre a retina é que impõem uma densidade óptica superior sendo, por isso, os tipos de danos que determinam o grau de protecção a utilizar. Considera-se para efeitos de protecção aqueles que têm efeitos mais restritivos.

6.2. Estudo experimental: espectro de processo de soldadura TIG

Foi utilizado um espectrómetro de fibra óptica, Ocean Optics USB+ 2000 UV-VIS (Ocean Optics, Dunedin, Florida, USA) para adquirir o espectro de emissão de um arco eléctrico de soldadura.

Este espectrómetro comunica com um computador PC pela interface USA, não necessitando de alimentação externa. O controlo do espectrómetro e do processo de aquisição de dados é realizado através do seu próprio *software*, SpectraSuite. O espectrómetro funciona na gama de comprimentos de onda entre 200nm e 900nm.

Para obter um espectro calibrado de uma fonte recorreremos a uma fonte de luz quartzo-tungsténio-halogénio Ocean Optics LS-1. Trata-se de uma fonte de luz branca extremamente versátil e optimizada para uso na região VIS-NIR que pode ser facilmente acoplada por fibra óptica com o espectrómetro.

Com a curva característica da fonte de luz e o espectro medido pelo espectrómetro fez-se a calibração do sistema em irradiância espectral entre 360 nm e 890nm.

A curva característica da fonte de luz que usamos para fazer a calibração do sistema é apresentada na figura 20.

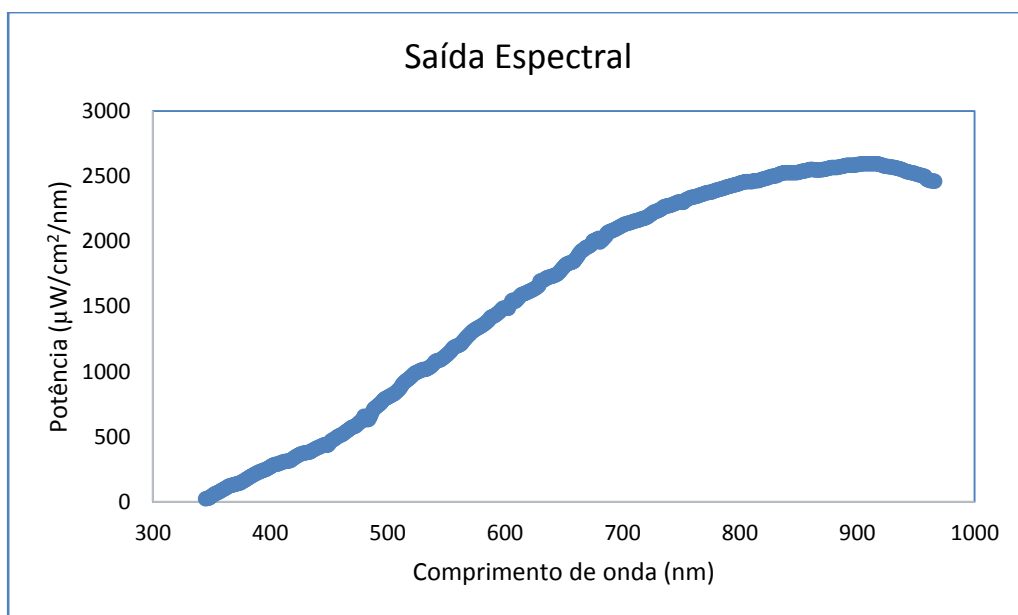


Figura 20: Saída espectral da fonte de luz LS-1.

Com o espectrómetro, mede-se o espectro da fonte LS-1. O espectro que se obtém da fonte de luz é apresentado no figura 21 com o número de contagens a variar com o comprimento de onda.

