

Radiaciones ópticas artificiales: aplicación de los VLE para la determinación del factor de protección de un filtro (FPF) de protección ocular

Artificial Optical Radiation: application of ELV for determining the filter protection factor (FPF) for protective eyewear
Rayonnements optiques artificiels: application de le VLE pour le calcul du facteur de protection d'un filtre (FPF) oculaire

Autor:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)

Elaborado por:

Silvia Torres Ruiz
CENTRO NACIONAL DE
MEDIOS DE PROTECCIÓN. INSHT

Esta NTP pretende ser un instrumento que facilite la aplicación de la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales (RO), con objeto de seleccionar adecuadamente gafas o pantallas que protejan frente a las radiaciones ópticas artificiales no tipificadas. En concreto, se desarrolla un caso práctico que expone los pasos a seguir para determinar el factor de protección de varios filtros, con objeto de seleccionar el que ofrece un factor de protección más adecuado para proteger frente a la radiación óptica emitida por un dispositivo ILS (fuente de alta intensidad).

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

El RD 486/2010 tiene por objeto establecer las disposiciones mínimas para la protección de los trabajadores contra los riesgos para su salud y su seguridad derivados o que puedan derivarse de la exposición a RO durante su trabajo. Una de las partes del cuerpo humano más sensibles a la exposición a las radiaciones son los ojos.

Para evitar la exposición a RO, tal y como establecen los principios de acción preventiva recogidos en el artículo 15 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, en primer lugar se han de utilizar equipos de trabajo que dispongan de elementos de seguridad intrínseca que eliminen o limiten una posible exposición accidental a RO, si esto no es suficiente, se deben utilizar medios de control que limiten la exposición de los trabajadores, como pueden ser las pantallas de protección colectiva. En cualquier caso, los equipos de protección individual se utilizarán cuando los medios organizativos y técnicos aplicados no hayan sido capaces de eliminar el riesgo de exposición a este tipo de radiaciones.

El hecho de utilizar un protector ocular frente a las RO no va a eliminar la exposición a este riesgo, pero si la reducirá hasta unos niveles que no sean perjudiciales para la seguridad y salud del trabajador.

La mayoría de los filtros de protección frente a radiaciones ópticas, se pueden seleccionar teniendo en cuenta las recomendaciones establecidas en las normas armonizadas que habitualmente se utilizan para la certificación de los equipos de protección ocular. Estas recomendaciones para la selección del grado de protección adecuado, se dan en función de características de la fuente tales como: su temperatura, tipo de soldadura, etc. (Véase Apéndice 6 de la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales).

En aquellos casos en que la exposición a radiaciones ópticas artificiales venga dada por un tipo de fuente o aplicación no tipificada en las recomendaciones referenciadas anteriormente, será necesario evaluar si se superan los valores límite de exposición (VLE) que apliquen en

función del rango de longitudes de onda en el que emita la fuente (Véase Apéndice 4 de la Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con la exposición a RO). En función del espectro de emisión de la fuente calcularemos la irradiancia $E(\lambda)$ o exposición radiante $H(\lambda)$, según corresponda, para poder comparar con el VLE que aplique en cada caso. A la relación entre $E(\lambda)$ o $H(\lambda)$ y el VLE correspondiente, se le suele denominar índice de riesgo I_{riesgo} ya que evalúa en qué cantidad se supera el VLE:

$$I_{\text{riesgo}} = \frac{E(\lambda) \text{ o } H(\lambda)}{\text{VLE}}$$

Si el I_{riesgo} es mayor que 1 indica que se supera el VLE, y habrá que dotar al trabajador de un filtro de protección que reduzca la exposición por debajo del VLE aplicado.

