

RADIACIONES ÓPTICAS INCOHERENTES

Problemas resueltos



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EMPLEO
Y SEGURIDAD SOCIAL



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO

RADIACIONES ÓPTICAS INCOHERENTES

PROBLEMAS RESUELTOS

Título:

Radiaciones ópticas incoherentes. Problemas resueltos

Autores:

Alfredo Álvarez Valdivia

Cristina Vega Giménez

Centro Nacional de Condiciones de Trabajo (CNCT)

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

Edita:

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Torrelaguna, 73 – 28027 MADRID

Tel. 91 363 41 00, fax 91 363 43 27

www.insht.es

Composición:

Servicio de Ediciones y Publicaciones del INSHT

Edición:

Madrid, septiembre 2014

NIPO: 272-14-076-5

Dep. Legal: M-25357-2014

I.S.B.N.: 978-84-7425-817-2

Hipervínculos:

El INSHT no es responsable ni garantiza la exactitud de la información en los sitios web que no son de su propiedad. Asimismo la inclusión de un hipervínculo no implica aprobación por parte del INSHT del sitio web, del propietario del mismo o de cualquier contenido específico al que aquel redirija.

Catálogo general de publicaciones oficiales

<http://publicacionesoficiales.boe.es>

Catálogo de publicaciones del INSHT

<http://www.insht.es/catalogopublicaciones/>

PRESENTACIÓN

Entre las principales actividades del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) desde su creación, figuran las relacionadas con la formación en el ámbito de la Prevención de Riesgos Laborales. Estas actividades se han visto impulsadas desde la entrada en vigor de la Ley 31/1995 y del Real Decreto 39/1997, donde se regula la formación para el desarrollo de las funciones de Técnico de Prevención. Una de esas actividades es la publicación y actualización de textos con diferentes niveles de profundización, que pretenden servir de ayuda para alumnos, profesores y, en general, profesionales de la Prevención de Riesgos Laborales.

En lo que respecta al área de Higiene Industrial que, como disciplina, presenta ciertas dificultades para su comprensión, el INSHT ya ha publicado, entre otros documentos, el texto “Higiene Industrial” (2005) o los libros “Higiene Industrial. Problemas resueltos” (2006) y “Ruido. Problemas resueltos” (2011), en los que aparecen ejercicios prácticos con su solución calculada, casos que podrían darse en el escenario real del trabajo.

Ahora, con la edición y publicación de este texto de problemas de radiaciones ópticas incoherentes, dirigido también al tipo de público mencionado, se presenta la resolución de numerosos problemas y algunos casos prácticos sobre situaciones de exposición a radiaciones ópticas artificiales en ambientes laborales. Los problemas y casos prácticos abarcan diferentes aspectos sobre la medición, valoración y reducción de las exposiciones y su resolución se plantea bajo la normativa legal vigente, utilizando los criterios técnicos establecidos en la Guía no vinculante sobre buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2006/25/CE (Radiaciones ópticas artificiales) de la Comisión Europea y los criterios de mayor solvencia existentes en el momento de la publicación.

María Dolores Limón Tamés

Directora del INSHT

ÍNDICE

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	7
1. CONCEPTOS BÁSICOS	9
2. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A RADIACIONES ÓPTICAS.....	39
3. CONTROL Y REDUCCIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LAS RADIACIONES ÓPTICAS.....	71
4. CASOS PRÁCTICOS	81
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS:	
ANEXO A.....	115
ANEXO B (ejercicio 1.4).....	116
ANEXO C (ejercicio 1.8).....	117
ANEXO D (ejercicio 1.12)	118
ANEXO E (ángulos mínimos).....	120
APÉNDICES:	
GLOSARIO DE TÉRMINOS	123
FORMULARIO.....	127

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

α	Ángulo plano.
A_{λ}	Absorbancia espectral.
A_S	Área proyectada.
A^{\perp}	Área aparente.
ADN	Ácido desoxirribonucleico.
Cd	Candela. Unidad de intensidad luminosa.
C_0	Constante universal. Velocidad de la luz en el vacío. $C_0 = 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
dB	Decibelio.
E_e	Irradiancia.
E_{eff}	Irradiancia efectiva.
$E_{e\lambda}$	Irradiancia espectral.
E_{UVA}	Irradiancia total (UVA).
EN	Norma Europea.
Φ_e	Flujo radiante.
h	Constante de Planck. $h = 6,626\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$
H	Exposición radiante.
H_{eff}	Exposición radiante efectiva.
H_{UVA}	Exposición radiante (UVA).
Hz	Hercio. Unidad de frecuencia.
I_e	Intensidad radiante.
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IRPA	International Radiation Protection Association
IR	Radiación infrarroja.
IRA	Radiación infrarroja A.
IRB	Radiación infrarroja B.
IRC	Radiación infrarroja C.
J	Julio. Unidad de energía.
λ	Longitud de onda.
L_e	Radiancia.
L_{λ}	Radiancia espectral.
Lm	Lumen. Unidad de flujo luminoso.

Lx	Lux. Unidad de iluminancia.
LED	Diodo emisor de luz (del inglés: Light-Emitting Diode).
ω	Ángulo sólido.
Rad	Radián.
SI	Sistema internacional de unidades.
S(λ)	Ponderación espectral que tiene en cuenta la relación entre la longitud de onda y los efectos para la salud de la radiación UV sobre los ojos y la piel.
sr	Estereorradián.
T	Transmitancia
ua	Unidad astronómica. La unidad astronómica es aproximadamente igual a la distancia media entre el Sol y la Tierra. Es el radio de una órbita newtoniana circular no perturbada alrededor del Sol, de una partícula de masa infinitesimal, desplazándose a una velocidad media de 0,01720209895 radianes por día (llamada también constante de Gauss).
UNE	Norma Española.
UV	Radiación ultravioleta.
UVA	Radiación ultravioleta A.
UVB	Radiación ultravioleta B.
UVC	Radiación ultravioleta C.
W	Vatio. Unidad de potencia, Flujo energético.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 Toda radiación electromagnética puede caracterizarse físicamente a través de la longitud de onda, la frecuencia y la energía. ¿Cuál es el valor de estas magnitudes tanto para las bandas principales como para las subdivisiones más importantes de las radiaciones ópticas?

SOLUCIÓN

Las radiaciones ópticas se dividen en: radiación ultravioleta (UVA, UVB, UVC), radiación visible y radiación infrarroja (IRA, IRB, IRC). La frecuencia « ν » de un movimiento ondulatorio se relaciona con la longitud de onda « λ » a través de la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{c_0}{\lambda}$$

siendo « c_0 » la constante universal que representa la velocidad de la luz en el vacío y que toma el valor de $c_0 = 299.792.458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

La energía del fotón de una onda electromagnética viene dada por la ecuación de Planck–Einstein:

$$E = h\nu = h \frac{c_0}{\lambda}$$

siendo « h » la constante de Planck que en el sistema internacional de unidades tiene el valor aproximado de $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Aplicando las fórmulas anteriores se pueden obtener los resultados pedidos en el enunciado del ejercicio (ver tabla 1).

Se puede observar que la longitud de onda y la frecuencia guardan una relación inversamente proporcional, de forma que a mayor longitud de onda menor es la frecuencia y viceversa. Por el contrario, la relación entre la frecuencia y la energía es directamente proporcional de forma que las radiaciones más energéticas son aquellas que tienen una mayor frecuencia.

NOTA

A través de este ejercicio se pretende conseguir la familiarización con las unidades básicas que definen las radiaciones ópticas así como la relación entre longitud de onda y frecuencia. Se observa que en las radiaciones ópticas, la banda del ultravioleta es la más energética mientras que la del infrarrojo es la que menos energía asociada tiene. A pesar de ello, no existe una relación directa entre la energía de las radiaciones ópticas y el posible daño para la salud que estas puedan causar.

Tabla 1

			λ	ν	E
RADIACIONES ÓPTICAS	Radiación infrarroja	IRC	1 mm	300 GHz	$200 \cdot 10^{-24}$ J
		IRB	3.000 mm	100 THz	$662 \cdot 10^{-22}$ J
		IRA	1.400 nm	214 THz	$142 \cdot 10^{-21}$ J
	Radiación visible		780 nm	384 THz	$255 \cdot 10^{-21}$ J
			380 nm	789 THz	$497 \cdot 10^{-21}$ J
			400 nm	749 THz	$523 \cdot 10^{-21}$ J
	Radiación ultravioleta	UVA			
			315 nm	952 THz	$631 \cdot 10^{-21}$ J
		UVB			
			280 nm	1,07 PHz	$709 \cdot 10^{-21}$ J
		UVC			
			100 nm	3 PHz	$20 \cdot 10^{-19}$ J

1.2 Incluso teniendo en cuenta que la distancia entre la tierra y el sol toma valores comprendidos entre 0,98 ua y 1,02 ua (la órbita terrestre es ligeramente elíptica con unos semiejes que son prácticamente iguales), la distancia promedio entre ambos cuerpos celestes es de 1 ua. La unidad astronómica «ua» es la unidad de distancia que se corresponde a la distancia media entre la tierra y el sol. Dicho valor se determina experimentalmente y, de acuerdo con el sistema internacional de unidades, es igual a $1,49597870691 \cdot 10^{11}$ m.

Suponiendo que la velocidad de la luz es igual a la velocidad de esta en el vacío $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ¿cuánto tiempo, en promedio, tarda la luz solar en llegar a la tierra?

SOLUCIÓN

La velocidad instantánea «v» es igual a la derivada del vector posición respecto del tiempo:

$$v = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

Como la velocidad de la luz en el vacío « c_0 » es constante y en el supuesto del enunciado se puede considerar su trayectoria como rectilínea, es posible hacer la siguiente simplificación partiendo de la expresión anterior:

$$v = c_0 = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Finalmente, sólo queda despejar la variable tiempo y sustituir el resto de variables con los valores dados en el enunciado:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{c_0} = \frac{1,49597870691 \cdot 10^{11} \text{ m}}{2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \cong 499 \text{ s} \cong 8,3 \text{ min} \cong 8 \text{ min } 19 \text{ s}$$

Es decir, cuando se observa el sol no es posible conocer su estado actual sino que, en realidad, sólo se conoce el estado de hace 8 minutos.

NOTA

En el ámbito laboral la distancia entre la fuente y el trabajador es tan pequeña que se puede suponer que la luz viaja instantáneamente. Es decir: la exposición a una fuente tiene lugar tan pronto como esta empieza a emitir.

1.3 Mediante una pequeña lámpara de haluro metálico se puede conseguir una aproximación aceptable a una fuente de radiación puntual isótropa, cuya intensidad radiante es independiente de la dirección.

Se dispone de un radiómetro provisto de un gran sensor circular de radio igual a 25 milímetros que carece de escala de intensidad radiante. Si se sitúa dicho radiómetro a una distancia de 2 metros de la fuente y se obtiene una lectura igual a 0,1 vatios, ¿cuál es el valor de la intensidad radiante?

SOLUCIÓN

Formalmente se define la intensidad radiante « I_e » como el flujo radiante « Φ_e » por unidad de ángulo sólido « ω »:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$$

Como el tamaño de la fuente es muy pequeño en relación con la distancia en la que se encuentra situado el radiómetro y suponiendo que la potencia emitida por la misma apenas varía a lo largo del tiempo, se puede hacer la siguiente aproximación:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \cong \frac{\Phi_e}{\omega}$$

El valor del flujo radiante « Φ_e » viene determinado por la lectura dada por el radiómetro. Por lo tanto, queda calcular el valor del ángulo sólido « ω ». El ángulo sólido es el ángulo que desde un punto subtiende un objeto en el espacio tridimensional. Se calcula proyectando el objeto sobre una esfera y dividiendo dicha área proyectada « A_s » por el cuadrado de la distancia. En este caso, el objeto es el sensor radiométrico. Como las dimensiones de dicho sensor son muy pequeñas

en comparación con la distancia a la que está situado, es posible asimilar la superficie esférica a la superficie del mismo, de forma que:

$$\omega = \frac{\text{área esférica proyectada}}{(\text{distancia})^2} \cong \frac{\text{área plana del sensor}}{(\text{distancia})^2}$$

Sustituyendo en la expresión de la intensidad radiante se obtiene que:

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_e = 0,1 \text{ W} \\ \text{Área} = \pi(25 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2 \\ \text{Distancia} = 2 \text{ m} \end{array} \right\} I_e \cong \frac{\Phi_e}{\omega} = \frac{0,1 \text{ W}}{\frac{\pi(25 \cdot 10^{-3})^2 \text{ m}^2}{2^2 \text{ m}^2}} \cong \frac{0,1 \text{ W}}{4,9087 \cdot 10^{-4} \text{ sr}^{-1}} \cong 204 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$$

La aproximación para el cálculo del ángulo sólido sólo es válida cuando la superficie del sensor es muy pequeña en relación con la distancia a la fuente luminosa, es decir, cuando la relación entre el área plana y la distancia al cuadrado toma valores pequeños. En este caso, ¿es $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$ un valor pequeño? Para ello se puede comparar los datos de la tabla 2.

Tabla 2

Orden de magnitud	Nombre	Símbolo	Corresponde aproximadamente a... (en relación con el globo terráqueo)
10^1	decaestereorradián	dasr	Algo más de la superficie de agua
10^0	estereorradián	sr	El área de Asia
10^{-1}	deciestereorradián	dsr	El área de Argentina y Perú
10^{-2}	centiestereorradián	csr	El área de Colombia
10^{-3}	miliestereorradián	msr	El área de Suiza
10^{-6}	microestereorradián	μsr	El área de Santa Mónica, California
10^{-9}	nanoestereorradián	nsr	La superficie de 8 campos de fútbol americano
10^{-12}	picoestereorradián	psr	El área de un piso pequeño
10^{-15}	femtoestereorradián	fsr	El área de una hoja A5
10^{-18}	attoestereorradián	asr	La superficie de un cuadrado de 6 mm de lado
10^{-21}	zeptoestereorradián	zsr	La sección de un alambre calibre 32
10^{-24}	yoctoestereorradián	ysr	La superficie de un glóbulo rojo

A la vista de estos datos, el valor más próximo a $4,9 \cdot 10^{-4}$ sr es el correspondiente a la superficie de Suiza. Parece aceptable que puede considerarse esta superficie como plana en relación con la esfera terrestre y, por lo tanto, la suposición hecha para el cálculo del ángulo sólido del sensor radiométrico respecto de la fuente luminosa puede considerarse aceptable.

NOTA

La intensidad luminosa hace referencia a la intensidad o “fuerza” de la luz en una determinada dirección. Tanto la intensidad radiante « I_e » como el flujo radiante « Φ_e » son propiedades de la fuente de luz. Es decir: todas las fuentes tienen un determinado flujo luminoso y una intensidad luminosa.

1.4 Obtener el valor de la intensidad radiante con los mismos datos del ejercicio 1.3 pero sin realizar ninguna simplificación en el cálculo del ángulo sólido. Con el nuevo resultado obtenido, ¿cuál es el error relativo cometido en el ejercicio 1.3?

SOLUCIÓN

Para calcular el ángulo sólido sin la aproximación realizada en el ejercicio anterior, es necesario obtener una expresión para la superficie proyectada « A_s » sobre una esfera en función del radio del sensor y la distancia a la fuente de iluminación. El área de un casquete esférico viene dado por:

$$A_s = \pi(a^2 + h^2)$$

siendo « h » la altura del casquete y « a » el diámetro (figura 1.1).

La superficie del sensor proyectada sobre una esfera imaginaria generará una superficie correspondiente a la de un casquete esférico. La figura 1.2 muestra una sección transversal del sensor de radio « r » en relación con la fuente luminosa « f »

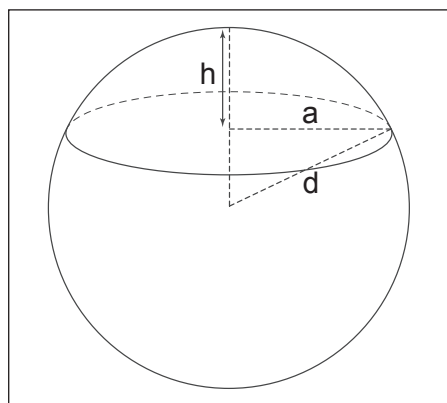


Figura 1.1. Altura « h » y diámetro « a » de un casquete esférico.

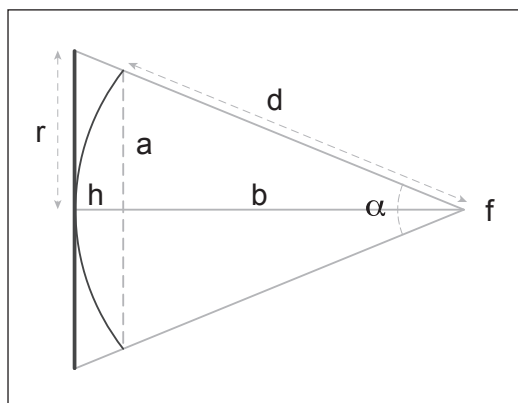


Figura 1.2. Sección transversal del sensor, la fuente y la esfera imaginaria asociada.

separados por una distancia «d» y la correspondiente proyección sobre la superficie de la esfera imaginaria.