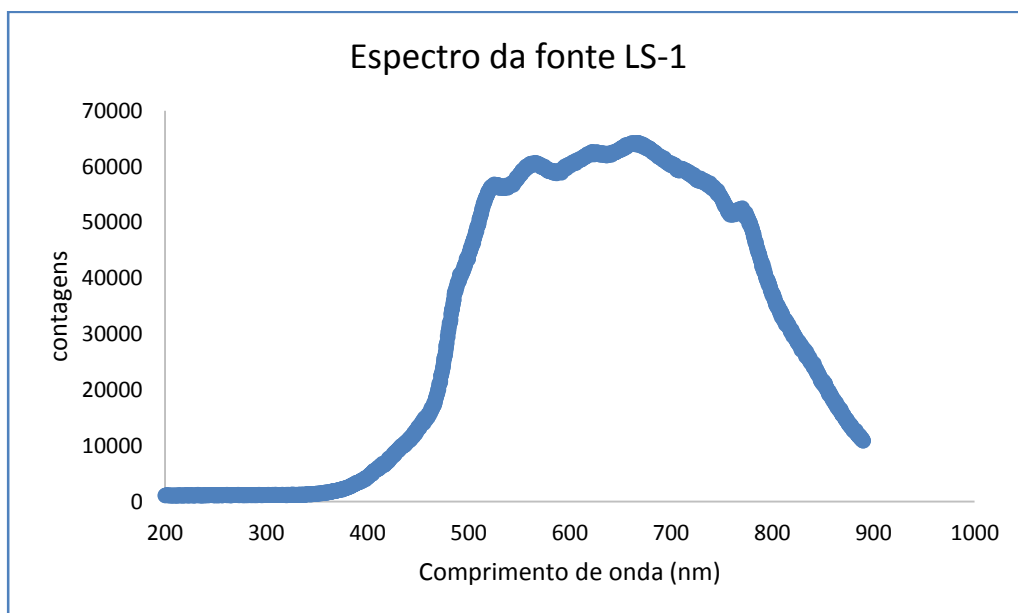


Figura 21: Espectro da fonte LS-1 medido pelo espectrómetro

Para efeitos de calibração o espectro de saída (referência), figura 20, e o espectro medido da fonte (figura 21) foram normalizados à unidade.

De seguida calculou-se o factor que transforma o espectro medido no espectro que é apresentado pelo fornecedor. Com este valor, corrigimos o espectro da fonte LS-1, figura 22.

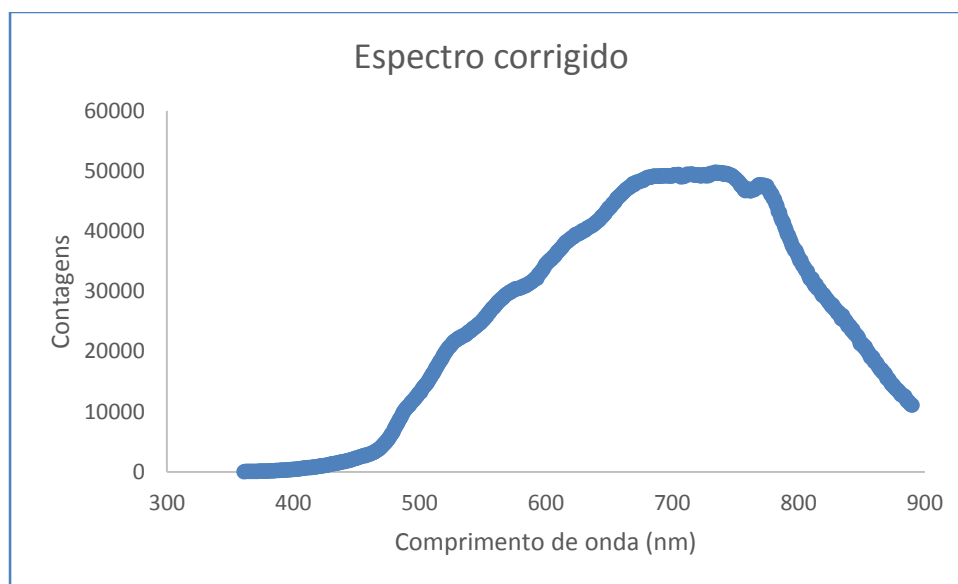


Figura 22: Espectro corrigido da fonte LS-1, com um total de contagens de 14002353,17.

Com o auxílio de um sensor calibrado do tipo termopilha, com a um medidor de potência de banda larga Melles-Griot 13PEM001 (Melles-Griot, Rochester, Nova Iorque, USA) mediu-se a potência da fonte de luz, 0,4 mW, e posteriormente calculou-se a sua área e irradiância total. O detector tem um raio de 0,5 cm o que perfaz uma área de 0,785 cm². A sua irradiância total, $5,1 \times 10^{-1}$ mW/cm², obtém-se matematicamente através da divisão da potência pela área. A irradiância corrigida ao número de contagens e dado pelo cálculo seguinte:

$$E' = \frac{E}{\text{Total de contagens}} = 3,64 \times 10^{-8} \text{ mW/cm}^2 / \text{contagens}$$

Neste momento é possível obter, através da multiplicação do espectro corrigido por E' , o espectro de calibração, figura 23.