Para determinar el filtro de protección más adecuado, tendremos que determinar en cada caso el factor de protección del filtro (FPF) para cada rango de longitudes de onda donde se superen los VLE correspondientes. El FPF es el factor en que un ocular filtrante atenúa la exposición ocular a un tipo de radiación óptica artificial, ponderada según el riesgo ocular que se quiera evitar (riesgo térmico, riesgo por luz azul, etc.). Para calcularlo es necesario conocer la irradiancia espectral de la fuente y la transmitancia espectral del filtro. Si al determinar el I_{riesgo} éste es mayor de 1, se deberá seleccionar un filtro que disponga de un FPF al menos del mismo orden de valor que el I_{riesgo} (Véase figura 1).

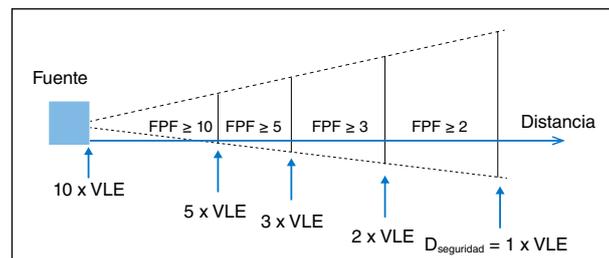


Figura 1. FPF requerido a un filtro de protección ocular cuando la RO emitida excede en un factor de 10 el VLE

En la figura 1 se puede ver como disminuye la exposición a la radiación con la distancia a la fuente, de tal forma que se considera distancia de seguridad aquella en la que la exposición es como mucho igual al VLE.

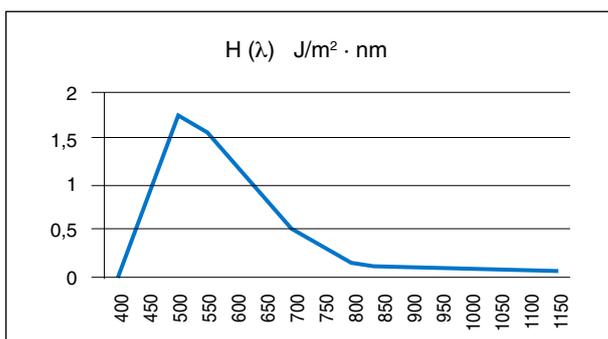
Un ejemplo de fuentes no tipificadas que emiten en más de una banda del espectro son las fuentes de alta intensidad (ILS), como las que se utilizan para tratamientos médicos y cosméticos (Véase figura 2). Los requisitos de protección que deben reunir los equipos de protección ocular frente a dispositivos ILS viene recogidos en la norma ISO 12609-1. La mayoría de fabricantes de este tipo de dispositivos van a suministrar o indicar el filtro de protección ocular que debe usarse. No obstante, a continuación se desarrolla un caso práctico que expone los pasos a seguir para determinar el factor de protección de varios filtros, con objeto de seleccionar el que ofrece un FPF más adecuado para proteger frente a la radiación óptica emitida por un dispositivo ILS ponderada según el riesgo ocular que se deba evitar.



Figura 2. Tratamiento facial con ILS

2. APLICACIÓN DE LOS VLE

Suponemos una fuente de luz intensa (ILS) de emisión pulsada (IPL) para tratamientos cosméticos. Los datos que a continuación se indican están basados en un ejemplo recogido en la Norma ISO 12609-2. En la gráfica 1 se muestra la exposición radiante espectral $H(\lambda)$ medida a una distancia de 0,2 m del dispositivo, en el rango de 400 a 1150 nm. El tiempo de adquisición de las medidas ha sido mayor que la duración de un pulso, 0,005 s, y vamos a suponer que el tiempo de exposición es igual a la duración del pulso.