Sea «α» el ángulo que subtiende la superficie del sensor en relación con la fuente «f». El área proyectada (el casquete esférico) debe subtender el mismo ángulo en relación con «f» por lo que se cumple que:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{r}{d} = \frac{a}{b} \rightarrow a = b \frac{r}{d}$$

Así mismo, aplicando el teorema de Pitágoras es posible establecer la siguiente relación:

$$d^2 = a^2 + b^2$$

Partiendo de los dos resultados anteriores es posible expresar el valor de «b» en función de las variables conocidas «r» y «d»:

$$\left. \begin{array}{l} d^2 = a^2 + b^2 \\ a = b \frac{r}{d} \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} d^2 = a^2 + b^2 \\ a^2 = b^2 \left(\frac{r}{d} \right)^2 \end{array} \right\} \rightarrow d^2 = b^2 \left(\frac{r}{d} \right)^2 + b^2 = b^2 \left(1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right)$$

$$b^2 = d^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}$$

Una vez conocido «b», el valor de «a» se obtiene sustituyendo «b» en la primera relación hallada:

$$a = b \frac{r}{d} \rightarrow a^2 = b^2 \left(\frac{r}{d} \right)^2 \rightarrow a^2 = d^2 \frac{\left(\frac{r}{d} \right)^2}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} = \frac{r^2}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}$$

Con estos datos, y teniendo en cuenta que «h» (la altura del casquete) es $h = d - b$, es posible calcular la superficie del mismo:

$$A_s = \pi(a^2 + h^2) = \pi(a^2 + (d - b)^2) = \pi \left(a^2 + \left(d - d \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}} \right)^2 \right) =$$

$$\begin{aligned}
&= \pi \left(a^2 + d^2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}} \right)^2 \right) = \pi \left(a^2 + d^2 \left(\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2}} \right)^2 \right) = \\
&= \pi \left(a^2 + \frac{d^2}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} - 1 \right)^2 \right) = \pi \left(\frac{r^2}{\left(1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2 \right)} + \frac{d^2}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} - 1 \right)^2 \right) \\
A_s &= \frac{\pi}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} \left(r^2 + d^2 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} - 1 \right)^2 \right)
\end{aligned}$$

En la expresión anterior se observa que cuanto menor sea el tamaño del sensor en relación con la distancia a la fuente, entonces el cociente «r/d» tiende a 0 y el área proyectada tiende a $A_s = \pi r^2$ que no es sino el área plana del propio sensor tal y como se ha mostrado en el ejercicio 1.3.

$$\begin{aligned}
\lim_{\frac{r}{d} \rightarrow 0} A_s &= \lim_{\frac{r}{d} \rightarrow 0} \left[\frac{\pi}{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} \left(r^2 + d^2 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d} \right)^2} - 1 \right)^2 \right) \right] = \\
\frac{\pi}{1 + 0^2} \left(r^2 + d^2 \left(\sqrt{1 + 0^2} - 1 \right)^2 \right) &= \frac{\pi}{1} \left(r^2 + d^2 \left(\sqrt{1} - 1 \right)^2 \right) = \pi \left(r^2 + d^2 (1 - 1)^2 \right) = \pi \left(r^2 + d^2 (0)^2 \right) = \\
&= \pi \left(r^2 \right) = \pi r^2 = \text{área plana del sensor}
\end{aligned}$$

Sustituyendo los valores del diámetro del sensor y la distancia a la fuente de iluminación, se obtiene el siguiente valor del área proyectada sobre la esfera:

$$\begin{aligned}
&\left. \begin{array}{l} r = 25 \cdot 10^{-3} \text{ m} \\ d = 2 \text{ m} \end{array} \right\} \rightarrow A_s = 0,00196327 \text{ m}^2 \\
\omega &= \frac{A_s}{d^2} \cong \frac{0,00196327}{2^2} \cong 4,9082 \cdot 10^{-4} \text{ sr}
\end{aligned}$$

De esta forma, la intensidad radiante toma el valor de:

$$I_e \cong \frac{\Phi_e}{\omega} = \frac{0,1 \text{ W}}{4,9082 \cdot 10^{-4}} \cong 203,7422 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El valor de la intensidad radiante del ejercicio anterior con 4 decimales es de $203,7183 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$. El error relativo cometido por la aproximación en el cálculo del ángulo sólido puede estimarse de la siguiente forma:

$$\text{error} = 100 \frac{203,7422 - 203,7183}{203,7422} \cong 0,012\%$$

Si la distancia a la fuente hubiese sido de 0,25 metros, es decir, una relación « r/d » de 0,1, entonces el error relativo sería de 0,74 %.

NOTA

El error cometido al aproximar la proyección esférica del área plana del sensor a un área plana depende de la relación « r/d » y de la distancia « d » del sensor a la fuente. Normalmente, si dicha relación es $r/d \leq 0,1$ y si el radio del sensor es pequeño, entonces el error cometido por dicha aproximación puede considerarse despreciable por ser inferior al 1% tal y como se muestra en el gráfico del anexo B.

Así mismo, cuando el ángulo plano « α » es pequeño (si $r/d \leq 0,1$ los errores cometidos son muy pequeños) la relación entre el ángulo sólido « ω » y el plano « α » viene dada por:

$$\left. \begin{array}{l} \omega \cong \frac{A_s}{d^2} = \frac{\pi r^2}{d^2} \\ \alpha \cong \frac{2r}{d} \end{array} \right\} \omega \cong \frac{\pi}{4} \alpha^2$$

Esta relación es la que propone la norma UNE-EN 62471:2008 para el cálculo de la radiancia « L_e » a partir de la irradiancia « E_e ». A pesar de esto, y con el fin de evitar errores de cálculo, es preferible hacer uso de la expresión $\omega = A_s/d^2$ para estimar el ángulo sólido. Sólo cuando el foco de radiación es circular se recomienda la aproximación propuesta por la norma, como es el caso de los ángulos sólidos del anexo E.

1.5 Relacionar la intensidad radiante con la irradiancia partiendo de una fuente puntual que ilumina un punto en una superficie con un ángulo de inclinación de $\theta = \pi/3$ radianes tal y como se muestra en la figura 1.3. La distancia desde la fuente luminosa hasta la superficie « r » es de 2 metros. Con un radiómetro se ha medido la irradiancia en la superficie obteniéndose un valor de $E_e = 20 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. Calcular el valor de la intensidad radiante que se obtendría medido en la superficie.

SOLUCIÓN

La zona iluminada es un punto situado en una superficie. El enunciado establece que la fuente de radiación es puntual y que sólo sufre una pequeña dispersión, por

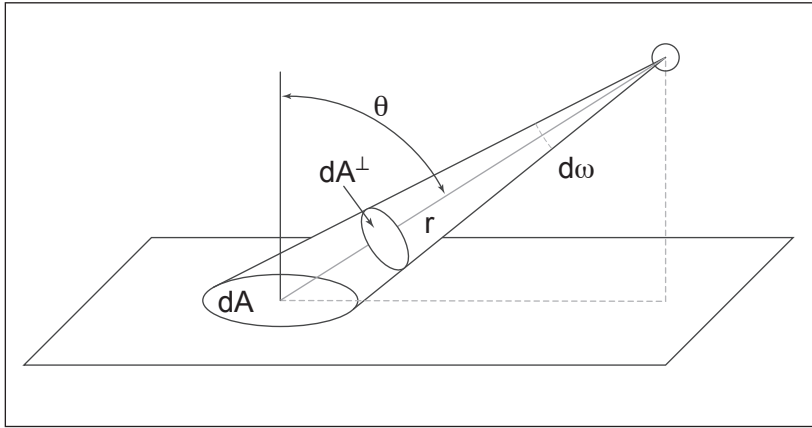


Figura 1.3. Esquema propuesto.

lo que se puede tratar la zona iluminada como un diferencial de superficie « dA ». Como la fuente no está en el cenit de la zona iluminada « dA » sino que existe un ángulo « θ », el área aparente « dA^\perp » vista desde la fuente es la proyección normal a la dirección de incidencia de la fuente y viene dada por:

$$\cos \theta = \frac{dA^\perp}{dA} \rightarrow dA^\perp = dA \cos \theta$$

Este ángulo « θ » es el ángulo entre la normal de la fuente y la línea de visión tal y como se define en la norma UNE-EN 14255-2:2005.

Como la fuente puntual sufre una pequeña dispersión espacial, entonces es razonable suponer que « $d \gg dA^\perp$ » y por lo tanto es correcto aproximar « dA_s » a « dA^\perp » en el cálculo del ángulo sólido, tal y como se ha mostrado en el ejercicio 1.4.

$$d\omega = \frac{dA_s}{r^2} \cong \frac{dA^\perp}{r^2} = \frac{dA \cos \theta}{r^2}$$

Finalmente se calcula la intensidad radiante (definida en el ejercicio 1.3) y se sustituye el valor del ángulo sólido por la aproximación realizada:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} = \frac{d\Phi_e r^2}{dA \cos \theta}$$

El término « $d\Phi_e/dA$ » es el flujo a través de la superficie « dA » que corresponde a la irradiancia « E_e » medida en dicha superficie. De esta manera la expresión anterior toma la forma más genérica de la ley inversa de los cuadrados:

$$I_e = E_e \frac{r^2}{\cos \theta}$$

Para hallar el valor de la intensidad radiante sólo hace falta sustituir los valores dados en el enunciado:

$$I_e = E_e \frac{r^2}{\cos \theta} = 20 \frac{2}{\cos \frac{\pi}{3}} = 80 \text{ mW} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Se observa que cuando $\theta = 0$ la superficie «dA» es normal a la dirección de incidencia del flujo (es decir $dA = dA^\perp$) y la relación entre la intensidad radiante « I_e » e irradiancia « E_e » adopta la forma más conocida de la ley inversa de los cuadrados:

$$I_e = E_e r^2 \rightarrow E_e = \frac{I_e}{r^2}$$

NOTA

Mientras que la intensidad radiante « I_e » y el flujo radiante « Φ_e » son propiedades de la fuente y, por lo tanto, no pueden modificarse a no ser que se modifique la propia fuente, la irradiancia « E_e » es un valor que depende de la distancia a la misma.

Es decir, el valor de irradiancia depende de la distancia del trabajador con la fuente y será tanto menor cuanto mayor sea la distancia entre ambos. En el ejercicio 3.5 se muestra la utilidad de la ley inversa de los cuadrados para la protección del trabajador.

1.6 De una fuente luminosa puntual e isótropa se emite radiación únicamente en el espectro visible. Con un radiómetro se mide la irradiancia ponderada a 2 metros de distancia, obteniéndose un valor de « E_e » igual a $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Calcular el valor de la irradiancia si se hubiese medido a 4 metros de distancia. En ambos casos la irradiancia se supone medida en la dirección normal al flujo.

SOLUCIÓN

De acuerdo con ley de la inversa de los cuadrados es posible escribir:

$$I_e = E_e \frac{r^2}{\cos \theta} \rightarrow E_e = \frac{I_e \cos \theta}{r^2}$$

Aplicando la expresión anterior a los dos puntos de medición se obtiene:

$$I_e = E_{e, \text{inicial}} \frac{r_{\text{inicial}}^2}{\cos \theta_{\text{inicial}}}$$

$$I_e = E_{e, \text{final}} \frac{r_{\text{final}}^2}{\cos \theta_{\text{final}}}$$

Se observa que la intensidad radiante es una propiedad de la fuente radiante cuyo valor no depende del punto de medición. En cambio, la irradiancia toma valores diferentes en función del punto de medición. Es decir: la primera es una variable intensiva mientras que la segunda es una variable extensiva.

$$1 = \frac{E_{e, \text{inicial}}}{E_{e, \text{final}}} \frac{r_{\text{inicial}}^2}{r_{\text{final}}^2} \frac{\cos \theta_{\text{final}}}{\cos \theta_{\text{inicial}}}$$

$$E_{e, \text{final}} = E_{e, \text{inicial}} \frac{r_{\text{inicial}}^2}{r_{\text{final}}^2} \frac{\cos \theta_{\text{final}}}{\cos \theta_{\text{inicial}}} = E_{e, \text{inicial}} \left(\frac{r_{\text{inicial}}}{r_{\text{final}}} \right)^2 \frac{\cos \theta_{\text{final}}}{\cos \theta_{\text{inicial}}}$$

Para obtener el resultado final sólo basta con sustituir los valores dados en el enunciado teniendo en cuenta que la irradiancia se ha medido en la dirección normal al flujo y, por lo tanto, $\theta_{\text{inicial}} = \theta_{\text{final}} = 0 \text{ rad}$:

$$E_{e, \text{final}} = E_{e, \text{inicial}} \frac{r_{\text{inicial}}^2}{r_{\text{final}}^2} \frac{\cos \theta_{\text{final}}}{\cos \theta_{\text{inicial}}} = 0,1 \frac{2^2}{4^2} = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\theta_{\text{inicial}} = \theta_{\text{final}} = 0 \text{ rad} \rightarrow \cos \theta_{\text{inicial}} = \cos \theta_{\text{final}} = 1$$

NOTA

Siempre que una fuente pueda considerarse isótropa y puntual, es posible hacer uso de la ley inversa de los cuadrados para estimar la irradiancia en cualquier punto de su entorno.

1.7 En una planta industrial existe una fuente puntual isótropa cuya irradiancia en una determinada dirección es de $E_e = 15 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Calcular el valor de la radiancia en la pupila del ojo cuando se observa la fuente en dicha dirección y a una distancia de 3 metros.

SOLUCIÓN

La radiancia « L_e » en un punto se define como el flujo radiante a través o que emite una superficie por unidad de ángulo sólido. Es decir:

$$L_e = \frac{d^2 \Phi_e}{d\vec{A} d\vec{\omega}} = \frac{d^2 \Phi_e}{dA d\omega \cos \theta}$$

donde « θ » es el ángulo formado por los vectores « $d\vec{A}$ » y « $d\vec{\omega}$ ».

La radiancia puede expresarse en función de la irradiancia desarrollando la ex-

presión anterior y teniendo en cuenta la definición de irradiancia vista en el ejercicio 1.5:

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA d\omega \cos\theta} = \frac{1}{\cos\theta} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{d\Phi_e}{dA} \right) = \frac{1}{\cos\theta} \frac{d}{d\omega} (E_e) = \frac{1}{\cos\theta} \frac{dE_e}{d\omega}$$

$$dE_e = L_e \cos\theta d\omega$$

$$E_e = \int_{\omega} L_e \cos\theta d\omega$$

Si bien la expresión anterior muestra la relación formal entre radiancia e irradiancia, en la mayor parte de las situaciones es posible hacer aproximaciones que simplifiquen el cálculo. Cuando el ángulo sólido « ω » es muy pequeño y la radiancia no varía a lo largo de « ω » entonces es posible tratar ambas variables como constantes en la integral de forma que:

$$E_e = \int_{\omega} L_e \cos\theta d\omega \quad \xrightarrow{L_e, \cos\theta \text{ son ctes}} \quad E_e \cong L_e \cos\theta \omega$$

Para calcular el valor del ángulo sólido, puede considerarse que el diámetro de la pupila ocular varía entre los 2 y los 8 mm de diámetro. En un trabajador de 25 años, el diámetro promedio durante el día es de 4,5 mm aproximadamente. Con este dato y teniendo en cuenta la aproximación del ejercicio 1.3 para el ángulo sólido, es posible estimar el valor del ángulo sólido de la siguiente forma:

$$\omega \cong \frac{\pi \left(\frac{4,5}{2} \cdot 10^{-3} \right)^2}{3^2} = 1,76715 \cdot 10^{-6} \text{ sr}$$

Como el ojo es perpendicular a la dirección de proyección entonces $\theta = 0$ y el valor de radiancia viene dado por:

$$L_e = \frac{E_e}{\omega} = \frac{15 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}{1,76715 \cdot 10^{-6} \text{ sr}} \cong 8,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

NOTA

Cuando la fuente de radiación es puntual e isotrópica, la relación entre radiancia e irradiancia puede aproximarse a:

$$E_e \cong L_e \cos\theta \omega$$

Dadas estas condiciones, la radiancia « L_e » es invariante respecto de la fuente.

1.8 Imaginar una fuente luminosa cuya altura « h_f » es de 10 centímetros y que está situada a una distancia « d » de 4 metros. Calcular el ángulo subtendido « α » así como el tamaño « h_i » de la imagen formada en la retina. Puede considerarse el ojo como una esfera perfecta cuyo diámetro es de 17 mm.

SOLUCIÓN

En la figura 1.4 se muestra el valor del ángulo subtendido « α » y el tamaño « h_r » a calcular.

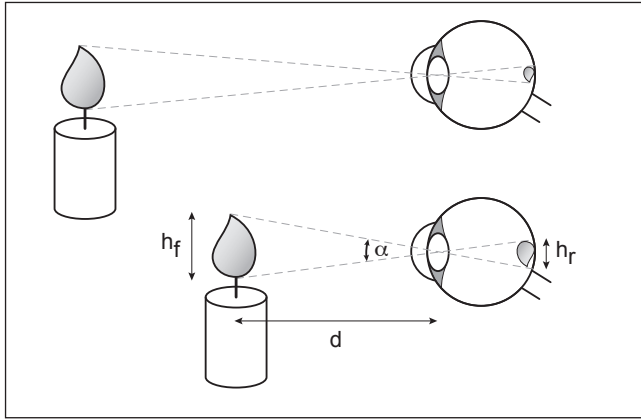


Figura 1.4. Ángulo subtendido « α » y tamaño de la imagen retiniana « h_r ».