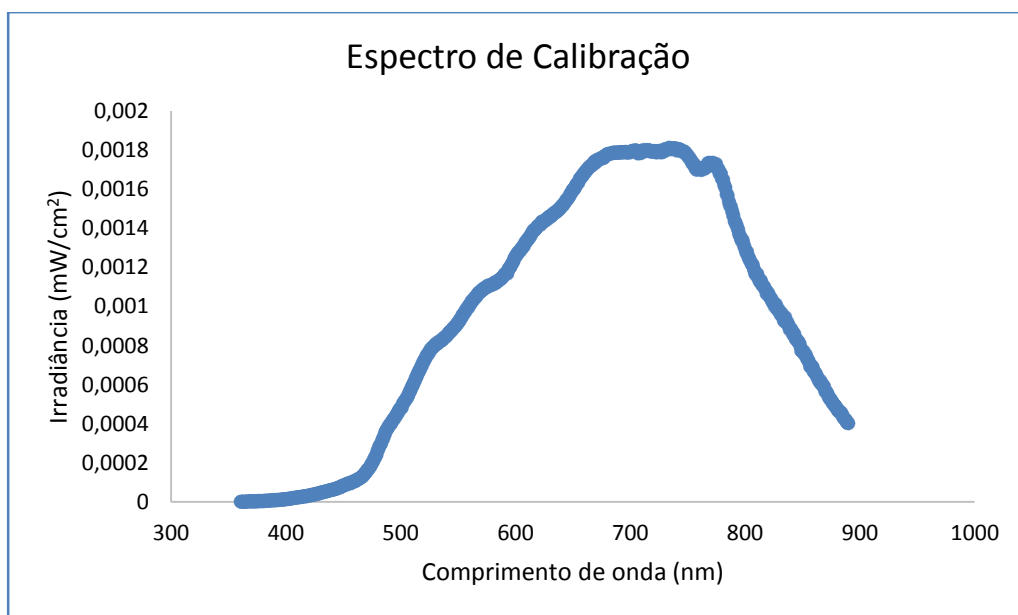


Figura 23: Espectro de calibração.

Em laboratório, foi medido um espectro de emissão (figura 24) de um processo de soldadura TIG nas seguintes condições de teste: corrente de arco 60A, eléctrodo de WT-20 de 1.6 mm de diâmetro, e gás de protecção de uma mistura de Árgon com CO₂ a 4.5 bar.

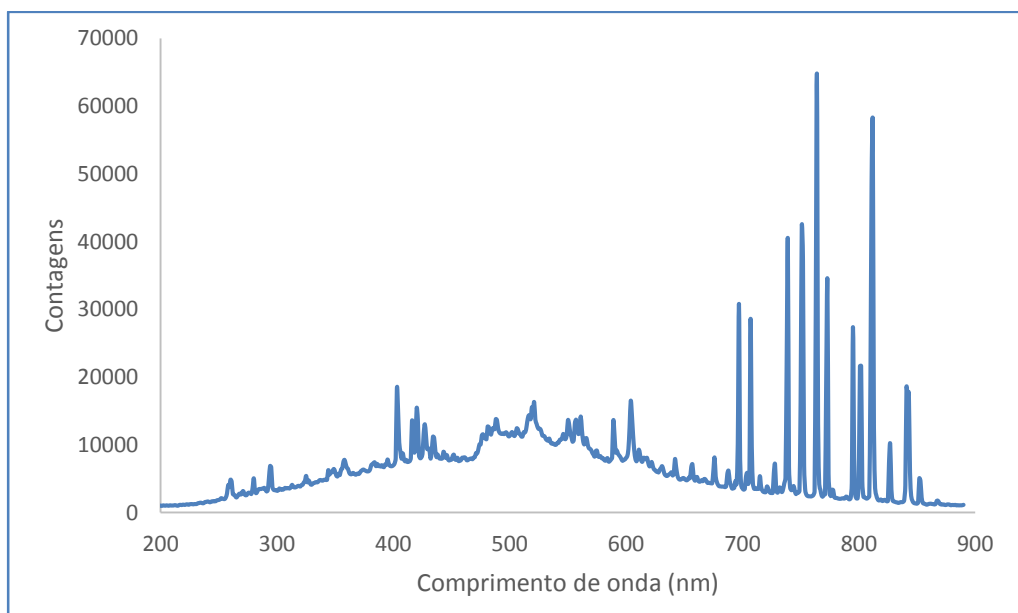


Figura 24: Espectro de radiação de arco eléctrico obtido experimentalmente. Condições de teste - Processo: TIG; Corrente do arco: 60A; Eléctrodo: WT-20; Gás de protecção: Ar + CO₂ a 4.5bar.

O espectro medido tem contribuições desde os 200 nm pelo que a calibração, realizada de acordo o procedimento atrás descrito, feita não abrange toda a gama de valores. Desta forma a maioria da radiação UV não seria analisada.

A análise do espectro medido pelo processo TIG foi feita na gama de comprimentos de onda para o qual havia calibração, ou seja, dos 360nm aos 890nm. O espectro calibrado para esta gama de valores toma a forma da figura 25.