Gráfica 1. Exposición radiante espectral medida para una fuente ILS de emisión pulsada

Longitud de onda λ (nm)	ILS Exposición radiante $H(\lambda)$ (J/m ² nm), $r=0,2$ m
400	0
450	0,8
500	1,75
550	1,55
600	1,2
650	0,8
700	0,48
750	0,3
800	0,15
850	0,1
900	0,08
950	0,05
1000	0,05
1050	0,05
1100	0,05
1150	0,05

Tabla 1. Datos espectrales de la exposición radiante medida para una fuente ILS

Teniendo en cuenta que el rango de emisión de la fuente abarca, principalmente, la región del visible, sólo tenemos que calcular el valor límite de exposición para riesgo de quemaduras en la retina (VLE-4) y el valor límite de exposición para riesgo por luz azul que da lugar a la fotorretinitis (VLE-3a o VLE-3b). No va a existir riesgo por exposición a radiación ultravioleta ni riesgo derivado de la exposición a radiación infrarroja. (Anexo I Radiaciones ópticas incoherentes A. Tabla A.1 del Real Decreto 486/2010 sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales)

En este caso, teniendo en cuenta las suposiciones realizadas, el VLE-4 para riesgo de quemaduras en la retina, vendrá determinado por la expresión:

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a t^{0,25}}$$

Siendo;

L_R = Radiancia

C_a = Factor

t = Tiempo de exposición

Si consideramos que las dimensiones de la fuente son ($x=0,01$ m, $y=0,03$ m), y que las medidas se han realizado a una distancia (r) de 0,2 m. El ángulo subtendido α será igual:

$$\alpha = \frac{(x + y) / 2}{r} = 0,1 \text{ rad} = 100 \text{ mrad}$$

Siendo $\alpha=100$ mrad, $C_a=\alpha$, resultando que:

$$\text{VLE-4} = L_{R_{\text{max}}} = 1880000 \text{ W/m}^2 \text{sr}$$

En el caso que nos ocupa, al ser $\alpha=100$ mrad, el valor límite de exposición que aplica para el riesgo por luz azul es el VLE-3a. Teniendo que cuenta que $t \leq 10000$ s, entonces:

$$\text{VLE-3a} = L_{B_{\text{max}}} = 10^6 / t = 2 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2 \text{sr}$$

Una vez determinados los valores límites que aplican, se calculan las radiancias ponderadas L_R y L_B , a partir de los datos de exposición radiante espectral medidos para la fuente problema, o suministrados por el fabricante.

$$L_R = \frac{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\omega}$$

Dónde:

$E(\lambda) = H(\lambda)/t$, siendo en nuestro caso $t=0,005s$

$R(\lambda)$ es la función o curva de ponderación para el riesgo térmico en el visible e IRA (380-1400 nm) (Anexo I, C. Curvas de ponderación Tabla A.4 del RD 486/2010)

$\Delta\lambda$ es el incremento de longitudes de onda o ancho de banda, en el caso que nos ocupa se ha considerado $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$

ω es el ángulo sólido subtendido, que viene dado por la expresión:

$$\omega = \frac{A}{r^2}$$

Dónde:

A = Área de la fuente

r = Distancia a la fuente

La tabla 2 muestra el valor por longitud de onda, de los diferentes términos que intervienen en el cálculo del numerador de L_R .

λ (nm)	H(λ) J/m ² nm	E(λ) W/m ² nm	R(λ)	E(λ)·R(λ)· $\Delta\lambda$ W/m ²
400	0	0	1	0
450	0,8	160	9,4	75200
500	1,75	350	1	17500
550	1,55	310	1	15500
600	1,2	240	1	12000
650	0,8	160	1	8000
700	0,48	96	1	4800
750	0,3	60	0,794	2382
800	0,15	30	0,63	945
850	0,1	20	0,501	501
900	0,08	16	0,398	318,4
950	0,05	10	0,316	158
1000	0,05	10	0,251	125,5
1050	0,05	10	0,2	100
1100	0,05	10	0,2	100
1150	0,05	10	0,2	100
				$\Sigma=1,4 \cdot 10^5$