El cálculo formal del ángulo subtendido « α » se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{h_f}{2d} \quad \xrightarrow{\text{para valores pequeños}} \quad \tan \alpha \approx \alpha \approx \frac{h_f}{d}$$

Sustituyendo los valores del enunciado en la expresión anterior se obtiene que:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{h_f}{2d} = 0,00125 \rightarrow \frac{\alpha}{2} = 0,001249999 \text{ rad} \rightarrow \alpha \approx 0,0025 \text{ rad} = 8,59'$$

El tamaño « h_r » se calcula con la expresión $h_r \approx d\alpha$ siendo « α » el valor del ángulo subtendido en radianes. Sustituyendo los valores se obtiene:

$$h_r \approx d\alpha = 170,0025 = 0,0425 \text{ mm}$$

Normalmente los valores de « α » son muy pequeños y es posible simplificar el cálculo mediante la siguiente aproximación:

$$\tan \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2} = \frac{h_f}{2d} \rightarrow \alpha \approx \frac{h_f}{d}$$

$$\alpha \approx \frac{h_f}{d} = \frac{0,01}{4} = 0,0025 \text{ rad}$$

Esta aproximación es válida siempre que la fuente de radiación sea pequeña en relación con la distancia de visualización (de forma análoga al ejercicio 1.4). El error relativo cometido por esta aproximación de la función tangente es inferior al 1% para valores de « α » inferiores a 0,173 radianes ($\approx 9,9^\circ$) tal y como se muestra en el anexo C.

NOTA

¿Cuán grande se ve un objeto que tiene un tamaño angular de $8,6'$? Una referencia básica en cuanto al tamaño angular es el tamaño del sol y la luna. Durante un eclipse solar, la luna cubre totalmente el disco solar. Esto quiere decir que el ángulo subtendido por ambos astros, a pesar de que sus distancias respecto de la Tierra son completamente diferentes, es prácticamente el mismo. Aunque el ángulo varía en función de las órbitas, un tamaño angular medio aproximado para un observador situado en la superficie terrestre sería de $32'$ y de $31'$ para la luna y el sol, respectivamente.

Para los humanos, se considera como normal una visión 20/20. Dicha visión corresponde a una agudeza aproximada de $5'$. Se estima que los halcones pueden llegar a tener una visión 20/2, que corresponde a una agudeza de $0,5'$.

1.9 En un espacio al aire libre se encuentran ubicadas dos fuentes isótropas, « f_1 » y « f_2 » (figura 1.5). Se dispone de un radiómetro con el que se mide la irradiancia espectral « $E_{e\lambda}$ » de cada una de ellas. El medidor se sitúa a una distancia de un metro de cada una de ellas y el sensor se coloca en posición perpendicular al flujo radiante. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 1.6 y en la tabla 3.

¿En cuál de los puntos « f_1 », « f_2 » y « f_3 » el valor de la irradiancia toma un valor intermedio?

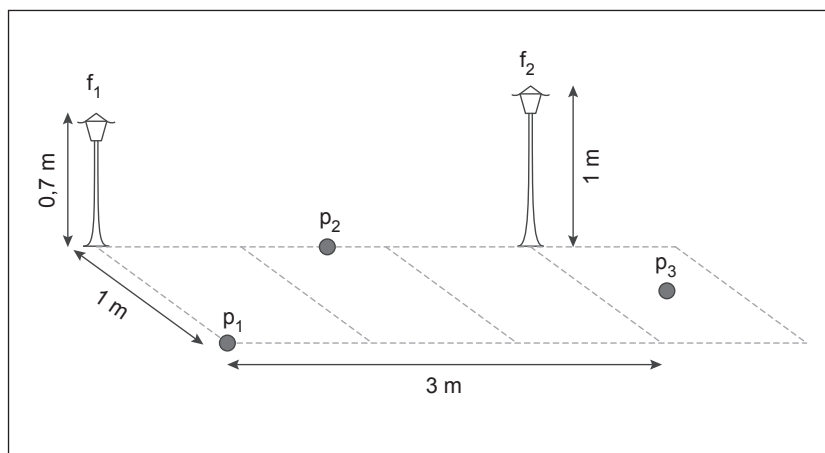


Figura 1.5. Esquema de las fuentes y los puntos « p_1 », « p_2 » y « p_3 »

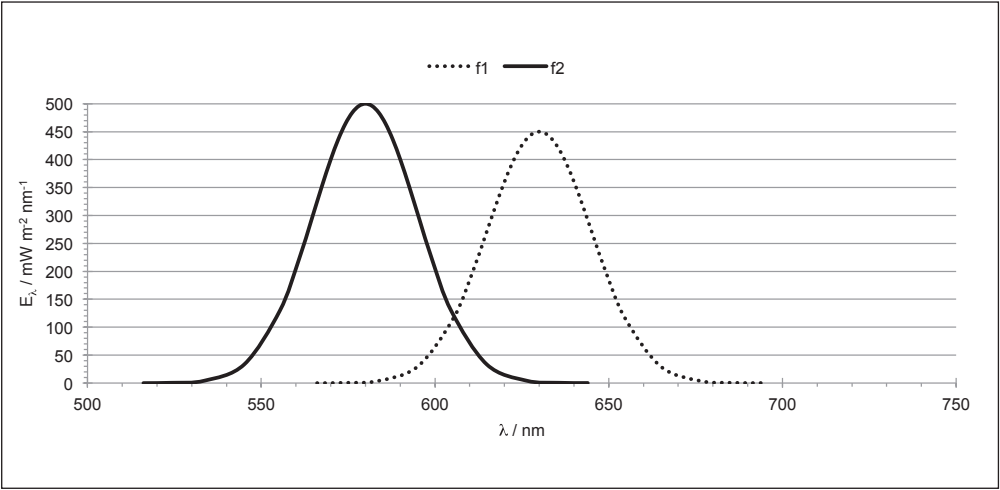


Figura 1.6. Irradiancia espectral de las fuentes «f₁» y «f₂» a 1 metro de distancia.

Tabla 3. Irradiancia espectral de las fuentes «f₁» y «f₂»

Fuente (f ₁)		Fuente (f ₂)	
λ nm	$E_{e\lambda}$ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	λ nm	$E_{e\lambda}$ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$
560	$8,399 \cdot 10^{-3}$	510	$9,332 \cdot 10^{-3}$
570	$1,510 \cdot 10^{-1}$	520	$1,677 \cdot 10^{-1}$
580	1,740	530	1,933
590	12,85	540	14,28
600	60,90	550	67,67
610	185,0	560	205,6
620	360,3	570	400,4
630	450,0	580	500,0
640	360,3	590	400,4
650	185,0	600	205,6
660	60,90	610	67,67
670	12,85	620	14,28
680	1,740	630	1,933
690	$1,510 \cdot 10^{-1}$	640	$1,677 \cdot 10^{-1}$
700	$8,399 \cdot 10^{-3}$	650	$9,332 \cdot 10^{-3}$

SOLUCIÓN

Cada uno de los tres puntos « f_1 », « f_2 » y « f_3 » recibe radiación procedente de las dos fuentes « f_1 » y « f_2 ». De forma genérica, la irradiancia en el punto « i » sometido al flujo de « f_n » fuentes se calcula aplicando el principio de superposición y la ley inversa de los cuadrados (ejercicio 1.5 y ejercicio 1.6) mediante la siguiente expresión:

$$(E_{e\lambda})_{p_i} = \sum_{f_n} E_{e\lambda, f_n} \left(\frac{r_{\text{medición}, f_n}}{r_{p_i} - f_n} \right)^2 \frac{\cos \theta_{\text{final}, f_n}}{\cos \theta_{\text{inicial}, f_n}}$$

siendo « $E_{e\lambda, f_n}$ » la irradiancia espectral procedente de la fuente « f_n » medida originalmente a una distancia « $r_{\text{medición}, f_n}$ ».

Como las mediciones de la irradiancia de las dos fuentes se han realizado a la misma distancia de 1 metro y en la dirección normal al flujo, entonces « $r_{\text{medición}, f1} = r_{\text{medición}, f2} = 1$ metro» y « $\theta_{\text{inicial}, f_n} = 0$ rad». De esta forma y para este ejemplo, la expresión anterior queda reducida a:

$$(E_{e\lambda})_{p_i} = \sum_{f_n} E_{e\lambda, f_n} \frac{1}{(r_{p_i} - f_n)^2} \frac{\cos \theta_{\text{final}, f_n}}{1} = \sum_{f_n} E_{e\lambda, f_n} \frac{\cos \theta_{\text{final}, p_i - f_n}}{(r_{p_i} - f_n)^2}$$

Las distancias a las fuentes « $r_{p_i - f_n}$ » de cada punto se calculan aplicando el teorema de Pitágoras. Así, para el punto « f_1 » se tiene que las distancias y los ángulos en relación con las fuentes son:

$$r_{p_1 - f_1} = \sqrt{1^2 + 0,7^2}$$

$$r_{p_1 - f_2} = \sqrt{(3^2 + 1^2) + 1^2}$$

$$\cos \theta_{\text{final}, p_1 - f_1} = \frac{0,7}{r_{p_1 - f_1}} = \frac{0,7}{\sqrt{1^2 + 0,7^2}}$$

$$\cos \theta_{\text{final}, p_1 - f_2} = \frac{1}{r_{p_1 - f_2}} = \frac{1}{\sqrt{(3^2 + 1^2) + 1^2}}$$

El punto « f_2 » está situado entre las dos fuentes pero la distancia a las mismas no es igual porque cada fuente está situada a una altura diferente.

$$r_{p_2 - f_1} = \sqrt{1,5^2 + 0,7^2}$$

$$r_{p_2 - f_2} = \sqrt{1,5^2 + 1^2}$$

$$\cos \theta_{\text{final}, p_2 - f_1} = \frac{0,7}{r_{p_2 - f_1}} = \frac{0,7}{\sqrt{1,5^2 + 0,7^2}}$$

$$\cos \theta_{\text{final}, p_2 - f_2} = \frac{1}{r_{p_2 - f_2}} = \frac{1}{\sqrt{1,5^2 + 1^2}}$$

Finalmente, en el caso del punto «f₃» se obtienen las siguientes distancias:

$$r_{p_3 - f_1} = \sqrt{(0,5^2 + 3,5^2) + 0,7^2}$$

$$r_{p_3 - f_2} = \sqrt{(0,5^2 + 0,5^2) + 1^2}$$

$$\cos \theta_{\text{final}, p_3 - f_1} = \frac{0,7}{r_{p_3 - f_1}} = \frac{0,7}{\sqrt{(0,5^2 + 3,5^2) + 0,7^2}}$$

$$\cos \theta_{\text{final}, p_3 - f_2} = \frac{1}{r_{p_3 - f_2}} = \frac{1}{\sqrt{(0,5^2 + 0,5^2) + 1^2}}$$

Por ejemplo, para calcular la irradiancia en el punto «f₁» a 550 nm sólo hay que tener en cuenta el flujo procedente de la fuente «f₂» porque la fuente «f₁» no tiene emisión en dicha longitud de onda. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$(E_{550})_{p_1} = I^2 \cdot E_{550, f_2} \frac{\cos \theta_{\text{final}, p_1 - f_2}}{(r_{p_1 - f_2})^2} = I^2 \cdot 67,67 \frac{\frac{1}{\sqrt{(3^2 + 1^2) + 1^2}}}{(3^2 + 1^2) + 1^2} = 1,855 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

En aquellas longitudes de onda en las que ambas fuentes tengan emisión, se aplica el principio de superposición: debe considerarse el efecto aditivo de cada una de las fuentes. Así, la irradiancia a 600 nm en el punto «f₂» viene dada por:

$$\begin{aligned} (E_{600})_{p_2} &= I^2 \left(E_{600, f_1} \frac{\cos \theta_{\text{final}, p_2 - f_1}}{(r_{p_2 - f_1})^2} + E_{600, f_2} \frac{\cos \theta_{\text{final}, p_2 - f_2}}{(r_{p_2 - f_2})^2} \right) = \\ &= I^2 \left(60,90 \frac{\frac{0,7}{\sqrt{1,5^2 + 0,7^2}}}{1,5^2 + 0,7^2} + 205,6 \frac{\frac{1}{\sqrt{1,5^2 + 1^2}}}{1,5^2 + 1^2} \right) = 44,49 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

Realizando los cálculos anteriores para cada uno de los puntos propuestos y para cada longitud de onda, se obtienen los valores de irradiancia (ver tabla 4) que se muestran en la gráfica de la figura 1.7.

Tabla 4

λ nm	$E_{e\lambda}$ $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$		
	f_1	f_2	f_3
510	0,00026	0,0016	0,0051
520	0,0046	0,0286	0,091
530	0,0530	0,3299	1,052
540	0,3914	2,437	7,773
550	1,855	11,55	36,835
560	5,639	35,09	111,915
570	11,03	68,36	217,952
580	14,37	85,61	272,192
590	15,92	70,32	218,142
600	29,07	44,49	112,825
610	73,06	40,10	39,601
620	139,1	58,05	13,160
630	173,2	69,78	7,780
640	138,7	55,64	5,478
650	71,20	28,55	2,771
660	23,44	9,399	0,911
670	4,946	1,983	0,192
680	0,6697	0,2685	0,026
690	0,0581	0,0233	0,0023
700	0,0032	0,0013	0,00013
E_{eT} $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$	702,7	582,0	1.048,7

Atendiendo al valor de irradiancia total (en $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$), el punto « f_1 » es el que tiene un valor intermedio:

$$582,0 < 702,7 < 1.048,7$$

$$f_1 < f_2 < f_3$$

NOTA

Cuando existe exposición a más de una fuente, se debe aplicar el principio de

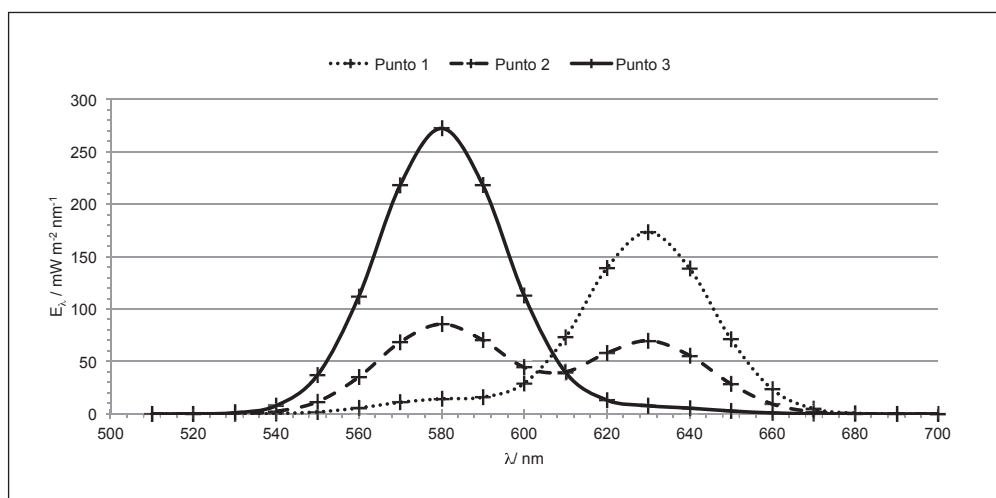


Figura 1.7. Irradiancia espectral para los puntos «f₁», «f₂» y «f₃».

superposición de forma que se calcula el efecto aditivo de cada una de ellas. Así mismo se muestra cómo varía la influencia de cada una de las fuentes en función del punto donde se mida la irradiancia.

1.10 Sea un foco para la iluminación a larga distancia en espectáculos (figura 1.8) cuya intensidad radiante es de $288 \text{ kW}\cdot\text{sr}^{-1}$. Suponiendo que dicho foco se sitúa a una distancia de 30 metros de un escenario, que el haz de luz incide perpendicularmente sobre el cuerpo y que la superficie corporal media es de $1,7 \text{ m}^2$, ¿qué cantidad de energía radiante recibirá el maestro de ceremonias cuando el flujo emitido sigue el perfil de la figura 1.9?

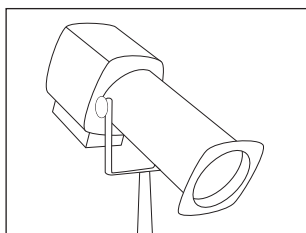


Figura 1.8. Foco de iluminación de larga distancia.