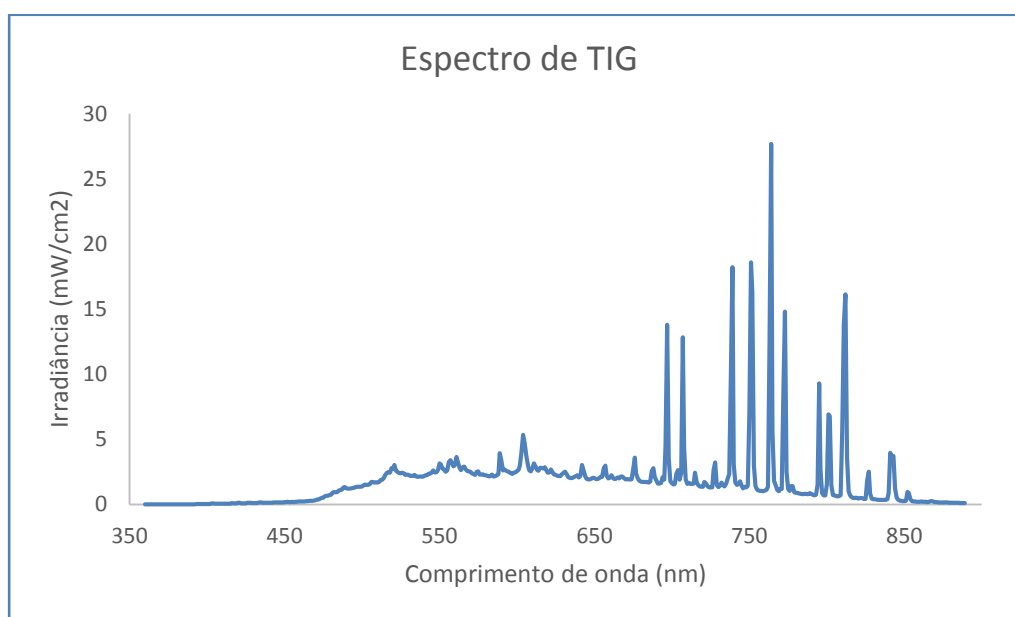


Figura 25: Espectro de emissão por processo TIG calibrado entre 360nm e 890nm.

O procedimento para chegar aos valores de MPE e OD foi o mesmo que o utilizado para calcular estes valores nos espectros analisados no ponto 6.1 desta tese. Neste caso a distância à fonte foi de 0.38m em vez de 1m.

Tabela 7: Exposição máxima admissível (MPE) e Densidade óptica (OD) mínima para materiais de protecção para o espectro TIG. Análise feita na gama de comprimentos de onda de 360nm a 890nm.

TIG	180nm – 400nm			315nm – 400nm			380nm – 1400nm			300nm – 700nm		
							Danos térmicos da retina			Dano fotoquímico da retina		
	H _{eff} (J/m ²)	MPE (J/m ²)	OD	H (J/m ²)	MPE (J/m ²)	OD	L _R (w/m ² /sr)	MPE (W/m ² /sr)	OD	L _B (w/m ² /sr)	MPE (W/m ² /sr)	OD
	3,32x10 ¹	30	0,04	6,24x10 ⁵	104	1,8	5,65x10 ¹²	1,67x10 ⁷	5,53	2,71x10 ¹¹	1x10 ⁶	5,43

Alguns filtros, nomeadamente para soldadura, são classificados pelo *shade number* (tabela 8), que é dado pela equação seguinte:

$$shade\ number = \frac{7}{3}OD + 1$$

Tabela 8: Densidade óptica (OD) e *shade number* para os quatro espectros analisados.

Espectros	OD	Shade number
A	4,52	12
B	4,51	12
C	4,21	11
TIG	5,53	14

7. DISCUSSÃO

Através do uso de um espectrómetro relativamente simples e barato e de uma fonte de luz calibrada conseguimos apresentar uma metodologia que permite avaliar os riscos de exposição a radiação óptica incoerente e determinar as medidas de protecção. A fonte utilizada para calibração do sistema emite numa gama de comprimentos de onda de 360nm aos 2500nm, não cobrindo todo o espectro de emissão do arco eléctrico.

Em tempo útil, desta tese, não foi possível realizar uma calibração para a toda gama de valores do espectro TIG medido. A resolução deste problema passaria por usar outra fonte de luz que tivesse uma resposta na gama pretendida. Uma das opções seria adquirir a fonte *SL5 Deuterium Halogen (Laser2000, Wessling, Alemanha)* ou *HPX-2000 (Ocean Optics, Dunedin, Florida, USA)*. A fonte *SL5* tem um custo de \$1,250 e a gama de comprimentos de onda é de 190nm a 1100nm. A fonte *HPX-2000* custa \$6,006 e a sua gama de comprimentos de onda é de 185nm a 2000nm. O fornecedor sugere o uso de uma fibra *solarization-resistant* para uma melhor resposta à radiação UV (gama de comprimentos de onda é dos 180nm aos 900nm). Por exemplo, a *QP230-1-XSR (Ocean Optics, Dunedin, Florida, USA)*, de um metro de comprimento e de 230 μm de diâmetro com o custo de \$218. De qualquer maneira todo o processo de calibração do sistema teria de ser efectuado com qualquer uma destas fontes. Assim sendo, como a diferença de preço é muito grande e o ganho da fonte mais cara é de 5nm, por isso, uma solução viável e barata seria adquirir a fonte *SL5 Deuterium Halogen*.

No espectro de emissão, a região UV depende principalmente da natureza do gás que constitui o plasma, enquanto a banda visível resulta do metal fundido incandescente, e da emissão dos gases que constituem o plasma que transporta a corrente do arco. A emissão de IR está relacionada com as ligações químicas das substâncias que constituem o arco eléctrico, através das suas frequências de vibração específicas. Maiores correntes de arco implicam emissões mais intensas na banda de IR devido à maior agitação dos átomos e ao aumento das partículas ionizadas.

Geralmente, usam-se gases de protecção inertes pois estes não reagem com os metais a serem trabalhados, não interferindo com a qualidade da solda. Os gases mais utilizados são o argón e o hélio, mas também misturas destes com dióxido de carbono e oxigénio.