Tabla 2. Cálculo de la radiancia ponderada L_R

$$L_R = \frac{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\omega} = \frac{1,4 \cdot 10^5}{7,5 \cdot 10^{-3}}$$

$$L_R = 1,87 \cdot 10^7 \text{ W / m}^2 \cdot \text{sr}$$

Se calcula el índice de riesgo como sigue:

$$I_{\text{riesgo}} = \frac{L_R}{VLE - 4} = \frac{1,87 \cdot 10^7}{1,88 \cdot 10^6} = 9,9$$

$$I_{\text{riesgo}} > 1 \Rightarrow \text{SE SUPERA EL VLE - 4}$$

Por otro lado, teniendo en cuenta que:

$$\alpha = 100 \text{ mrad}$$

Para determinar si existe riesgo por luz azul se aplica el VLE-3a como sigue:

$$VLE - 3a = L_B = \frac{\sum_{300}^{700} E(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\omega}$$

Dónde:

$E(\lambda) = H(\lambda)/t$, siendo en nuestro caso $t=0,005s$

$B(\lambda)$ es la función o curva de ponderación para el riesgo fotoquímico en el visible (300-700 nm) (Anexo I, C. Curvas de ponderación Tabla A.4 del RD 486/2010)

$\Delta\lambda$ es el incremento de longitudes de onda o ancho de banda, en el caso que nos ocupa se ha considerado $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$

ω es el ángulo sólido subtendido

La tabla 3 muestra el valor por longitud de onda, de los diferentes términos que intervienen en el cálculo del numerador de L_B .

λ (nm)	H(λ) J/ m ² nm	E(λ) W/ m ² nm	B(λ)	E(λ)·B(λ)· $\Delta\lambda$ W/m ²
400	0	0	0,1	0
450	0,8	160	0,94	7520
500	1,75	350	0,1	1750
550	1,55	310	0,01	155
600	1,2	240	0,001	12
650	0,8	160	0,001	8
700	0,48	96	0,001	4,8
				$\Sigma= 9450$

Tabla 3. Cálculo de la radiancia ponderada L_B

Sustituyendo en la expresión para el cálculo de L_B :

$$L_B = \frac{\sum_{300}^{700} E(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\omega} = \frac{9450}{7,5 \cdot 10^{-3}}$$

$$L_B = 1,26 \cdot 10^6 \text{ W / m}^2 \cdot \text{sr}$$

Calculamos el índice de riesgo como sigue:

$$I_{\text{riesgo}} = \frac{L_B}{VLE - 3a} = \frac{1,26 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^8} = 6 \cdot 10^{-3}$$

$$I_{\text{riesgo}} < 1 \Rightarrow \text{NO SUPERA EL VLE - 3a}$$

Por lo tanto, no existe riesgo para la retina por mecanismos fotoquímicos, pero si existe riesgo de quemaduras.

3. DETERMINACIÓN DEL FPF

A la vista de los resultados obtenidos, se supera el VLE-4, por tanto, será necesario utilizar un filtro con un FPF de al menos un orden de 10.

Un filtro con:

$$FPF=10 \Rightarrow \tau = 1/FPF \approx 0,1 = 10\%$$

Tiene una transmisión media (τ) de aproximadamente un 10% en el rango de 400 a 1100 nm, que es el principal rango de emisión de la fuente problema.

Los filtros de protección ocular frente a radiaciones, se suelen caracterizar por su grado de protección (N). El grado de protección frente a fuentes de banda ancha (ultravioleta, soldadura, etc.) se determina a partir de la siguiente fórmula que lo relaciona con la transmisión media del filtro en el visible τ_{vis} :

$$N = 1 + \frac{7}{3} \log_{10} \frac{1}{\tau_{vis}}$$

Sustituyendo se obtiene que el filtro adecuado debe tener un grado de protección de aproximadamente 4. Por lo tanto, se podría seleccionar un filtro de grado 4 (R-4) que reúna los requisitos establecidos en la norma ISO 12609-1. En su defecto, se puede recurrir a un filtro de soldadura certificado en base a la norma UNE-EN 169 o UNE-EN 379, de grado de protección 4.