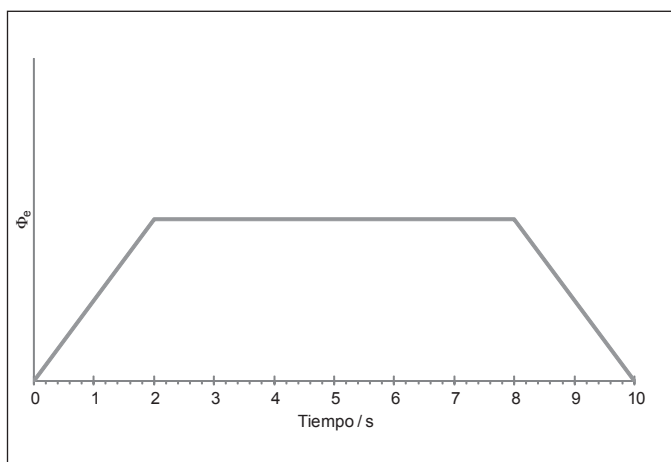


Figura 1.9. Perfil de flujo emitido por el foco.

SOLUCIÓN

La irradiancia y la intensidad radiante están relacionadas a través la ley inversa de los cuadrados (ejercicio 1.5), cuya expresión más genérica es:

$$I_e = E_e \frac{r^2}{\cos \theta}$$

La irradiancia es el flujo a través de una superficie de forma que la relación entre ambas unidades viene dada por:

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

Finalmente, el flujo o potencia radiante « Φ_e » es la potencia total de la radiación electromagnética y se define como la energía de las ondas electromagnéticas por unidad de tiempo:

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

Como el tamaño de la fuente es muy pequeño en relación con la distancia de exposición, se puede considerar la fuente como puntual. Así mismo, como la superficie corporal es muy pequeña en relación con la distancia, es razonable suponer que en estas condiciones la irradiancia en el cuerpo es prácticamente constante e independiente de la superficie. Por eso:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \cong \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta A} \rightarrow \Phi_e = E_e \cdot A$$

En la expresión anterior podemos introducir la relación entre la intensidad radiante y la irradiancia, de forma que:

$$\Phi_e = E_e \cdot A = \frac{\cos \theta}{r^2} I_e \cdot A$$

El valor del ángulo de incidencia es « $\theta = 0^\circ$ » de forma que la expresión anterior puede simplificarse a:

$$\Phi_e = E_e \cdot A = \frac{I_e}{r^2} A$$

El área corporal promedio de un adulto se puede suponer igual a 1,7 m² (1,9 m² en el caso de hombres y 1,6 m² en el caso de mujeres). No obstante, la superficie que está expuesta a la luz del foco es posible aproximarla a la mitad de este valor. Sustituyendo este valor junto con los valores de intensidad y distancia se obtiene el flujo emitido por el foco:

$$\Phi_e = \frac{I_e}{r^2} A = \frac{288 \cdot 10^3}{30^2} \frac{1,7}{2} = 272 \text{ W}$$

Si este flujo fuese constante a lo largo del tiempo, entonces la energía radiada se obtendría mediante « $Q_e = \Phi_e \cdot t$ ». No obstante, el perfil de la figura 1.9 muestra que entre $t = 0$ y $t = 2$ segundos el flujo crece linealmente hasta alcanzar el valor calculado anteriormente. Después, durante 6 segundos, dicho valor se mantiene constante y, finalmente, entre $t = 8$ y $t = 10$ decrece de forma lineal hasta hacerse nulo. De esta forma hay que resolver la siguiente ecuación para calcular la energía radiante:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \rightarrow dQ_e = \Phi_e dt$$

La ecuación anterior debe integrarse considerando 3 zonas: la primera es la zona de crecimiento, la segunda corresponde al flujo constante y la última es la de la zona de decrecimiento:

$$Q_e = \int \Phi_e dt = \int_0^2 \Phi_{e, \text{crec}} dt + \int_2^8 \Phi_{e, \text{const}} dt + \int_8^{10} \Phi_{e, \text{decrec}} dt$$

$$Q_e = \int_0^2 \Phi_{e, \text{crec}} dt + \Phi_{e, \text{const}} (8 - 2) + \int_8^{10} \Phi_{e, \text{decrec}} dt$$

Geométricamente se verifica que:

$$\int_0^2 \Phi_{e, \text{crec}} dt + \int_8^{10} \Phi_{e, \text{decrec}} dt = \int_0^2 \Phi_{e, \text{const}} dt = \Phi_{e, \text{const}} (2 - 0)$$

Sustituyendo en la expresión anterior se obtiene:

$$Q_e = \int_0^2 \Phi_{e, \text{crec}} dt + \Phi_{e, \text{const}} (8 - 2) + \int_8^{10} \Phi_{e, \text{decrec}} dt = \Phi_{e, \text{const}} (8 - 2) + \Phi_{e, \text{const}} (2 - 0)$$

$$Q_e = \Phi_{e, \text{const}} (8 - 2) + \Phi_{e, \text{const}} (2 - 0) = \Phi_{e, \text{const}} \cdot 8$$

El valor del flujo constante es el que previamente se había calculado. Sustituyendo en la expresión anterior se obtiene que la energía radiante que incide sobre el maestro de ceremonias es:

$$Q_e = \Phi_{e, \text{const}} \cdot 8 = 272 \cdot 8 = 2.176 \text{ J} \cong 520 \text{ cal}$$

NOTA

Las situaciones más habituales de exposición a radiaciones ópticas suponen que la emisión es constante a lo largo del tiempo y por lo tanto el cálculo de las magnitudes físicas correspondientes se simplifica sobremanera. No obstante, pueden darse situaciones en las que la emisión varía en el tiempo. En estos casos se debe dividir la exposición en tantas partes como variaciones haya y calcular cada una de ellas individualmente; el valor final viene dado por la suma de todas las partes.

1.11 Todas las cabinas de flujo laminar de un laboratorio cuentan con dos fuentes de luz UV para el tratamiento de bacterias. El procedimiento de seguridad del laboratorio establece que el cristal de protección deberá estar bajado siempre que las fuentes sean accionadas. De hecho, las cabinas se han dotado de un sistema de protección mediante el cual el flujo radiante es interrumpido siempre que el cristal no esté bajado.

Para realizar la evaluación de riesgos específica, se considera como situación más desfavorable aquella en la que las dos fuentes están funcionando de forma simultánea. Aunque sería deseable medir directamente la irradiancia efectiva como paso inicial de la evaluación, desafortunadamente no se dispone de un radiómetro que aplique la ponderación que corresponde a la banda considerada. Dicho aparato sólo proporciona una tabla con valores de irradiancia espectral en crudo (ver tabla 5), cuya representación gráfica es la de la figura 1.10.

Tabla 5. Irradiancia espectral en crudo

λ nm	E $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$	λ nm	E $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$	λ nm	E $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$
180	0,088	260	1,066	340	0,417
190	0,271	270	1,001	350	0,203
200	0,650	280	1,177	360	0,084
210	1,215	290	1,407	370	0,030
220	1,774	300	1,504	380	0,009
230	2,030	310	1,385	390	0,002
240	1,849	320	1,089	400	0,001
250	1,416	330	0,730		

¿Cuál es el valor de la irradiancia efectiva? ¿Qué efecto tiene la ponderación sobre los valores medidos en crudo?

SOLUCIÓN

La irradiancia en el rango 180-400 nm se calcula mediante la fórmula primera de la tabla A.2 del anexo I 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:

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

Para ello, es necesario multiplicar cada valor de irradiancia espectral por el valor correspondiente de la curva de ponderación « $S(\lambda)$ ». La tabla A.3 del mencionado real decreto contiene los valores de « $S(\lambda)$ » para cada longitud de onda. Asimismo,

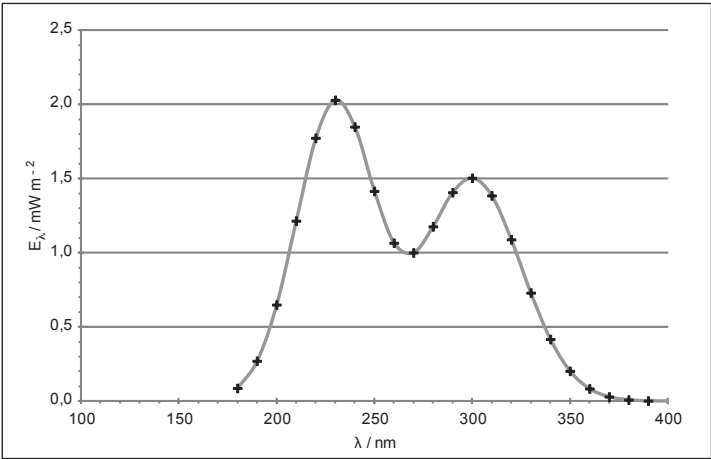


Figura 1.10. Irradiancia espectral “en crudo”.

también hay que multiplicar por el paso o ancho de banda ($\Delta\lambda$) correspondiente. Si bien los valores de « $S(\lambda)$ » están tabulados para un ancho de banda de 1 nm, los datos de irradiancia de la fuente ultravioleta se han registrado con un paso de 10 nm y por eso el valor que debe utilizarse en la expresión anterior es $\Delta\lambda = 10\text{ nm}$. La excepción la constituyen las longitudes de onda de los extremos del intervalo considerado; esto es: $\lambda = 180\text{ nm}$ y $\lambda = 400\text{ nm}$, en los que se debe tomar un valor que sea la mitad, es decir, $\Delta\lambda = 5\text{ nm}$ (si se tomase $\Delta\lambda = 10\text{ nm}$ en los extremos se estaría sobrestimando el valor de la irradiancia efectiva « E_{eff} »). (Ver tabla 6).

Tabla 6. Irradiancia en el rango 180-400 nm

λ nm	E_{λ} $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$	$S(\lambda)$	$E_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda$	λ nm	E_{λ} $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$	$S(\lambda)$	$E_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda$
180	0,088	0,0120	$5,28\ 10^{-3}$	300	1,504	0,3000	4,51
190	0,271	0,0190	$51,49\ 10^{-3}$	310	1,385	0,0150	$20,78\ 10^{-2}$
200	0,650	0,0300	$19,50\ 10^{-2}$	320	1,089	0,0010	$10,89\ 10^{-3}$
210	1,215	0,0750	$91,13\ 10^{-2}$	330	0,730	0,000410	$29,93\ 10^{-4}$
220	1,774	0,1200	2,13	340	0,417	0,000280	$11,68\ 10^{-4}$
230	2,030	0,1900	3,86	350	0,203	0,000200	$4,06\ 10^{-4}$
240	1,849	0,3000	5,55	360	0,084	0,000130	$10,92\ 10^{-5}$
250	1,416	0,4300	6,09	370	0,030	0,000093	$2,79\ 10^{-5}$
260	1,066	0,6500	6,93	380	0,009	0,000064	$5,76\ 10^{-6}$
270	1,001	1,0000	10,01	390	0,002	0,000044	$8,80\ 10^{-7}$
280	1,177	0,8800	10,36	400	0,001	0,000030	$1,50\ 10^{-7}$
290	1,407	0,6400	9,00				

$$E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \approx 59,8 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Con el fin de comprender el efecto de la ponderación sobre los valores medidos en crudo, en la figura 1.11 se representan tres curvas:

- La irradiancia en crudo de la fuente de radiación
- La curva de ponderación « $S(\lambda)$ »
- La irradiancia ponderada por « $S(\lambda)$ »

Se observa que la curva de ponderación « $S(\lambda)$ » afecta principalmente al rango de longitudes de onda que va de 200 a 310 nm. Es decir, la aportación de las longitudes de onda fuera de este rango es prácticamente despreciable para el cálculo de la irradiancia efectiva. Por este motivo, si bien el primer máximo ($\lambda = 230 \text{ nm}$) tiene un valor de irradiancia en crudo mayor que el segundo ($\lambda = 300 \text{ nm}$), su contribución al cálculo de la irradiancia efectiva es mucho menor debido al efecto de la curva « $S(\lambda)$ » de ponderación. Así, en la figura 1.11 se muestra que la curva final ponderada difiere mucho de la curva sin ponderar y tiende a adoptar el perfil de la curva de ponderación.

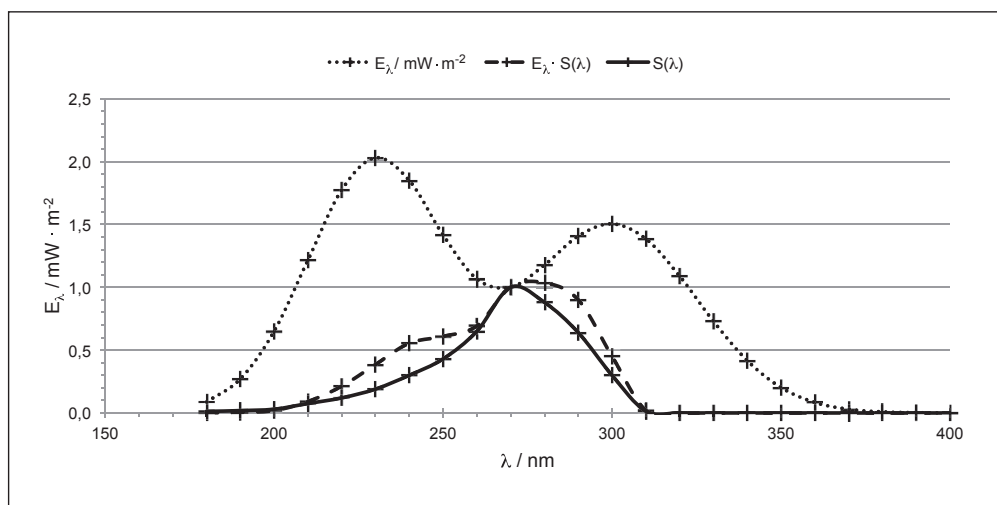


Figura 1.11. Irradiancia en crudo, curva de ponderación « $S(\lambda)$ » e irradiancia ponderada.

NOTA

Este ejercicio hace hincapié en la importancia del efecto de la ponderación que modifica de forma notable los valores originales. Así mismo y a fin de evitar una sobrestimación, el ejercicio resalta el hecho de que en los extremos del rango de longitudes de onda considerados, el paso que debe tomarse es la mitad del valor tomado para el resto de longitudes de onda.

1.12 Identificar cuál es la exposición solar para cada una de las 7 bandas en las que se dividen las radiaciones ópticas de acuerdo con la tabla A.1 del anexo I del Real Decreto 486/2010, teniendo en cuenta que el sol puede aproximarse de forma satisfactoria a un cuerpo negro con una temperatura radiante de $T = 5.780$ K y que, por lo tanto, la radiancia espectral se puede calcular mediante la ley de Planck de radiación del cuerpo negro.

SOLUCIÓN

La ley de Planck establece la siguiente fórmula para la radiancia espectral de un cuerpo negro:

$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \left[\text{Wm}^{-2} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1} \right]$$

La radiancia total en una banda de longitudes de onda se puede calcular a través de (para más detalles, se puede consultar la demostración en el anexo D):

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda \quad \text{tal que } \lambda_2 \geq \lambda_1$$

$$L = 2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x_2^3}{n} + \frac{3x_2^2}{n^2} + \frac{6x_2}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x_1^3}{n} + \frac{3x_1^2}{n^2} + \frac{6x_1}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_1} \right)$$

$$x_i = \frac{hc}{kT\lambda_i}$$

La irradiancia en la superficie terrestre se puede calcular teniendo en cuenta que el ángulo sólido del disco solar es muy pequeño $\omega = 6,8 \cdot 10^{-5}$ sr y por lo tanto la siguiente aproximación es aplicable (ver ejercicio 1.7):

$$E_{\lambda} = L_{\lambda} \omega$$

Tomando el valor de la temperatura superficial del sol como $T = 5.780$ K y sustituyendo dicho valor en la expresión anterior de la irradiancia se obtiene el espectro de la figura 1.12.

Al disponer de expresiones analíticas para la irradiancia y la radiancia debería ser inmediato el cálculo de la exposición en las bandas de la tabla A.1 del anexo I del Real Decreto 486/2010 (en el anexo A se muestra un esquema de dichas bandas). No obstante, dicho cálculo se ve aumentado por el hecho de que en los grupos 1, 3, 4 y 5 es necesario utilizar las ponderaciones «S(λ)», «B(λ)» y «R(λ)» del anexo I.C “Curvas de ponderación” (tablas A.3 y A.4) del real decreto. Estas ponderaciones están formadas por valores discretos de forma que para poder aplicarlas es necesario discretizar de igual forma valores discretos de la irradiancia o de la

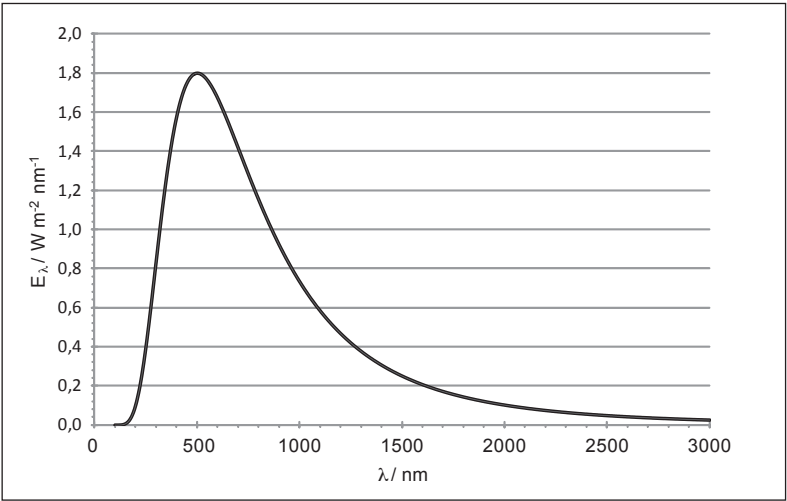


Figura 1.12. Irradiancia espectral de un cuerpo negro con $T = 5.780 \text{ K}$.

radiancia según las fórmulas de la tabla A.2 del anexo I.B “Expresiones”, para poder calcular la exposición correspondiente.