O dióxido de carbono à temperatura ambiente comporta-se como um gás inerte, mas quando se atinge as temperaturas de soldadura torna-se activo. Quando temos uma mistura com dióxido de carbono com argon a condutividade térmica aumenta e conseqüentemente há um aumento da transferência de calor para o metal que leva à obtenção de uma área maior de fusão, comparativamente com a utilização de argon puro.

Da análise do espectro TIG (figura 25) podemos distinguir duas situações: por um lado os danos térmicos são os que impõem uma restrição mais elevada, por outro lado não podemos esquecer que a análise na gama UV não é fiável pois a maior parte não foi analisada por falta de calibração nesta gama de comprimentos de onda. O espectro A (figura 17) e C (figura 19) apresentam maior emissão da gama dos UV e por isso os danos fotoquímicos impostos pela radiação UV são os que impõem a necessidade de uma protecção mais elevada. No espectro B (figura 18) tal como no espectro TIG (figura 25) são os danos térmicos que definem o grau de protecção necessário. A densidade óptica mínima para óculos de protecção varia entre 4.21 (espectro C) e 5.53 (espectro TIG). Podemos concluir que o mecanismo de interacção da luz (térmico ou fotoquímico) com os tecidos oculares, que apresenta maior potencial de dano depende das condições do processo de soldadura.

No mercado existe uma variedade enorme de equipamentos de protecção tanto individual como colectiva. Os produtos são concebidos tendo em conta as condições apresentadas pela OSHA, AWS, ANSI, NIOSH, ICNIRP e, conseqüentemente, estão de acordo com as normas vigentes. As densidades ópticas, ou o respectivo *shade number*, que determinámos estão dentro da gama dos valores disponibilizados nos equipamentos de protecção comercializados.

Apesar de toda a regulamentação existente, infelizmente, pode ser comum encontrar soldadores que não usam óculos de protecção ou similares, e por isso continuam a chegar às unidades de saúde um número considerável de profissionais com queixas relacionadas com sobreexposição à radiação no posto de trabalho. Esta realidade pode estar relacionada com o facto de o trabalhar achar incómodo e desconfortável ou até mesmo desnecessário o uso de equipamento de protecção para um período pequeno de exposição.

Pelo facto de existirem continuamente trabalhadores expostos a níveis elevados de radiação, a preocupação dos fabricantes de equipamentos de protecção deve incluir um esforço adicional no que diz respeito ao projecto desses equipamentos de forma a garantir a

segurança do soldador, bem como aumentar o conforto e facilitar o seu trabalho. Por isso, o equipamento de protecção deve apresentar um equilíbrio entre protecção e conforto.

Actualmente desenvolvem-se equipamentos mais leves com o objectivo, por exemplo, de reduzir a fadiga no pescoço, acoplados de protectores das vias respiratórias, e com tecnologia mais avançada de protecção dos olhos que envolve um auto-escurecimento do ecrã de protecção, bem como, configurações personalizáveis e várias opções de *shade number*.

8. CONCLUSÃO

Para a actividade de soldadura as directrizes pelas quais a legislação e normas portuguesas e europeias se baseiam estão em conformidade com a situação actual pelo que devem ser seguidas e os seus limites cumpridos.

Actualmente, temos em vigor a Lei n.º 25/2010 de 30 de Agosto que transpõe a Directiva 2006/25/CE e que estabelece as prescrições mínimas para a protecção de qualquer trabalhador exposto durante o seu trabalho a radiação proveniente de fontes artificiais. Esta Directiva e consequentemente esta Lei baseiam-se em directrizes estabelecidas pelo ICNIRP e outros órgãos que dedicam tempo ao estudo destes casos.

A par com esta legislação, existe um conjunto de normas europeias que proporcionam informação adicional sobre a protecção individual e colectiva para os processos de soldadura. Não foi possível uma consulta exaustiva destas normas pois só estão disponíveis para compra, e no âmbito deste projecto não havia verba para as adquirir, ou para consulta numa dos pontos de acesso do IPQ.

Os limites representam condições sobre as quais se espera que quase todos os indivíduos possam estar expostos repetidamente sem efeitos adversos agudos e sem risco perceptível de efeitos retardados.

Podemos concluir que o risco é extremamente pequeno para o olho e pele como efeito crónico para as pessoas expostas abaixo dos limites recomendados.

Apesar do conjunto de limites a aplicar sobre a exposição dos olhos e pele, não é possível fornecer um limite de exposição único que se aplique a todos os indivíduos de forma estrita. Não nos podemos esquecer que estes limites de exposição podem não fornecer protecção adequada para indivíduos fotossensíveis ou para indivíduos expostos a contaminantes químicos, que utilizem fármacos ou fito-fotossensibilizadores ou sejam afáquicos, e nestes casos devem ser tomadas precauções adicionais.