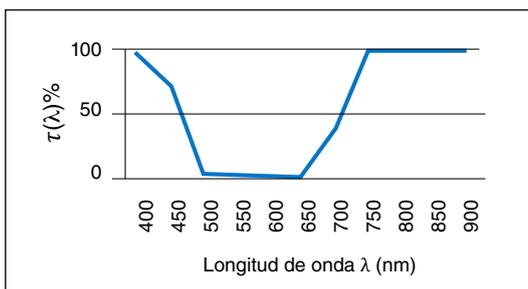
Otro supuesto puede ser que dispongamos de varios filtros y conozcamos de cada uno de ellos su transmisión espectral. Para saber cuál es más adecuado para disminuir la exposición hasta un nivel que no supere el VLE-4 evaluado anteriormente, debemos calcular, para cada filtro, el FPF ponderado con la curva para el riesgo térmico en el visible e IRA (380-1400 nm).

$$FPF_{R\lambda} = \frac{\sum_{380}^{1400} E(\lambda)R(\lambda)\Delta\lambda}{\sum_{380}^{1400} E(\lambda)R(\lambda)\tau(\lambda)\Delta\lambda}; FPF_{R\lambda} \approx I_{riesgo}$$

Supongamos pues un filtro 1 con la siguiente transmisión espectral:

Longitud de onda	Filtro 1 ($\tau\%$)
400	95
450	70
500	4
550	0
600	0
650	0
700	35
750	98
800	98
850	98
900	98
950	98
1000	98
1050	98
1100	98

Tabla 4. Transmitancia espectral filtro 1



Gráfica 2. Curva de la transmisión espectral del filtro 1

λ (nm)	$E(\lambda)$ W/m ² nm	$\tau(\lambda)$ Filtro 1	$R(\lambda)$	$E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$ W/m ²
400	0	0,95	1	0
450	160	0,7	9,4	1052,8
500	350	0,04	1	14
550	310	0	1	0
600	240	0	1	0
650	160	0	1	0
700	96	0,35	1	33,6
750	60	0,98	0,794	46,6872
800	30	0,98	0,63	18,522
850	20	0,98	0,501	9,8196
900	16	0,98	0,398	6,24064
950	10	0,98	0,316	3,0968
1000	10	0,98	0,251	2,4598
1050	10	0,98	0,2	1,96
1100	10	0,98	0,2	1,96
1150	10	0,98	0,2	1,96
				$\Sigma=1193$

Tabla 5. Cálculos para obtener el FPF (filtro 1)

El factor de protección que ofrece el filtro 1 viene dado por la siguiente expresión:

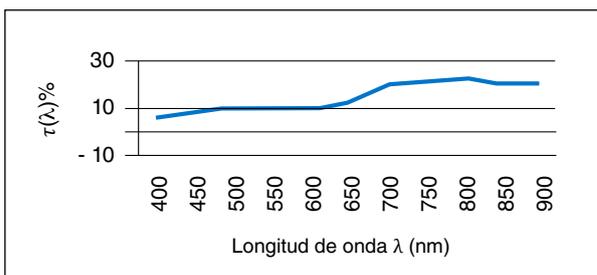
$$FPF_R = \frac{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda)}{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \tau(\lambda)}$$

$$FPF_R = \frac{2755}{1193} = 2$$

Supongamos ahora un filtro 2 con la siguiente transmisión espectral:

Longitud de onda	Filtro 2 ($\tau\%$)
400	6
450	9
500	10
550	10
600	10
650	12
700	19
750	21
800	22
850	20
900	20
950	20
1000	20
1050	20
1100	20

Tabla 6. Transmitancia espectral filtro 2



Gráfica 3. Curva de la transmisión espectral del filtro 2

λ (nm)	E(λ) W/m ² nm	τ(λ) Filtro 2	R(λ)	E(λ)·R(λ)·τ(λ) W/m ²
400	0	0,06	1	0
450	160	0,085	9,4	127,84
500	350	0,1	1	35
550	310	0,1	1	31
600	240	0,1	1	24
650	160	0,12	1	19,2
700	96	0,19	1	18,24
750	60	0,21	0,794	10,0044
800	30	0,22	0,63	4,158
850	20	0,2	0,501	2,004
900	16	0,2	0,398	1,2736
950	10	0,2	0,316	0,632
1000	10	0,2	0,251	0,502
1050	10	0,2	0,2	0,4
1100	10	0,2	0,2	0,4
1150	10	0,2	0,2	0,4
				Σ=275