La primera banda es la correspondiente al rango 180-400 nm que engloba el UVA, UVB y UVC. La exposición radiante se calcula de forma análoga al ejercicio 1.11, con la diferencia de que en este caso los valores de irradiancia para cada longitud de onda son los que se muestran en la figura 1.12:

$$E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_\lambda S(\lambda) \Delta\lambda; \quad H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \Delta t$$

Así, el cálculo (ver tabla 7) se realiza tal y como se muestra en los siguientes ejemplos (el paso de ancho de banda es $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$, excepto para las longitudes de onda $\lambda = 180 \text{ nm}$ y $\lambda = 400 \text{ nm}$ en las que se debe tomar como paso la mitad del valor anterior $\Delta\lambda = 0,5 \text{ nm}$):

Tabla 7

λ nm	E_λ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$	$S(\lambda)$	$E_\lambda S(\lambda) \Delta\lambda$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
180	0,042307202	0,012	0,000253843
...
270	0,559611736	1	0,559611736
...
308	0,903681108	0,026	0,023495709
...

Realizando el mismo procedimiento para todas las longitudes de onda del rango 180-400 nm y sumando los resultados, se obtiene el siguiente valor para la irradiancia efectiva:

$$E_{\text{eff}} \cong 24,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Para calcular la exposición al UVA (rango 315-400 nm) no es necesario realizar ninguna ponderación y por lo tanto es posible utilizar la expresión analítica de la irradiancia. Tomando como límite superior de los sumatorios $n = 10$:

$$E_{\text{UVA}} = \int_{315}^{400} E_{\lambda} d\lambda = \omega \int_{315}^{400} L_{\lambda} d\lambda$$

$$E_{\text{UVA}} = 2\omega \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x_2^3}{n} + \frac{3x_2^2}{n^2} + \frac{6x_2}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x_1^3}{n} + \frac{3x_1^2}{n^2} + \frac{6x_1}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_1} \right)$$

$$x_1 = \frac{hc}{kT \cdot 315 \cdot 10^{-9}} \quad x_2 = \frac{hc}{kT \cdot 400 \cdot 10^{-9}}$$

$$E_{\text{UVA}} \cong 110,410965769178 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

De forma alternativa también se podría calcular la irradiancia al igual que en el caso anterior pero sin aplicar ninguna ponderación:

$$E_{\text{UVA}} = \sum_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \Delta\lambda; \quad H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} \Delta t$$

$$E_{\text{UVA}} = 110,410627476331 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Se observa que el error relativo «e», en tanto por ciento, cometido al realizar la discretización en el cálculo de la irradiancia es muy pequeño:

$$e = 100 \frac{110,41097 - 110,4106}{110,41097} \cong 0,0003\%$$

Para la exposición a la luz azul (300-700 nm) se utiliza la curva de ponderación «B(λ)». El procedimiento es el mismo que en el cálculo de la exposición al ultravioleta pero en este caso el paso de ancho de banda es $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$, excepto para las longitudes de onda $\lambda = 300$ y $\lambda = 700$ en las que se debe tomar como paso la mitad del valor anterior $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$.

En la tabla 8 se muestra, a modo de ejemplo, el cálculo para algunas longitudes de onda:

Tabla 8

λ nm	L_{λ} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$B(\lambda)$	$L_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
300	12.218,92172	0,01	305,473043
305	12.889,25411	0,01	644,4627055
...
435	25.107,48908	1	125.537,4454
440	25.311,72670	1	126.558,6335
...
700	20.830,78229	0,00001	0,520769557

$$L_B = \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda} B(\lambda) \Delta\lambda \cong 1.802.925,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

En el rango 380-1.400 nm la curva de ponderación a utilizar es $R(\lambda)$. Al igual que antes, el paso de ancho de banda que debe tomarse es $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ y $\Delta\lambda = 2,5 \text{ nm}$ para las longitudes de onda $\lambda = 300$ y $\lambda = 1.400$. La tabla 9 muestra algunos ejemplos de cálculo.

Tabla 9

λ nm	L_{λ} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	$R(\lambda)$	$L_{\lambda} R(\lambda) \Delta\lambda$ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
380	21.520,07254	0,1	5.380,018135
...
430	24.883,93139	9,8	1.219.312,638
435	25.107,48908	10	1.255.374,454
440	25.311,72670	10	1.265.586,335
445	25.497,06402	9,7	1.236.607,605
...
500	26.426,50918	1	132.132,5459
...
705	20.631,41088	0,977237221	100.808,9132
...
1.400	4.503,187432	0,02	225,1593716

$$L_R = \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=1.400 \text{ nm}} L_\lambda R(\lambda) \Delta\lambda \cong 24.449.196,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Se realiza exactamente el mismo cálculo para el rango 780-1.400 nm, excepción hecha del límite inferior del sumatorio:

$$L_R = \sum_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=1.400 \text{ nm}} L_\lambda R(\lambda) \Delta\lambda \cong 1.762.408,33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

En el intervalo 380-3.000 no se realiza ninguna ponderación y por lo tanto es posible calcular la irradiancia utilizando las fórmulas analíticas obtenidas inicialmente (al igual que en el cálculo de la exposición al UVA, se toma como límite superior de los sumatorios $n = 10$):

$$E_{\text{IR}} = \int_{380}^{3.000} E_\lambda d\lambda = \omega \int_{380}^{3.000} L_\lambda d\lambda$$

$$E_{\text{IR}} = 2\omega \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x_2^3}{n} + \frac{3x_2^2}{n^2} + \frac{6x_2}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{x_1^3}{n} + \frac{3x_1^2}{n^2} + \frac{6x_1}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_1} \right)$$

$$x_1 = \frac{hc}{kT \ 380} \cdot 10^9 \quad x_2 = \frac{hc}{kT \ 3.000} \cdot 10^9$$

$$E_{\text{piel}} = 1.203,70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$H_{\text{piel}} = E_{\text{piel}} \Delta t$$

En el rango 780-3.000 nm tampoco se realiza ninguna ponderación. Se realiza el mismo cálculo que en el caso anterior pero cambiando el límite inferior de 380 nm por el de 780 nm. De esta forma, el valor que se obtiene de irradiancia es:

$$E_{\text{IR}} = 566,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

NOTA

De las siete bandas contempladas en la tabla A.1 “Valores Límite para las Radiaciones ópticas incoherentes y sus efectos sobre la salud” del anexo I del Real Decreto 486/2010, tan sólo las correspondientes a los grupos 2, 6 y 7 no necesitan ser ponderadas. En estos casos y siempre que la radiación de la fuente pueda ser caracterizada mediante una función matemática, es posible calcular los valores de irradiancia de forma analítica mediante la integración de dicha función.

En cualquier otra situación el cálculo de las magnitudes físicas correspondientes debe realizarse mediante los valores discretos que se hayan registrado a través de las mediciones pertinentes.

2. EVALUACIÓN DE LA EXPOSICIÓN LABORAL A RADIACIONES ÓPTICAS

2.1 Nuevamente se emplearán las mismas lámparas UV para el tratamiento de bacterias que las definidas en el enunciado del ejercicio 1.11. Teniendo en cuenta los resultados antes obtenidos, se pide calcular el tiempo máximo de exposición. Se puede suponer que se trata de fuentes de radiación constantes cuyas variaciones de irradiancia a lo largo del tiempo son despreciables.

SOLUCIÓN

El tiempo de exposición a radiación UV depende del tipo de daño sobre la salud y, por lo tanto, del rango espectral de exposición. Así pues, es posible distinguir dos grupos dentro del espectro de UV: el que corresponde al rango 180-400 nm, que afecta a los ojos (fotoqueratitis, conjuntivitis, cataratas) y la piel (eritema, elastosis, cáncer de piel), y el que corresponde al rango 315-400 nm (UVA), que afecta al cristalino.

Para el primer grupo, el valor de irradiancia efectiva ponderada ya ha sido calculado en el ejercicio 1.11:

$$E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} S(\lambda) \Delta\lambda \cong 59,8 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

El valor límite de la exposición radiante efectiva ponderada para el rango de longitudes que va de 180 nm a 400 nm viene fijado en la tabla A.1 del Real Decreto 486/2010:

$$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (referido a 8 horas)}$$

La irradiancia y la exposición radiante están relacionadas a través de la siguiente expresión:

$$E = \frac{dH}{dt} \quad E \neq f(t) \quad H = E\Delta t$$

Sustituyendo los valores en la expresión anterior se obtiene:

$$\Delta t = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30}{59,8 \cdot 10^{-3}} = 501,7 \text{ s} \cong 8 \text{ minutos y } 22 \text{ segundos}$$

La evaluación de la exposición en relación con los efectos sobre el cristalino se

realiza teniendo en cuenta el rango de irradiancia espectral, sin ponderar, que va de 315 nm a 400 nm y que corresponde a la zona del UVA:

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

Como en los datos proporcionados en el ejercicio 1.11 no se dispone del valor correspondiente a 315 nm, se puede aproximar dicho valor al promedio de la radiancia correspondiente a 310 nm y 320 nm. Dicha aproximación se justifica por el hecho de que en esta zona espectral los valores de irradiancia se pueden aproximar a una recta, tal y como se observa en la figura 1.10. De esta forma, el valor para 315 nm es:

$$E_{315 \text{ nm}} \cong \frac{E_{310 \text{ nm}} + E_{320 \text{ nm}}}{2} = \frac{1,385 + 1,089}{2} = 1,237 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$$

De esta forma, se tienen los valores de irradiancia para el rango que va de 315 nm a 400 nm. Es importante señalar que estos valores no están equiespaciados con respecto a la longitud de onda y por ello se debe prestar especial atención al paso (ancho de banda) que se utiliza para cada valor, de forma similar a como se hizo en el ejercicio 1.11. En la tabla 10 se muestran los valores de irradiancia espectral y el paso para cada longitud de onda.

Tabla 10

λ nm	E_{λ} $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	$\Delta\lambda$
315	1,237	2,5
320	1,089	7,5
330	0,730	10
340	0,417	10
350	0,203	10
360	0,084	10
370	0,030	10
380	0,009	10
390	0,002	10
400	0,001	5

Tomando los datos anteriores para calcular la irradiancia del UVA se obtiene el siguiente valor:

$$E_{\text{UVA}} = \sum_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \Delta\lambda \cong 26,0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teniendo en cuenta el límite de exposición radiante para el rango espectral del UVA, esta situación viene dado en la tabla A.1 del Real Decreto 486/2010:

$$H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ (referido a 8 horas)}$$

De forma similar al caso correspondiente a la exposición en la banda de 180-400 nm, el tiempo máximo para la exposición a longitudes de onda entre 315 nm y 400 nm viene dado por:

$$\Delta t = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4}{26,0 \cdot 10^{-3}} = 384.615 \text{ s} \approx 4 \text{ días, 10 horas y 50 minutos}$$

NOTA

La diferencia de tiempo máximo de exposición que se da en los dos casos es debido a que la radiación de las lámparas está centrada en el intervalo que va de 200 nm a 330 nm. Además, el límite de exposición radiante para el UVA es dos órdenes de magnitud superior que el de exposición radiante efectiva. Por estos motivos, los efectos más importantes son los que afectan a los ojos y a la piel (grupo 1 de la tabla A.1 del real decreto).

2.2 Identificar y calcular los tiempos máximos de exposición a radiación UV para los grupos 1 y 2 de la tabla A.1 del Real Decreto 486/2010, suponiendo que la fuente de radiación es constante en el tiempo.

SOLUCIÓN

Para el rango 180-400 nm el valor límite de la exposición radiante efectiva ponderada es $30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. El tiempo máximo de exposición viene dado por:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30}{E_{\text{eff}}}$$

Los valores de dicha relación se muestran en la tabla 11 y pueden representarse gráficamente según la figura 2.1.

Tabla 11

T_{exp} s	E_{ff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	T_{exp} s	E_{ff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
0,1 s	300	10 min	0,05
0,5 s	60	15 min	0,033
1 s	30	30 min	0,017
10 s	3	1 hora	0,0083
30 s	1	2 horas	0,0042
1 min	0,5	4 horas	0,0021
5 min	0,1	8 horas	0,0010

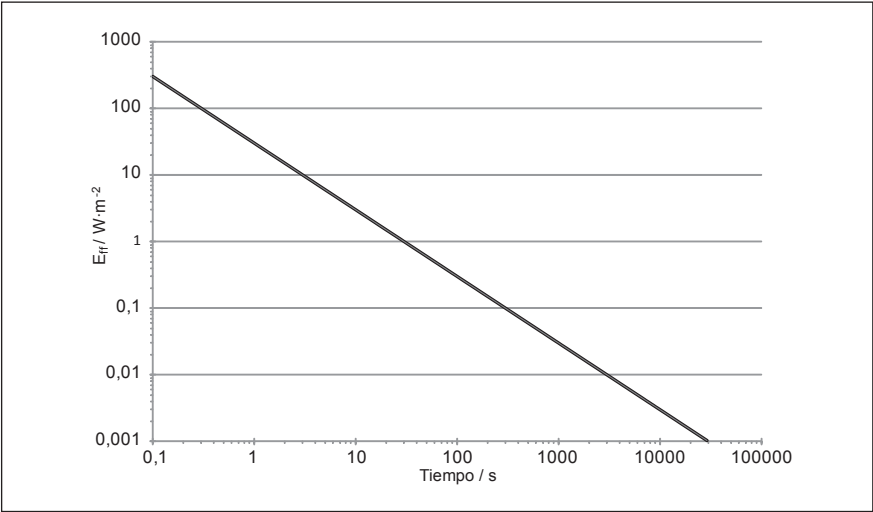


Figura 2.1. Tiempo de exposición máximo para la región del UV (180-400 nm).

En el rango del UVA (315-400 nm) el límite de la exposición radiante es $10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. El tiempo máximo de exposición viene dado por:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4}{E_{\text{UVA}}}$$

De nuevo, los valores de dicha relación se muestran en la tabla 12 y pueden representarse gráficamente según la figura 2.2.

Tabla 12

T_{exp} s	E $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	T_{exp} s	E $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
0,1 s	100.000	10 min	16,67
0,5 s	20.000	15 min	11,1
1 s	10.000	30 min	5,56
10 s	1.000	1 hora	2,78
30 s	333,33	2 horas	1,39
1 min	166,67	4 horas	0,69
5 min	33,33	8 horas	0,35

En ambos casos, los gráficos muestran una relación lineal entre la irradiancia y el tiempo máximo de exposición. Debe tenerse presente que este hecho es así siempre que en los ejes de coordenadas se utilicen escalas logarítmicas. Es decir:

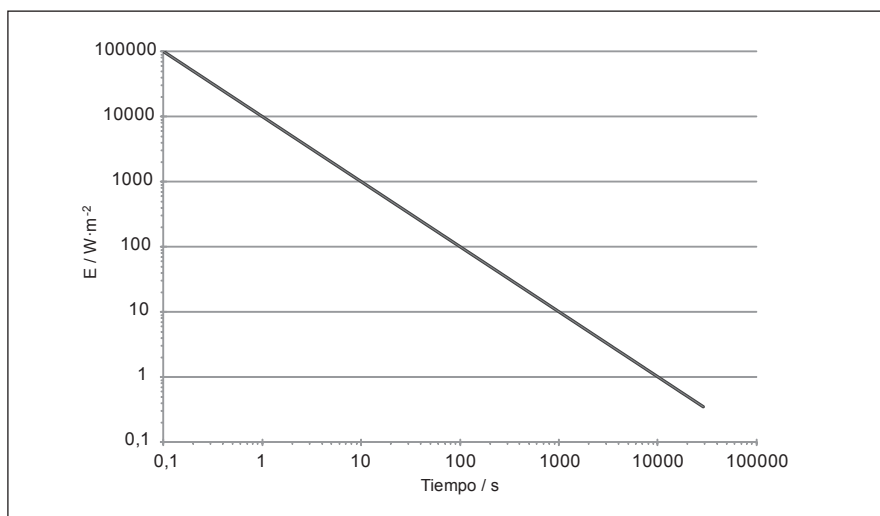


Figura 2.2. Tiempo de exposición máximo para la región del UVA (315-400 nm).

aunque el tiempo máximo de exposición es inversamente proporcional a la irradiancia, dicha relación puede rectificarse tomando logaritmos:

$$t = \frac{H}{E}$$

$$\log t = \log \frac{H}{E} = \log H - \log E$$

NOTA

Cuando se evalúa la exposición a radiación ultravioleta, el uso de los gráficos anteriores facilita el cálculo del tiempo de exposición. Además, como la relación es lineal cuando se toman logaritmos la lectura gráfica sobre una recta es más sencilla que si se utiliza la representación sin rectificar.