Na realidade é que continuam a existir muitos trabalhadores a chegar às unidades de saúde com queixas de sobreexposição à radiação produzida no processo de soldadura. É necessário compreender o porquê desta situação uma vez que existem equipamentos próprios para proteger o trabalhador, como o caso de óculos e capacetes de protecção, e supostamente são usados durante a soldadura. Uma questão importante, e que ficará para estudos futuros,

seria a caracterização do espectro de absorção dos filtros de protecção, pois é necessário compreender se estes filtros estão a agir de acordo com o tipo de protecção pretendida, ou seja, se estão a absorver nas gamas de comprimento de onda desejáveis.

A análise dos espectros A, C e TIG mostrou que os danos térmicos impunham um limite de exposição mais restritivo. Por outro lado, no caso do espectro C, os efeitos fotoquímicos são restritivos. A densidade óptica mínima para óculos de protecção varia entre 4.21 (espectro C) e 5,53 (espectro TIG).

Podemos concluir que o mecanismo de interação da luz (térmico ou fotoquímico) com os tecidos oculares, que apresenta maior potencial de dano depende das condições do processo de soldadura. As densidades ópticas que determinámos estão dentro da gama dos valores disponibilizados nos equipamentos de protecção comercializados.

A radiação UVC é absorvida totalmente pela córnea e conjuntiva, pelo que os principais danos provocados são a conjuntivite e a fotoqueratite. Na pele, este tipo de radiação é absorvida pela camada mais externa, sendo que uma exposição prolongada pode levar à formação de um eritema e exposições repetidas podem levar, a longo prazo, ao aparecimento de cancro da pele.

A radiação UVB é absorvida na sua maioria pela córnea e pela conjuntiva, mas há, ainda, alguns fotões que atingem o cristalino. Para além da fotoqueratite e da conjuntivite esta radiação pode ainda levar à formação da catarata em situação de exposição repetida. A radiação UVB tem capacidade de penetrar mais profundamente que os UVC, produzindo neste tecido um envelhecimento precoce e um aumento da pigmentação.

A radiação UVA é absorvida pelo cristalino uma vez que a córnea apresenta elevada transmitância a esta gama de comprimentos de onda e em consequência desta absorção pode haver formação de cataratas. Queimaduras cutâneas, escurecimento da pele e reacções fotossensíveis são efeitos possíveis de uma exposição inadequada à radiação UVA.

A radiação visível é integralmente absorvida na retina e consequentemente esta pode sofrer danos fotoquímicos e térmicos se esta for exposta a uma fonte intensa de luz. Na pele a radiação visível sofre efeitos semelhantes aos provocados pela radiação UVA, este tipo de radiação é a que tem maior de penetração na pele.

A radiação IRA é absorvida na maioria pela retina, mas há uma fracção que é absorvida pelo cristalino, desta forma os efeitos no olho são similares ao da radiação visível. A diferença é que a IRA é uma radiação invisível e como tal o olho não tem mecanismos

intrínsecos de defesa pelo que pode estar exposto por longos períodos. Na pele a radiação IRA provoca queimaduras de diferentes graus devido ao seu elevado nível de penetração.

A radiação IRB é absorvida na totalidade pela córnea, se a irradiância e tempo de exposição forem elevados esta pode sofrer queimaduras. Os efeitos desta radiação na pele são semelhantes aos da IRA.

A radiação IRC por ser absorvida, também, na sua totalidade pela córnea pode sofrer os mesmos danos apresentados pela IRB. Este tipo de radiação não ultrapassa a camada mais externa da pele, e se a irradiância for suficientemente elevada pode causar queimaduras cutâneas e deixar as camadas seguintes expostas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Álvaro, *Segurança e Saúde no Trabalho*, Coimbra, 2013.
- [2] D.-G. d. E. d. A. S. e. d. I. Comissão Europeia, Guia de boas práticas não vinculativo para a aplicação da Directiva 2006/25/CE, Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia, 2010.
- [3] ICNIRP, “Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180nm and 400nm (incoherent optical radiation),” Health Physics Society, Alemanha, 2004.
- [4] O. P. d. Construção, *Segurança e Higiene no Trabalho*, O Portal da Construção.
- [5] J. LaDou, *Current Occupational & Environmental Medicine*, Lange Medical Books/McGraw-Hill, 2002.
- [6] S. C. Gary Zeman, “Health Physics Society,” [Online]. Available: <http://hps.org/publicinformation/ate/q2111.html>.
- [7] EnviSolutions, “EnviSolutions,” Novembro 2011. [Online]. Available: http://www.envisolutions.eu/website/index.php?option=com_content&view=article&id=163&Itemid=136.
- [8] A. M. Morgado, *Utilização segura de lasers*, Coimbra: IBILI.
- [9] ICNIRP, “Protection of workers against ultraviolet radiation,” Health Physics Society, Alemanha, 2010.
- [10] L. Factor Segurança, “Radiações ionizantes e não ionizantes,” *TECNOMETAL n.º 150*, Janeiro/Fevereiro 2004.
- [11] L. A. F. Fernandes, *Visão Computacional*, 2012.
- [12] A. d. O. P. Lilia Coronato Courrol, “Capítulo 4: Olho humano,” em *APOSTILA TEÓRICA - ÓPTICA TÉCNICA I*, Brasil, Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2012, pp. 54-59.
- [13] S. T. Alain Ramé, *Anatomia e fisiologia*, Lisboa: Climepsi Editores, 2012.
- [14] S. S. Tate, *Anatomia & Fisiologia*, Lisboa: Lusodidacta, 2001.
- [15] A. M. Morgado, “Instrumentação optoelectrónica,” 2011. [Online]. Available: <https://woc.uc.pt/fisica/getFile.do?tipo=2&id=794>.
- [16] L. A. Lopes, “Nupen,” [Online]. Available: http://www.nupen.com.br/Revista_port/fund_fisicos4_3.php.
- [17] Q. S. R. J. M. P. Keith P Thompson, *Therapeutic and dignostic application of laswers in ophthalmology*, IEEE, 1992.
- [18] X. H. H. G. W. K. A. Lembares, *Absorption spectra of corneas in far ultraviolet region*, 1997.
- [19] “Optique pour l’ingénieur,” [Online]. Available: http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C02/co/Contenu_05.html.
- [20] S. & C. Dermatology, “Surgical & Cosmetic Dermatology,” [Online]. Available: <http://www.surgicalcosmetic.org.br/public/figuras.aspx?id=103>.