Tabla 7. Cálculos para obtener el FPF (filtro 2)

El factor de protección que ofrece el filtro 2, viene dado por la siguiente expresión:

$$FPF_R = \frac{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda)}{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \tau(\lambda)}$$

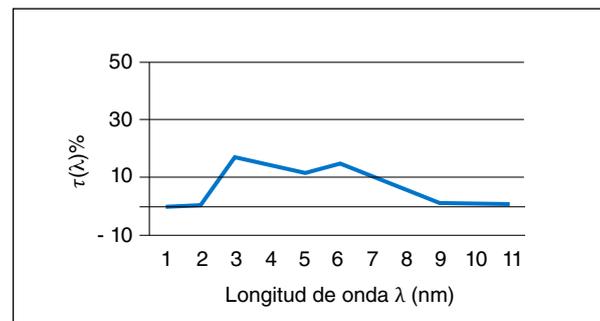
$$FPF_R = \frac{2755}{275} = 10$$

Supongamos un filtro 3 con la siguiente transmisión espectral:

Longitud de onda	Filtro 3 (τ%)
400	0
450	1
500	17
550	14
600	12
650	14
700	10
750	5
800	2
850	2

900	1
950	1
1000	1
1050	1
1100	1

Tabla 8. Transmitancia espectral filtro 3



Gráfica 4. Curva de la transmisión espectral del filtro 3

λ (nm)	E(λ) W/m ² nm	τ(λ) Filtro 3	R(λ)	E(λ)·R(λ)·τ(λ) W/m ²
400	0	0	1	0
450	160	0,01	9,4	15,04
500	350	0,17	1	59,5
550	310	0,14	1	43,4
600	240	0,12	1	28,8
650	160	0,14	1	22,4
700	96	0,10	1	9,6
750	60	0,05	0,794	2,382
800	30	0,02	0,63	0,378
850	20	0,02	0,501	0,2004
900	16	0,01	0,398	0,06368
950	10	0,01	0,316	0,0316
1000	10	0,01	0,251	0,0251
1050	10	0,01	0,2	0,02
1100	10	0,01	0,2	0,02
1150	10	0,01	0,2	0,02
				Σ=182

Tabla 9. Cálculos para obtener el FPF (filtro 3)

El factor de protección que ofrece el filtro 3, viene dado por la siguiente expresión:

$$FPF_R = \frac{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda)}{\sum_{380}^{1400} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \tau(\lambda)}$$

$$FPF_R = \frac{2755}{182} = 15$$

En resumen, se obtienen los siguientes FPF para los filtros estudiados:

FPF _R (filtro 1)	FPF _R (filtro 2)	FPF _R (filtro 3)
2	10	15

Tabla 10. FPF obtenido para cada filtro estudiado

De los filtros estudiados el más idóneo es el filtro 2, ya que tiene un FPF_R igual al I_{riesgo} asociado al riesgo de quemaduras en la retina (VLE-4). El filtro 1 no ofrece una protección suficiente, y con el filtro 3 se estaría so-

breprotegiendo al trabajador, lo cual puede suponer un riesgo si el filtro impide que el trabajador pueda ver la realización de la tarea.

BIBLIOGRAFÍA

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO
FDN 17. Selección de pantallas faciales y gafas de protección.
INSHT. 2009

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO
Guía Técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las radiaciones ópticas artificiales.
INSHT. 2015

ISO 12609-1:2013 Eyewear for protection against intense light sources use don humans and animals for cosmetic and medical applications. Part 1. Specifications for products

ISO 12609-2:2013 Eyewear for protection against intense light sources used on humans and animals for cosmetic and medical applications. Part 2. Guidance for use