2.3 Todos los puestos de trabajo de maquetación digital de documentos de una empresa disponen de un equipo informático cuya pantalla de visualización de datos, retroiluminada mediante ledes (figura 2.3), tiene las siguientes características:

- Alto: 325 mm
- Ancho: 520 mm
- Luminancia: $L_v = 375 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$

Las mediciones radiométricas se han realizado a una distancia de 50 cm y utilizando una imagen en blanco en la pantalla. Los valores medidos son:

- Irradiancia efectiva: $E_{\text{eff}} = 98 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia UVA: $E_{\text{UVA}} = 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$

- Irradiancia efectiva (luz azul): $E_B = 83 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (efecto térmico): $E_R = 702 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$

Para una exposición promedio de 6 horas al día, ¿existe un riesgo para la salud? (Se puede considerar que la línea de visión coincide con la normal de la pantalla de visualización).

SOLUCIÓN

Los diodos led utilizados en pantallas de visualización de datos apenas emiten radiación ultravioleta e infrarroja, siendo la radiación visible la más importante. Por ello, la valoración de la exposición a esta fuente debe centrarse en la exposición a la luz azul (grupo 3 del anexo I del Real Decreto 486/2010).

La norma UNE-EN 62471:2009 establece que aquellas fuentes de radiación visible cuya luminancia exceda $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ no se espera que sobrepasen los correspondientes límites de exposición para los riesgos retinianos.

La luminancia de la pantalla de visualización es de $375 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Al no superar el límite anterior se puede concluir que la exposición a dicha fuente no supone un riesgo. No obstante, se realizan los cálculos correspondientes para comprobar que no se sobrepasan los límites de exposición.

En el rango correspondiente comprendido entre $\lambda = 180 \text{ nm}$ y $\lambda = 400 \text{ nm}$, el tiempo de exposición máximo para una irradiancia efectiva $E_{\text{eff}} = 98 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ puede obtenerse rápidamente a través de la figura 2.1 del ejercicio 2.2 donde se observa que el tiempo máximo de exposición es superior a 8 horas. es decir, no se supera el valor límite en esta región espectral. De forma adicional, este tiempo máximo puede obtenerse formalmente de la siguiente forma:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{98 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{98 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}} \approx 3,06 \cdot 10^5 \text{ s} \approx 3 \text{ días y } 13 \text{ horas}$$

El riesgo derivado de la exposición al UVA puede evaluarse mediante la figura 2.2 del ejercicio 2.2. Al igual que antes, se observa que el tiempo máximo de exposición es superior a 8 horas. Adicionalmente, dicho tiempo se obtiene a través de:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} = 10^6 \text{ s} \approx 11 \text{ días y } 14 \text{ horas}$$

En cuanto a la exposición a la luz azul y al infrarrojo, es necesario calcular el tamaño angular (tanto plano « α » como sólido « ω ») que subtiende la pantalla de visualización. Cuando una fuente de radiación es oblonga, el ángulo plano se calcula a partir de la dimensión promedio «Z» de la fuente de la siguiente forma:

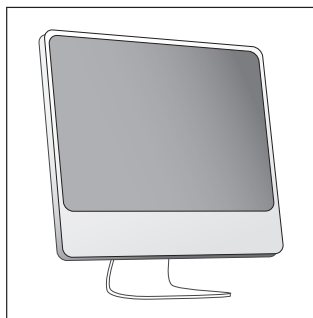


Figura 2.3. Pantalla de visualización de datos.

$$Z = \frac{520 + 325}{2} = 422,5 \text{ mm}$$

El ángulo plano subtendido por la pantalla a una distancia de 50 cm es:

$$\alpha = \frac{422,5 \text{ mm}}{50 \text{ cm}} = 0,845 \text{ rad}$$

El ángulo sólido se calcula de forma aproximada mediante la expresión del ejercicio 1.4:

$$\omega \cong \frac{A_s}{d^2} = \frac{325 \text{ mm} \cdot 520 \text{ mm}}{(50 \text{ cm})^2} = 0,676 \text{ sr}$$

En el anexo E de este documento se establecen los valores mínimos de ángulo en función del tiempo de exposición. Para «t = 10 s» el ángulo sólido mínimo es 0,0001 sr mientras que para «t > 10.000 s» es 0,008 sr. Como los ángulos calculados son superiores a los mínimos, se utilizan los primeros en el cálculo de las radiancias para su comparación con los valores límite.

El límite de exposición a la luz azul es $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, que corresponde al grupo 3º del anexo I del Real Decreto 486/2010 porque el tamaño de la fuente es superior a 11 mrad (el ojo no está fijado médicamente). Se comprueba que no se supera el valor límite:

$$L_B \cong \frac{E_B}{\omega} = \frac{83 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{0,676 \text{ sr}} \cong 0,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Como la fuente no emite en el infrarrojo de forma exclusiva sino que la emisión también es en el visible, entonces se aplica el límite del grupo 4 para evaluar el efecto térmico retiniano:

$$L_R \cong \frac{E_R}{\omega} = \frac{702 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{0,676 \text{ sr}} \cong 1,04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El valor del límite « L_R » es el correspondiente a «t > 10 s» con « $C_a = 100$ » porque el ángulo plano subtendido ($\alpha = 0,845 \text{ rad}$) es superior a 100 mrad; de forma que este toma un valor « L_R » de $280 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

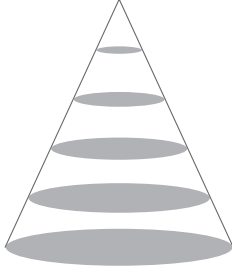
Se comprueba que no se supera ninguno de los valores límite. Consecuentemente, la exposición a esta fuente no supone ningún riesgo para la salud debido a las radiaciones ópticas emitidas.

NOTA

De acuerdo con la norma UNE-EN 62471:2009, cuando la luminancia de una fuente que emite en la zona visible del espectro es inferior a « $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ », se espera que dicha fuente no supere los valores límite de exposición para riesgos retinianos.

2.4 Imaginar un puesto de trabajo de oficina en el que se ha instalado una lámpara de ledes en el techo para proporcionar un nivel de iluminación adecuado para un trabajo de lectura, escritura y uso de un ordenador. La distancia entre el techo y la superficie de la mesa es de 3 metros. El fabricante de la lámpara facilita la información técnica que se muestra en la tabla 13.

Tabla 13

	Distancia m	Evaluación lux	Diámetro cm
	0,6	12.626	22,9
	1,2	3.154	48,2
	1,8	1.399	71,0
	2,4	786	93,9
	3,0	506	11,5

- Diámetro de la lámpara: 12 cm
- Flujo luminoso: 1.050 lumen

Se ha medido la irradiancia correspondiente a la exposición a la luz azul en la superficie de la mesa, obteniéndose el siguiente valor:

- Irradiancia efectiva (luz azul): $E_B = 126 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$

Valorar la exposición a esta fuente suponiendo que la misma se mira directamente y que, por lo tanto, el ángulo de visión (ángulo entre la normal de la fuente y la línea de visión) es igual a 0 radianes.

SOLUCIÓN

Las lámparas led para iluminación general apenas emiten radiación ultravioleta e infrarroja.

Como la principal radiación emitida es la visible, se debe comprobar si la luminancia supera el límite de « $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ » y, en caso afirmativo, comprobar los límites correspondientes a la zona del visible.

Según los datos del fabricante, el nivel de iluminación a una distancia de 3 metros es igual a 506 lux. El ángulo sólido que subtiende la bombilla a esta distancia es:

$$\omega \cong \frac{A_s}{d^2} = \frac{\pi \left(\frac{12 \text{ cm}}{2} \right)^2}{(3 \text{ m})^2} = 1,26 \text{ msr}$$

De esta forma, la luminancia de la lámpara es:

$$L_v \cong \frac{E_v}{\omega} = \frac{506 \text{ lux}}{1,26 \text{ msr}} \cong 4 \cdot 10^5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$$

Como se supera el límite de luminancia « $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ », entonces es posible que se puedan superar los límites radiométricos para riesgos retinianos y, por ende, es necesario realizar la comprobación para cada rango espectral. En este caso, la fuente emite únicamente en el visible y el ojo no está fijado médicamente por lo que sólo es necesario comprobar el límite del grupo «3a» que es igual a $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Dicho valor límite es el correspondiente a un tiempo de exposición superior a « 10^4 s » de forma que el valor de ángulo sólido mínimo es igual a $0,008 \text{ sr}$ (anexo E). Como el ángulo que subtiende la fuente ($1,26 \text{ msr}$) es menor, entonces debe tomarse el valor de $0,008 \text{ sr}$ en el cálculo de la radiancia para su comparación con el límite del grupo «3a».

$$L_B \cong \frac{E_B}{\omega} = \frac{126 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{0,008 \text{ sr}} = 15,75 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Se comprueba que no se supera el valor límite de exposición.

NOTA

El hecho de tener fuentes visibles cuya luminancia sea superior a « $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ » no significa necesariamente que superen los valores límite de exposición. En realidad, la interpretación que debe hacerse es que por debajo de dicho valor no se espera que se superen los límites.

2.5 Una lámpara de haluro metálico de 70 W de potencia está montada sobre una luminaria con reflector trasero de 18 cm por 18 cm y un cristal transparente (figura 2.4). La fuente de luz no puede considerarse homogénea debido a que la zona más brillante es el propio arco que puede aproximarse a una esfera de 5 mm de diámetro. La lámpara está situada a 1 m de distancia del trabajador; punto en el que se realizan las siguientes mediciones radiométricas:

- Luminancia (L_v): $149 \cdot 10^6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (E_{eff}): $110 \text{ } \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia UVA (E_{UVA}): $915 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (luz azul) (E_B): $2.329 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (efecto térmico) (E_R): $30.172 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$

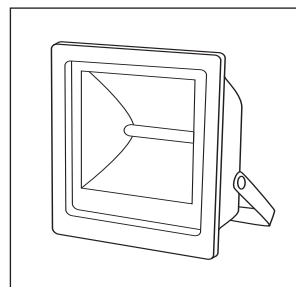


Figura 2.4. Lámpara de haluro metálico.

¿Cuál es la valoración de la exposición a esta fuente cuando la línea de visión coincide con la normal de la fuente (es decir, cuando el ángulo de visión es de 0 radianes)?

SOLUCIÓN

Las lámparas de haluro metálico suelen emitir en el rango del ultravioleta y el visible. Si bien la cubierta transparente reduce la emisión ultravioleta, es necesario valorar la exposición en esta zona del espectro. Por el contrario, estas lámparas difícilmente presentan emisión en el infrarrojo. Como la luminancia es superior a 10^4 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, es necesario evaluar la exposición correspondiente a los riesgos retinianos.

El valor límite del grupo 1 correspondiente a la exposición al ultravioleta es $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. A partir de los valores calculados en el ejercicio 2.2, el tiempo máximo de exposición para una irradiancia efectiva de $E_{\text{eff}} = 110 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ es superior a 8 horas.

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}}{110 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-2}} = \frac{30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}}{110 \cdot 10^{-6} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}} \approx 2,7 \cdot 10^5 \text{ s} \approx 3 \text{ días y } 4 \text{ horas}$$

De la misma forma, el valor límite del grupo 2 (exposición al UVA) es $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. Igual que antes, partiendo de los resultados del ejercicio 2.2 el tiempo máximo de exposición para una irradiancia de $E_{\text{UVA}} = 915 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ es aproximadamente de 3 horas. No obstante, debido al brillo de la fuente ($L_v = 149 \cdot 10^6 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$) el tiempo de fijación sobre la lámpara difícilmente será superior a 0,25 segundos y, por lo tanto, es improbable que se supere el tiempo máximo de exposición.

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}}{915 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}} = \frac{10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}}{915 \cdot 10^{-3} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}} \approx 10,929 \text{ s} \approx 3 \text{ horas y } 2 \text{ minutos}$$

Para valorar los grupos 3a y 4 correspondientes a los riesgos retinianos primero hay que calcular el ángulo plano « α » y el ángulo sólido « ω » que subtiende la fuente respecto del trabajador:

$$\alpha = \frac{0,5 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = 5 \text{ mrad}$$

$$\omega \approx \frac{\pi}{4} \alpha^2 = \frac{\pi}{4} (0,005)^2 \approx 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$$

Los valores del anexo E muestran que el valor mínimo del ángulo sólido para un tiempo de exposición « $t = 10 \text{ s}$ » es de 0,0001 sr mientras que para « $t > 10.000 \text{ s}$ » es 0,008 sr. Como el ángulo sólido calculado es menor que los mínimos, entonces deben utilizarse estos últimos en el cálculo de las radiancias para evaluar los riesgos retinianos.

La irradiancia de la exposición a la luz azul para « $t > 10.000 \text{ s}$ » es:

$$L_B \approx \frac{E_B}{\omega} = \frac{2,329 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}}{0,008 \text{ sr}} \approx 291 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$$

Se observa que este valor es mayor que el límite $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ (porque $\alpha \geq 11 \text{ mrad}$ y el ojo no está fijado médicamente) para tiempos de exposición superiores a 10^4 segundos. Por eso, es necesario calcular el tiempo máximo de exposición, que viene dado por la expresión:

$$L_B = \frac{10^6}{t} \rightarrow t = \frac{10^6}{L_B} = \frac{10^6}{\frac{2.329 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{0,0001 \text{ sr}}} \approx 43 \text{ s}$$

En este cálculo se ha tomado el ángulo sólido mínimo igual a 10^{-4} sr debido a que ese es el valor mínimo contemplado en el anexo E para tiempos de exposición entre 10 y 10^4 segundos. Además, como la luminancia de la fuente es muy elevada, se espera que la duración de la exposición sea pequeña.

Finalmente, para el riesgo térmico retiniano asociado a la exposición al visible e infrarrojo (grupo 4) también es necesario estimar la radiancia a partir del dato de irradiancia del enunciado:

$$L_R \approx \frac{E_R}{\omega} = \frac{30.172 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{10^{-4} \text{ sr}} \approx 301,7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El límite de exposición para « $t > 10 \text{ s}$ » se debe calcular con el coeficiente « $C_a = 5$ » ya que el valor del ángulo plano « α » es igual a 5 mrad .

$$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{5} \approx 5.600 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Se comprueba que no se supera el límite de exposición. En conclusión, el UVA y la luz azul son las bandas que limitan el tiempo de exposición a esta fuente. De estas dos, la luz azul es la que limita el tiempo a un menor valor (43 segundos) aunque no es esperable que se pueda fijar el ojo de forma continuada tanto tiempo sobre una fuente tan brillante.

NOTA

Los resultados muestran que la exposición a esta fuente viene limitada por el riesgo de la luz azul, con un tiempo máximo de 43 segundos. También hay que tener presente que la exposición real a la fuente está limitada por el elevado brillo de la misma, de forma que la visión directa de la fuente no será elevada. Como se desconoce el tiempo durante el cual se puede estar mirando directa y fijamente a la fuente, podría tomarse el tiempo de reflejo del parpadeo (0,25 segundos) como tiempo de exposición y realizar la evaluación bajo ese supuesto.

2.6 Muchos proyectores de uso doméstico son pequeños y de baja potencia. Sea un proyector de sobremesa de 150 W de potencia con una lente de $4,7 \text{ cm}$ de diámetro (figura 2.5). Dicha lente no emite luz de forma homogénea, de forma que el

área del objetivo que está iluminada puede considerarse circular con un diámetro $D = 0,03$ m.

El proyector cuelga del techo a 1 m por encima de la línea de visión horizontal ($d_v = 1$ m) de los trabajadores expuestos (figura 2.6). Las mediciones radiométricas se han realizado a 2 metros de distancia ($d_h = 2$ m), y proyectando una imagen blanca (situación de mayor radiación emitida). Los valores obtenidos son los siguientes:

- Iluminancia (E_v): $2 \cdot 10^3$ lux
- Irradiancia efectiva (E_{eff}): $30 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia UVA (E_{UVA}): $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (luz azul) (E_B): $2.237 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (efecto térmico) (E_R): $24.988 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$

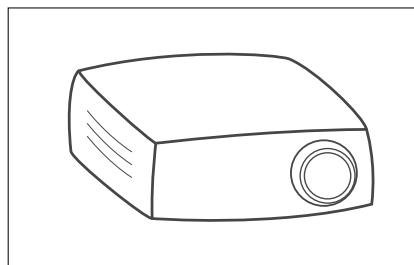


Figura 2.5. Proyector de sobremesa.

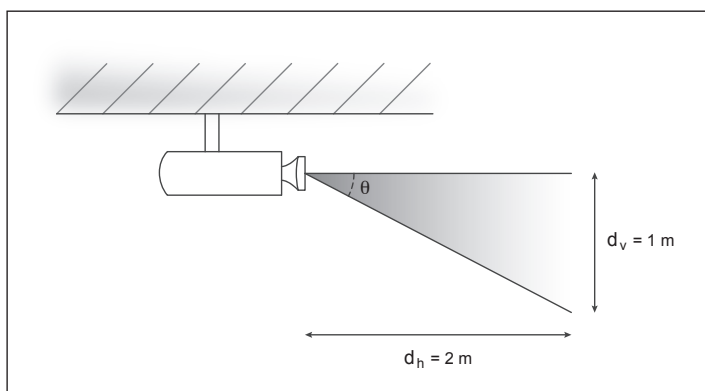


Figura 2.6. Esquema propuesto.