- [21] ICNIRP, *Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3 μ M)*, Health Physics Society, 1997.
- [22] ICNIRP, "Protection of workers against ultraviolet radiation," Health Physics Society, Alemanha, 2010.
- [23] A. Elbern, "ProRad," [Online]. Available: <http://www.prorad.com.br/cursos/Cursos/rmi.pdf>.
- [24] R. L. Ótico, "Olho humano - anatomia," [Online]. Available: <http://www.laboratoriorigor.com.br/anatomia.html>.
- [25] N. V. R. Pedro Henrique Pozzebon, *Radiação ultravioleta em trabalhadores da construção civil: problemas e soluções*, Disc. Scientia, 2009.
- [26] M. Seelig, "Segurança e Trabalho Online," Junho 2003. [Online]. Available: <http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/rad-uv-seelig.pdf>.
- [27] S. & C. Dermatology, "Surgical & Cosmetic Dermatology," [Online]. Available: <http://www.surgicalcosmetic.org.br/public/figuras.aspx?id=144>.
- [28] Dermatologia.net, "Dermatologia.net," [Online]. Available: <http://www.dermatologia.net/novo/base/radiacaouv.shtml>.
- [29] G. Boaventura, "Nova Berrini," [Online]. Available: <http://novaberrini.com.br/2012/02/radiacao-solar-efeitos-sobre-a-pele/>.
- [30] E. T. P. André, "Prof2000," [Online]. Available: http://www.prof2000.pt/users/eta/rad_n_ion.htm.
- [31] J. Saraiva, *Aula 4 - CET - Instalações eléctricas e automação industrial*, Aveiro, 2012.
- [32] L. C. S. Tatagiba, R. B. Gonçalves e R. Paranhos, "Tendências no desenvolvimento de gases de protecção utilizados na soldagem MIG/MAG," *Soldagem & Inspeção*, pp. 218-228, Julho/Setembro 2012.
- [33] L. Q. José F. Oliveira Santos, *Processos de Soldadura*, Oeiras: Instituto da Soldadura e Qualidade, 2003.
- [34] J. A. L. d. Sousa e S. R. Barra, "Exposição à radiação em processos de arco eléctrico: consequências à saúde e formas de controle," *Corte & Conformação de metais*, 2012.
- [35] ICNIRP. [Online]. Available: <http://www.icnirp.de/>.
- [36] F. R. Marinho, *Segurança no local de trabalho*, 1999.
- [37] ACT, "ACT - Autoridade para as Condições do Trabalho," 19 Abril 2013. [Online]. Available: [http://www.act.gov.pt/\(PT-PT\)/CENTROINFORMACAO/PRINCIPIOSGERAISPREVENCAO/Paginas/default.aspx](http://www.act.gov.pt/(PT-PT)/CENTROINFORMACAO/PRINCIPIOSGERAISPREVENCAO/Paginas/default.aspx).
- [38] D. H. Sliney, C. E. Moss e C. G. M. a. J. B. Stephens, "Transparent Welding Curtains," *Welding Journal*, pp. 17-24, 1982.
- [39] M. H. Niemz, *Laser-Tissue Interactions*, Alemanha: Springer, 2007.
- [40] "Portaria n.º 53/71. D.G. I Série. 28," pp. 98-118, 3 Fevereiro 1971.
- [41] "Lei n.º 98/2009. D.R. I Série. 172," pp. 5894-5920, 4 Setembro 2009.
- [42] "Lei n.º 25/2010. D.R. I Série. 168," pp. 3770-3782, 30 Junho 2010.

10. ANEXO A

Os valores de exposição à radiação óptica relevantes do ponto de vista biofísico são determinados utilizando as fórmulas a seguir mencionadas.

As alíneas a) a o) remetem para as linhas correspondentes da tabela 6 do anexo B sobre os limites de exposição para cada gama de valores [2].

$$\text{a) } E_{eff} = \sum_{\lambda=180nm}^{\lambda=400nm} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

$$\text{b) } E_{UVA} = \sum_{\lambda=315nm}^{\lambda=400nm} E_{\lambda} \times \Delta\lambda$$

$$\text{c) e d) } L_B = \sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=700nm} L_{\lambda} \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$$

$$\text{e) e f) } E_B = \sum_{\lambda=300nm}^{\lambda=700nm} E_{\lambda} \times B(\lambda) \times \Delta\lambda$$

$$\text{g) a l) } L_R = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=1400nm} L_{\lambda} \times R(\lambda) \times \Delta\lambda$$

$$\text{m) e n) } E_{IV} = \sum_{\lambda=780nm}^{\lambda=3000nm} E_{\lambda} \times \Delta\lambda$$

$$\text{o) } H_{pele} = \sum_{\lambda=380nm}^{\lambda=3000nm} E_{\lambda} \times \Delta\lambda$$

11. ANEXO B

Tabela 9: Valores limite de exposição para radiação óptica não coerente [2].

Índice	Comprimento de onda (nm)	Valores limite de exposição	Unidades	Observações	Parte do Corpo	Risco
a	180-400 (UVA, UVB e UVC)	$H_{eff} = 30$ Valores diários 8 horas	$[Jm^{-2}]$		Córnea Conjuntiva cristalino Pele	Fotoqueratite Conjuntivite Cataratogénese Eritema Elastose Cancro de pele
b	315-400 (UVA)	$H_{UVA} = 10^4$ Valores diários 8 horas	$[Jm^{-2}]$		Cristalino	Cataratogénese
c	300-700 (Luz azul) ¹	$L_B = \frac{10^6}{t}$ para $t \leq 10000s$	$L_B : [Wm^{-2}sr^{-1}]$ $t : [segundos]$	para $\alpha \geq 11mrad$	Retina	Foto-retinite
d	300-700 (Luz azul) ¹	$L_B = 100$ para $t > 10000s$	$[Wm^{-2}sr^{-1}]$			
e	300-700 (Luz azul) ¹	$E_B = \frac{100}{t}$ para $t \leq 10000s$	$E_B : [Wm^{-2}]$ $t : [segundos]$	para $\alpha < 11mrad^2$		
f	300-700 (Luz azul) ¹	$E_B = 0,01$ $t > 10000s$	$[Wm^{-2}]$			
g	380-1400 (Visível e IVA)	$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha}$ para $t > 10s$	$[Wm^{-2}sr^{-1}]$	$C_\alpha = 1,7$ para $\alpha \leq 1,7mrad$ $C_\alpha = \alpha$ para $1,7 \leq \alpha \leq 100mrad$ $C_\alpha = 100$ para $\alpha > 100mrad$ $\lambda_1 = 780; \lambda_2 = 1400$	Retina	Queimadura da retina
h	380-1400 (Visível e IVA)	$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha t^{0,25}}$ para $10\mu s \leq t \leq 10s$	$L_R : [Wm^{-2}sr^{-1}]$ $t : [segundos]$			
i	380-1400 (Visível e IVA)	$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha}$ para $t < 10\mu s$	$[Wm^{-2}sr^{-1}]$			
j	780-1400 (IVA)	$L_R = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha}$ para $t > 10s$	$[Wm^{-2}sr^{-1}]$	$C_\alpha = 11$ para $\alpha \leq 11mrad$ $C_\alpha = \alpha$ para $11 \leq \alpha \leq 100mrad$ $C_\alpha = 100$ para $\alpha > 100mrad$ (campo de visão da medição: 11mrad) $\lambda_1 = 780; \lambda_2 = 1400$	Retina	Queimadura da retina
k	780-1400 (IVA)	$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha t^{0,25}}$ para $10\mu s \leq t \leq 10s$	$L_R : [Wm^{-2}sr^{-1}]$ $t : [segundos]$			
l	780-1400 (IVA)	$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha}$ para $t < 10\mu s$	$[Wm^{-2}sr^{-1}]$			
m	780-3000 (IVA e IVB)	$E_{IV} = 1800 \cdot t^{0,75}$ para $t \leq 1000s$	$E : [Wm^{-2}]$ $t : [segundos]$		Córnea cristalino	Queimadura da córnea Cataratogénese
n	780-3000 (IVA e IVB)	$E_{IV} = 100$ para $t > 1000s$	$[Wm^{-2}]$			

¹ A gama de 300nm a 700nm abrange parte dos UVB, todos os UVA e a maior parte da radiação visível; o risco que lhe está associado é vulgarmente conhecido por risco de “luz azul”. A luz azul, em sentido restrito, abrange apenas a gama de aproximadamente 400nm a 490nm.

² Para uma fixação constante de fontes muito pequenas com uma composição angular < 11mrad, L_B pode ser convertido em E_B . Em regra, isto aplica-se apenas a instrumentos oftalmológicos ou a um olho estabilizado durante uma anestesia. O tempo máximo de fixação do olhar é dado por: $t_{max} = 100/E_B$, sendo E_B expresso em Wm^{-2} . Dado o movimento dos olhos durante as funções normais da visão, tal não excede 100s.