¿Cómo debe valorarse la exposición a esta fuente?

SOLUCIÓN

Un proyector emite radiación en la zona del visible. Por eso es de esperar que la posible exposición a radiación ultravioleta sea prácticamente nula, tal y como se verá al evaluar la exposición en dicha banda.

A diferencia de los ejercicios anteriores, en este caso la normal de la fuente no coincide con la línea de visión dando lugar a un ángulo de visión « θ » que es distinto de 0 radianes de forma que el tamaño aparente de la fuente, necesario para el cálculo de los ángulos subtendidos, será más pequeño que el tamaño real. Este ángulo de visión y la distancia « d » a la fuente toman los siguientes valores:

$$d = \sqrt{d_h^2 + d_v^2} = \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5}$$

$$\tan \theta = \frac{d_v}{d_h} \rightarrow \theta = \operatorname{atan} \frac{d_v}{d_h} = \operatorname{atan} \frac{1}{2} = \operatorname{atan} 0,5 \cong 0,46 \text{ rad} \cong 26,6^\circ$$

$$\cos \theta = \frac{d_h}{d} = \frac{d_h}{\sqrt{d_h^2 + d_v^2}} = \frac{2}{\sqrt{5}} \text{ m}$$

Los ángulos plano y sólido que subtiende la fuente toman valores diferentes en función del ángulo de visión. Para un foco circular, estos ángulos se calculan de la siguiente forma:

$$\alpha = \frac{D \cos \theta}{d} = \frac{0,03 \frac{2}{\sqrt{5}}}{\sqrt{5}} = 0,012 \text{ rad}$$

$$\omega = \frac{A_s \cos \theta}{d^2} = \frac{\pi(0,015)^2 \frac{2}{\sqrt{5}}}{5} \cong 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sr}$$

A partir de la iluminancia, se calcula la luminancia para comprobar si es necesario evaluar los riesgos retinianos por estar por encima del límite de $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$L_v = \frac{E_v}{\omega} = \frac{2.000 \text{ lux}}{1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sr}} \cong 16 \cdot 10^6 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$$

Como se supera el límite de luminancia, entonces no puede obviarse el cálculo correspondiente a los riesgos retinianos.

El valor límite de exposición al ultravioleta es $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. A partir de los valores calculados en el ejercicio 2.2, el tiempo máximo de exposición para una irradiancia efectiva de $E_{\text{eff}} = 30 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ es superior a 8 horas.

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{30 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}} = 10^6 \text{ s} \cong 11 \text{ días y } 14 \text{ horas}$$

De la misma forma, el valor límite de la exposición al UVA (grupo 2) es $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Igual que antes, partiendo de los resultados del ejercicio 2.2 el tiempo máximo de exposición para una irradiancia de $E_{\text{UVA}} = 1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ es superior a 8 horas.

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} = 10^7 \text{ s} \cong 115 \text{ días y } 18 \text{ horas}$$

En cuanto a los riesgos retinianos, es necesario calcular la radiancia a partir de los datos de irradiancia.

Se verifica que para un tiempo de exposición « $10 \text{ s} \leq t < 10.000 \text{ s}$ » los valores de los ángulos plano y sólido son mayores que los mínimos del anexo E mientras que para un tiempo « $t > 10.000 \text{ s}$ » dichos valores son inferiores a los mínimos y por lo tanto se deben emplear estos últimos ($\alpha = 0,1 \text{ rad}$ y $\omega = 0,008 \text{ sr}$).

La irradiancia de la exposición a la luz azul (grupo 3^a) para « $t > 10.000 \text{ s}$ » es superior al límite de $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$:

$$L_B \cong \frac{E_B}{\omega} = \frac{2.237 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{0,008 \text{ sr}} \cong 280 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Por lo tanto, el tiempo máximo de exposición se debe calcular de igual forma que en el ejercicio 2.5. Hay que tener presente que al ser la exposición inferior a 1.0000 segundos, se debe utilizar el ángulo sólido real que subtiende la fuente porque es superior al mínimo contemplado en el anexo E para el tiempo de exposición contemplado.

$$L_B = \frac{10^6}{t} \rightarrow t = \frac{10^6}{L_B} = \frac{10^6}{\frac{2.237 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sr}}} \cong 56 \text{ s}$$

El riesgo térmico retiniano asociado a la exposición al visible e infrarrojo (grupo 4) requiere el cálculo de la radiancia a partir del dato de irradiancia del enunciado:

$$L_R \cong \frac{E_R}{\omega} = \frac{24.988 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}}{1,26 \cdot 10^{-4} \text{ sr}} \cong 197,6 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El límite de exposición para « $t > 10 \text{ s}$ » se debe calcular con el coeficiente « $C_a = 12$ » ya que el valor del ángulo plano « α » es igual a 12 mrad. Se comprueba que no se supera el valor límite.

$$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{12} \cong 2.333 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Es decir: la exposición a esta fuente está limitada a 56 segundos por el riesgo de fotorretinitis debido a la luz azul. No obstante, al igual que en el ejercicio 2.5, debido a la elevada luminancia de la fuente, es previsible que la duración de la exposición sea mucho menor. En el resto de bandas (UV, UVA e IRA) no se superan los valores límite.

NOTA

El ángulo de visión se debe tener en cuenta siempre que no se mire la fuente en la dirección normal a la misma. Como resultado, el tamaño aparente de la fuente es menor que el tamaño real y, por lo tanto, la radiación que llega al ojo es menor que si la línea de visión coincidiese con la dirección normal a la fuente.

2.7 Incluyendo un reflector junto a una lámpara de infrarrojos se puede aumentar la eficacia de dicha lámpara para el tratamiento térmico de recubrimiento de suelos. El fabricante de dicho equipo facilita (figura 2.7) los datos de irradiancia « E_R » para la banda de emisión comprendida entre $0,76 \mu\text{m}$ y $1,4 \mu\text{m}$ en función de la distancia de exposición al mismo.

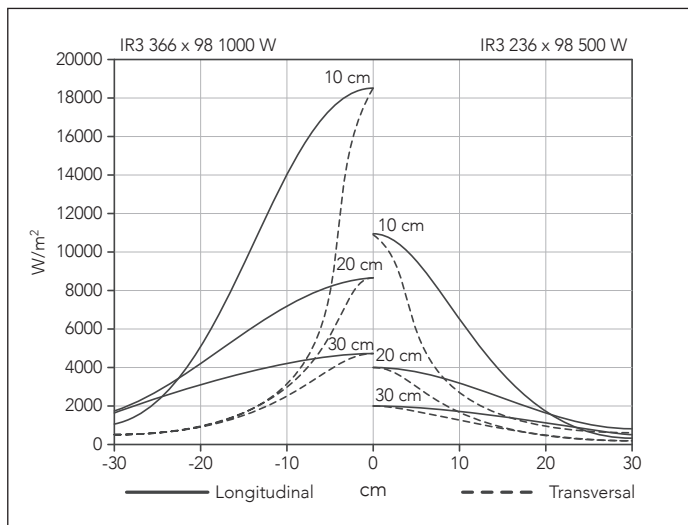


Figura 2.7. Irradiancia en función de la distancia (normal y perpendicular) a la fuente.

Otros datos proporcionados por el fabricante son:

- Longitud del filamento: 280 mm
- Diámetro del filamento: 10 mm
- Potencia: 1.000 W
- Modelo: IR3 366 x 98
- Voltaje: 235 V

¿Cómo se valora la exposición a esta fuente de radiación?

SOLUCIÓN

La emisión de este tipo de lámparas suele estar limitada al infrarrojo cercano: el rango $0,76 \mu\text{m} - 1,4 \mu\text{m}$ corresponde a la banda del IRA (ejercicio 1.1). En todo caso, la emisión de radiación ultravioleta es inexistente a efectos prácticos por lo que quedan descartados los grupos 1, 2 y 3 del anexo I del Real Decreto 486/2010. Del resto de grupos, el 5 y el 6 corresponden a fuentes que emiten únicamente en el IRA, pero como estas lámparas emiten (poca) radiación visible (porque se puede ver color rojo en el foco de emisión) los límites de exposición aplicables son

los correspondientes a los grupos 4 y 7. Así mismo, la exposición máxima (irradiancia máxima) corresponde a aquella en la que la distancia a la fuente es de 10 cm en la dirección normal al punto central de la fuente, de forma que el ángulo de visión es de 0 radianes.

Como se trata de una fuente oblonga, el ángulo plano se calcula a partir de la dimensión promedio (Z):

$$Z = \frac{280 + 10}{2} = 145 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{Z}{d} = \frac{145 \text{ mm}}{10 \text{ cm}} = 1,45 \text{ rad}$$

El ángulo sólido para el cálculo de la radiancia se calcula de forma aproximada mediante la expresión del ejercicio 1.4. Para tiempos de 10 segundos, este valor es superior al mínimo contemplado en el anexo E y, por lo tanto, es el que debe utilizarse luego para el cálculo de la radiancia del valor límite del grupo 4:

$$\omega \cong \frac{A_s}{d^2} = \frac{280 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}{(10 \text{ cm})^2} = 0,28 \text{ sr}$$

Según los datos radiométricos suministrados por el fabricante y representados gráficamente en la figura 2.7, a una distancia de 10 cm y en el nadir de la fuente la irradiancia aproximada es $E_R = 18,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. De esta forma (ejercicio 1.7), la radiancia toma el valor de:

$$L_R \cong \frac{E_R}{\omega} = \frac{18,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}}{0,28 \text{ sr}} \cong 65,7 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El valor del límite « L_R » es el correspondiente a « $t > 10 \text{ s}$ » con « $C_a = 100$ » porque el ángulo plano subtendido ($\alpha = 1,45 \text{ rad}$) es superior a 100 mrad; de forma que este toma un valor « L_R » de $280 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. Así pues, se comprueba que no se supera el valor límite.

Con respecto al riesgo de quemaduras en piel, debe aplicarse el límite correspondiente al grupo 7.

$$H_{\text{piel}} = 20.000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}, \text{ para } t < 10 \text{ s}$$

El tiempo máximo de exposición puede estimarse a partir de la relación entre la exposición radiante y la irradiancia ($H_{\text{piel}} = E \cdot t$), de forma que dicho tiempo es igual a:

$$H_{\text{piel}} = E \cdot t = 20.000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$t = \left(\frac{20.000}{E} \right)^{\frac{4}{3}}$$

Sustituyendo el valor de irradiancia de $18,4 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ se obtiene un tiempo de:

$$t = \left(\frac{20.000}{18,4 \cdot 10^3} \right)^{\frac{4}{3}} = 1,1 \text{ s}$$

NOTA

Habitualmente y salvo casos particulares como el planteado en el ejercicio 2.8, las fuentes de radiación infrarroja suelen emitir en el IRA y en el visible por lo que, en estos casos, no suele ser necesario aplicar los límites 5 y 6.

2.8 Para controlar el proceso de producción en una fundición de hierro, el horno principal, que constituye la fuente de exposición a la que están sometidos los trabajadores, está provisto de una apertura circular de 70 cm de diámetro. La temperatura del horno, medida con un pirómetro óptico, es de 1.480°C .

Se dispone de un radiómetro digital cuya sensibilidad está dentro del rango espectral comprendido entre 750 y 1.150 nm. Debido a las altas temperaturas, la radiación IRB no puede despreciarse. Por ello, se ha utilizado un modelo matemático basado en la ley de Planck de radiación del cuerpo negro junto con los valores medidos por el radiómetro. Se han obtenido los valores que se muestran en la tabla 14 en función de la distancia al horno.

Tabla 14

Distancia m	E_{IR} $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
1,20	1,33
1,41	0,98
1,70	0,50
2,00	0,45
2,23	0,09
2,70	0,06

Valorar el riesgo, en una jornada de 8 horas, de los trabajadores de la fundición debido a la exposición a las radiaciones ópticas procedentes del metal fundido.

SOLUCIÓN

En este tipo de exposiciones las temperaturas son muy elevadas y por eso la radiación del IRB e incluso la del IRC son muy importantes. Los riesgos principales derivados de la exposición a radiación de fuentes a tan elevada temperatura son las cataratas así como posibles quemaduras en la piel. Por todo esto, los límites de exposición más importantes son los correspondientes a los grupos 6 y 7. La

situación de máxima exposición corresponde a aquella en la que la línea de visión coincide con la normal de la fuente.

En el grupo 6, el límite de irradiancia es $E_{\text{IR}} = 100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para « $t > 1.000 \text{ s}$ » y $E_{\text{IR}} = 18\cdot t^{-0,75} \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ para « $t \leq 1.000 \text{ s}$ » (ver los comentarios al final de la solución). El valor mínimo de irradiancia medido a una distancia de 2,7 metros es de $0,06 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ que es 6 veces el valor límite para « $t > 1.000 \text{ s}$ ». Es decir: la exposición debe ser inferior a 1.000 segundos para que no se supere el límite y se debe utilizar el valor límite « $18\cdot t^{-0,75} \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ » para estimar el tiempo máximo de exposición, tal y como se muestra en la tabla 15 y en la figura 2.8 para cada una de las mediciones realizadas:

$$t = \left(\frac{E_{\text{IR}}}{18.000} \right)^{-\frac{4}{3}}$$

Tabla 15

Distancia m	E_{IR} $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	Tiempo s
1,20	1,33	1,5
1,41	0,98	2,2
1,70	0,50	5,5
2,00	0,45	6,3
2,23	0,09	54,3
2,70	0,06	93,2

En la figura 2.8 se observa que el mayor tiempo de exposición se da a una distan-

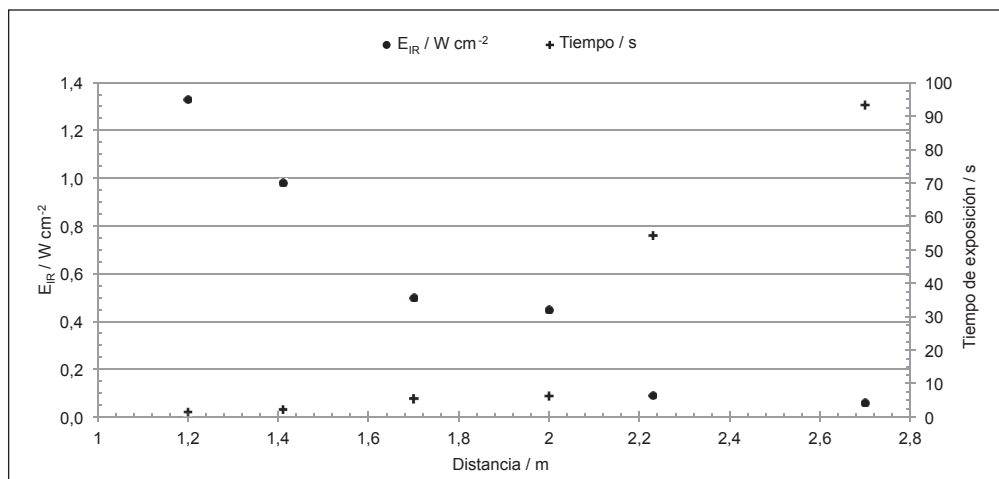


Figura 2.8. Tiempo máximo de exposición (grupo 6) en función de la distancia al horno.

cia de 2,7 m si bien es cierto que dicho tiempo es tan pequeño que en una jornada de trabajo de 8 horas se superará este límite de exposición.

En relación con el riesgo de quemaduras en la piel, es de aplicación el valor límite correspondiente al grupo 7. De la misma forma que se hizo en el ejercicio 2.7, el tiempo máximo de exposición viene dado por:

$$t = \left(\frac{20.000}{E} \right)^{\frac{4}{3}}$$

El tiempo máximo de exposición para cada una de las mediciones realizadas se muestra en la tabla 16 y en la figura 2.9.

Se observa que los tiempos máximos de exposición son similares a los correspondientes al grupo 6. De esta forma es posible concluir que en una jornada laboral de 8 horas los trabajadores superarán los límites máximos de exposición tanto

Tabla 16

Distancia m	E_{IR} $W \cdot cm^{-2}$	Tiempo s
1,20	1,33	1,7
1,41	0,98	2,6
1,70	0,50	6,3
2,00	0,45	7,3
2,23	0,09	62,5
2,70	0,06	107,3

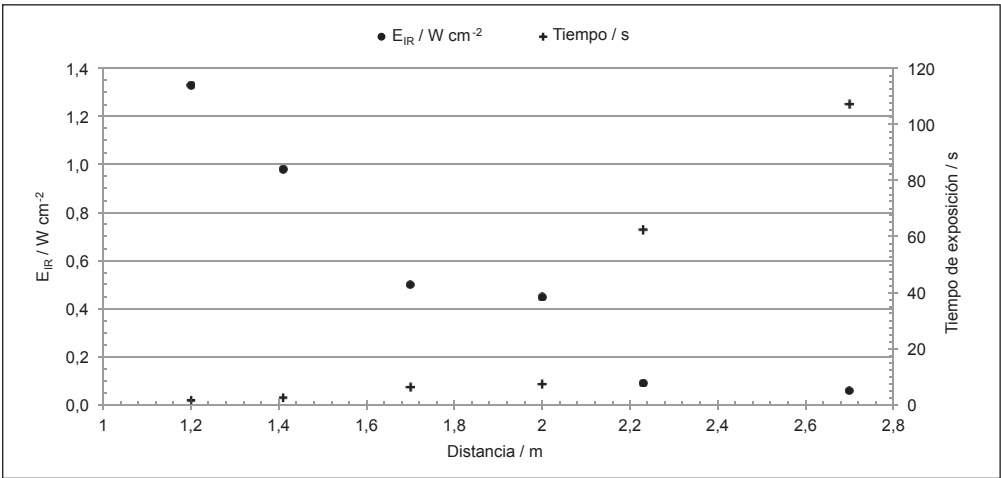


Figura 2.9. Tiempo máximo de exposición (grupo 7) en función de la distancia al horno.

para el riesgo de quemaduras en la piel como para el riesgo de quemaduras en la córnea y la formación de cataratas.

NOTA

De forma adicional y debido a los elevados niveles de radiación existentes en la fundición y a que una pequeña parte de esta se emite en la zona del visible (el color rojo del hierro fundido) sería recomendable medir y valorar la radiación correspondiente a la banda del visible, es decir, comprobar que no se sobrepasa el límite de exposición correspondiente al grupo 4.

Se ha tomado $E_{\text{IR}} = 18 \cdot t^{0.75} \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ como el límite de exposición del grupo 6 para tiempos inferiores a 1.000 segundos, siguiendo las recomendaciones del IC-NIRP (*International commission on non-ionizing radiation protection*). Tanto la Directiva 2006/25/CE como su transposición a través del Real Decreto 486/2010 establecen el límite como $E_{\text{IR}} = 18 \cdot t^{0.75} \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. No obstante, este límite es incoherente ya que tanto la irradiancia como la radiancia máxima permitida deben disminuir a medida que aumenta el tiempo de exposición. Se trata por tanto de un error en la transposición desde la expresión publicada por el ICNIRP a las disposiciones legales mencionadas. Por ello se considera la propuesta del IC-NIRP como la más adecuada para la valoración de la exposición en esta banda de longitud de onda.

2.9 Según los resultados de exposición radiante, irradiancia y radiancia calculados en el ejercicio 1.12 mediante la aproximación del sol a un cuerpo negro con una temperatura radiante (T) de 5.780 K, ¿cómo deberá valorarse la exposición al astro rey en el rango de longitudes de onda correspondientes a las radiaciones ópticas?

SOLUCIÓN

Partiendo de los valores calculados en el ejercicio 2.2, el tiempo máximo de exposición es de 1 segundo. Formalmente, dicho tiempo puede calcularse como:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{24,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \cong 1,2 \text{ s}$$

De la misma forma, el tiempo máximo de exposición al UVA (grupo 2) es de 90,6 segundos:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{110,41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \cong 90,6 \text{ s}$$

Para valorar los riesgos retinianos hay que tener en cuenta los ángulos subtendidos por el sol. En el ejercicio 1.12 se dio una aproximación del ángulo sólido que subtiende el sol respecto de un observador situado en la superficie

terrestre: $\omega = 6,8 \cdot 10^{-5}$ sr. En esta situación en la que se ha aproximado el disco solar a un casquete esférico, la relación entre el ángulo sólido y el ángulo plano viene dada por (ver ejercicio 1.4):

$$\omega \cong \frac{\pi}{4} \alpha^2 \rightarrow \alpha \cong \sqrt{\omega \frac{4}{\pi}}$$

Por lo tanto, el ángulo plano que subtiende el disco solar es $\alpha = 9,3$ mrad. A pesar de que este valor es inferior a 11 mrad, y dado que el ojo no está fijado médicamente, la variable radiométrica que se debe utilizar es la radiancia (grupo 3a). Dicho valor, calculado en el ejercicio 1.12 mediante la ley de Planck, es $L_B = 1.802.925,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ en el rango 300-700 nm. Por lo tanto, el tiempo máximo de exposición es de 0,55 segundos:

$$L_B = \frac{10^6}{t} \rightarrow t = \frac{10^6}{L_B} \rightarrow t = \frac{10^6}{1.802.925,24} = 0,55 \text{ s}$$

La exposición correspondiente al rango del visible y del IRA (grupo 4) se evalúa con la radiancia. Al igual que en el caso de la luz azul, el ángulo plano bajo el cual se ve el disco solar es $\alpha = 9,3$ mrad. El valor límite varía en función del tiempo de exposición:

$$\text{Si } t > 10 \text{ s} \rightarrow L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_a} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$\text{Si } 10 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s} \rightarrow L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a \cdot t^{0,25}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad C_a = 9,3$$

$$\text{Si } t < 10 \mu\text{s} \rightarrow L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_a} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El valor de la radiancia calculado en el ejercicio 1.12 para el rango 380-1.400 nm es $L_R = 2,44 \cdot 10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ de forma que, al superarse el valor límite para $t < 10 \mu\text{s}$, el tiempo de exposición está comprendido entre $10 \mu\text{s}$ y 10 s. El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a \cdot t^{0,25}} \rightarrow t = \left(\frac{5 \cdot 10^7}{C_a \cdot L_R} \right)^{\frac{4}{3}} = \left(\frac{5 \cdot 10^7}{9,3 \cdot 2,44 \cdot 10^7} \right)^{\frac{4}{3}} \cong 0,13 \text{ s}$$

Si bien no sería necesario comprobar el límite del grupo 5 porque el sol no emite de forma exclusiva en el infrarrojo, a título de ejemplo se realiza dicha verificación. El cálculo es muy similar al correspondiente al grupo 4, aunque en este caso el coeficiente « C_a » toma el valor de 11 porque « $\alpha = 9,3$ mrad». El valor límite de exposición depende del tiempo de exposición de la siguiente forma:

$$\text{Si } t > 10 \text{ s} \rightarrow L_R = \frac{6 \cdot 10^6}{C_a} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$\text{Si } 10 \mu\text{s} \leq t \leq 10 \text{ s} \rightarrow L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a \cdot t^{0,25}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \quad C_a = 11$$

$$\text{Si } t < 10 \mu\text{s} \rightarrow L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_a} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

La radiancia calculada en el rango del IRA (780-1.400 nm) es $L_R = 1,76 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. Este valor es superior al límite para « $t > 10 \text{ s}$ » e inferior al límite para « $t < 10 \mu\text{s}$ » por lo que el tiempo de exposición estará comprendido entre $10 \mu\text{s}$ y 10 s y se puede calcular como:

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_a \cdot t^{0,25}} \rightarrow t = \left(\frac{5 \cdot 10^7}{C_a \cdot L_R} \right)^4 = \left(\frac{5 \cdot 10^7}{11 \cdot 1,76 \cdot 10^6} \right)^4 \cong 44,4 \text{ s}$$

El riesgo de quemaduras en piel se valora con el valor límite de exposición radiante del grupo 7. Dicho límite toma el valor $H_{\text{piel}} = 20.000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ de donde puede obtenerse el tiempo máximo que puede mantenerse la exposición. Como este valor límite es válido únicamente para tiempos menores de 10 segundos, siempre que se obtenga un tiempo superior a 10 segundos significa que no se supera el valor límite.

$$H_{\text{piel}} = E_{\text{piel}} \cdot t = 20.000 \cdot t^{0,25} \rightarrow t = \left(\frac{20.000}{E_{\text{piel}}} \right)^{\frac{4}{3}}$$

El valor de irradiancia obtenido en el ejercicio 1.12 es $E_{\text{piel}} = 1.203,70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ de forma que el tiempo de exposición es:

$$t = \left(\frac{20.000}{1.203,70} \right)^{\frac{4}{3}} = 42,4 \text{ s}$$

Por lo tanto se puede concluir que no se supera el valor límite de exposición correspondiente al rango que va de 380 nm a 3.000 nm.

De igual forma que se comprobó el límite del grupo 5 a modo de ejemplo, se hace lo mismo para el grupo 6 a pesar de que dicho límite está enfocado a las fuentes de radiación que emiten únicamente en el infrarrojo. Como la irradiancia calculada en el ejercicio 1.12 para esta banda (780 nm – 3.000 nm) es $E_{\text{IR}} = 566,12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ y supera el valor límite de $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ correspondiente a tiempos de exposición superiores a 1000 segundos, entonces debe utilizarse el límite para tiempos inferiores:

$$E_{\text{IR}} = 18.000 \cdot t^{-0,75} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$t = \left(\frac{18.000}{E_{\text{IR}}} \right)^{\frac{4}{3}} = \left(\frac{18.000}{566,12} \right)^{\frac{4}{3}} = 100,7 \text{ s}$$

NOTA

Se observa que las bandas más limitantes son las correspondientes al visible e IRA. Este resultado parece lógico a la vista de la figura D.2 del anexo D donde se comprueba que la máxima irradiancia corresponde a esa zona.

No debe olvidarse que estos resultados responden a un modelo del sol como cuerpo negro y, por lo tanto, representan la radiación del sol sobre la Tierra si no existiese atmósfera. La atmósfera y los diferentes gases que contiene absorben parte de la radiación solar de forma que a la superficie sólo llega una fracción de la radiación original.

2.10 Identificar y valorar la exposición al UVA de una fuente industrial. Debido a la naturaleza del proceso, la radiación emitida por dicha fuente es variable. Por ello, se estima oportuno realizar varias mediciones de forma consecutiva con un radiómetro, obteniéndose los valores que se muestran en la tabla 17.

¿Cuál es el tiempo máximo de exposición?

Tabla 17

Medición	E_{UVA} $W \cdot m^{-2}$
1	2,1
2	2,4
3	1,9
4	2,8
5	2,3
6	2,9
7	2,7

SOLUCIÓN

En los procesos de evaluación en los que se realizan varias mediciones no es recomendable la obtención del promedio de los valores medidos, salvo excepciones especialmente justificadas. La media aritmética de un conjunto de valores no proporciona información suficiente para valorar adecuadamente el riesgo de exposición ya que, si bien representa el punto central del conjunto, no contiene la información relativa a la dispersión de dichos datos. Por ello, es preferible utilizar un rango de valores antes que la media.

El rango de los datos de irradiancia del enunciado puede expresarse bien como un mínimo y un máximo o bien como un valor central con una desviación:

$$1,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \leq E_{UVA} \leq 2,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$
$$E_{UVA} = 2,4 \pm 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Es decir: la irradiancia de la fuente evaluada está comprendida entre $1,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y $2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. De esta forma es posible afirmar que la exposición máxima que recibe un trabajador es de $2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y que el tiempo máximo de exposición viene limitado por dicho valor. Si bien una estimación aproximada de dicho tiempo puede obtenerse a través de la representación gráfica de la figura 2.2 del ejercicio 2.2, también se puede calcular formalmente de la siguiente forma:

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}}{2,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}} \approx 3.448 \text{ s} \approx 57 \text{ minutos y } 28 \text{ segundos}$$

Si se hubiese calculado el tiempo de exposición a partir de la media aritmética de la irradiancia ($E_{\text{UVA}} = 2,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), se hubiese obtenido un resultado de 4.094 segundos (aproximadamente 1 hora y 8 minutos). Si, por el contrario, se hubiese calculado el promedio de los tiempos de exposición de cada uno de los valores de irradiancia medidos, se hubiese obtenido un resultado de 4.180 segundos (aproximadamente 1 hora y 10 minutos). Es decir: cualquiera de estas dos estrategias habría dado un tiempo de exposición mayor que el calculado para la irradiancia máxima, que constituye el valor que proporciona una mayor protección.

NOTA

Cuando se realizan varias mediciones consecutivas de una misma fuente de radiación se está valorando, parcialmente, la incertidumbre asociada. No obstante, en los siguientes ejercicios se muestran otras formas de contemplar otros factores de incertidumbre que afectan al resultado de la evaluación así como su propagación en el proceso de cálculo.

2.11 Una fuente emite exclusivamente en la banda del visible, siendo despreciable la emisión de radiación ultravioleta e infrarroja. Se desea valorar la exposición únicamente a esta banda (grupo 3 del anexo I del Real Decreto 486/2010).

Para ello, se dispone de un radiómetro con un trípode y una cinta métrica. Se sitúa el radiómetro montado en el trípode a una distancia de 1 metro en la dirección normal a la fuente de emisión. En estas condiciones, se estima que la precisión de la ubicación del radiómetro es $\pm 1 \text{ cm}$. Con la misma cinta métrica se mide el radio de la fuente, siendo el error de lectura de la cinta de $\pm 0,2 \text{ cm}$. Así mismo, la ficha técnica del radiómetro facilitada por el fabricante informa de que el error mínimo de la irradiancia de dicho instrumento es de $\pm 10 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. En estas condiciones, se ha realizado una medición de la irradiancia de la luz azul, obteniéndose:

- Radio de la fuente: $6,5 \text{ cm}$
- Distancia de medición: 100 cm
- $E_{\text{B}} = 130 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$

Sabiendo que la luminancia de la fuente es $L_{\text{v}} = 1,18 \cdot 10^4 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, ¿cómo debe valorarse la exposición a esta fuente?

SOLUCIÓN

La incertidumbre o error de una medida es el parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a dicha magnitud. Un análisis exhaustivo de la incertidumbre requiere evaluar todas las fuentes de incertidumbre, estimando los factores individuales y calculando la propagación de cada uno de ellos en el resultado final.

Tanto en este ejercicio como en los siguientes, el análisis de la incertidumbre se limitará al cálculo de la transmisión del error de las variables numéricas utilizadas para valorar la exposición, dejando de lado aquellas variables no utilizadas directamente para calcular la irradiancia, radiancia y tiempo de exposición. Los métodos clásicos de transmisión del error cumplen con esta finalidad ya que, partiendo del error de las variables independientes de una función, calculan cómo influyen y en qué medida en la variable dependiente correspondiente.

La radiancia para la luz azul se puede estimar de la siguiente forma (ejercicio 2.4):

$$L_B \cong \frac{E_B}{\omega} \cong \frac{E_B}{\frac{A_S}{d^2}} = \frac{E_B}{\frac{\pi r^2}{d^2}} = E_B \frac{d^2}{\pi r^2}$$

Suponiendo que los errores experimentales son pequeños, estos pueden asimilarse a diferenciales de forma que la transmisión del error de la función radiancia es igual a la suma de los valores absolutos de las derivadas parciales de las variables. Es decir: para el caso de la radiancia de la luz azul se tiene que:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{L_B} &= \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial L_B}{\partial x_i} \right| \varepsilon_{x_i} \\ \varepsilon_{L_B} &= \left| \frac{d^2}{\pi r^2} \right| \varepsilon_{E_B} + \left| \frac{E_B 2d}{\pi r^2} \right| \varepsilon_d + \left| \frac{E_B d^2 - 2r}{\pi r^4} \right| \varepsilon_r = \left| \frac{E_B d^2}{\pi r^2} \right| \left(\frac{1}{|E_B|} \varepsilon_{E_B} + 2 \frac{1}{|d|} \varepsilon_d + 2 \frac{1}{|r|} \varepsilon_r \right) \\ \varepsilon_{L_B} &= |L_B| \left(\frac{1}{|E_B|} \varepsilon_{E_B} + 2 \frac{1}{|d|} \varepsilon_d + 2 \frac{1}{|r|} \varepsilon_r \right) \end{aligned}$$

Sabiendo que el error absoluto « ε » de la suma o diferencia de dos variables es igual a la suma de los errores absolutos y que el error relativo « e » del producto o división de dos variables es igual a la suma de los errores absolutos del numerador y del denominador, se puede desarrollar la expresión de la radiancia aplicando estas reglas y sin necesidad de calcular las derivadas parciales. De esta forma, teniendo en cuenta que los errores absoluto y relativo están relacionados mediante $\varepsilon_x = |x|e_x$, se obtiene la siguiente expresión que es equivalente a la anteriormente deducida:

$$e_{L_B} = e_{E_B} + 2e_d + 2e_r$$

Dado que tanto el error de medición, como los de lectura de la cinta son errores absolutos, es preferible utilizar la fórmula expresada en estos términos. Sustituyendo los valores del enunciado para el cálculo de la radiancia y de su error absoluto, se obtiene:

$$L_B \cong E_B \frac{d^2}{\pi r^2} = 130 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \frac{(100 \text{ cm})^2}{\pi (6,5 \text{ cm})^2} \cong 9,79 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$\varepsilon_{L_B} = |L_B| \left(\frac{1}{|E_B|} \varepsilon_{E_B} + 2 \frac{1}{|d|} \varepsilon_d + 2 \frac{1}{|r|} \varepsilon_r \right)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{L_B} &= 9,79 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \left(\frac{1}{130 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} + 2 \frac{1}{100 \text{ cm}} 1 \text{ cm} + 2 \frac{1}{6,5 \text{ cm}} 0,2 \text{ cm} \right) = \\ &= 1,55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \end{aligned}$$

De esta forma, el intervalo de la radiancia de la luz azul viene dado por:

$$L_B = 9,79 \pm 1,55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$8,24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \leq L_B \leq 11,34 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Como el valor límite en esta banda es de « $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ » (el ojo no está fijado médicamente), se comprueba que no se supera dicho límite porque no está contenido en el intervalo anteriormente calculado.

NOTA

El cálculo formal de la transmisión de errores en una función se realiza mediante el sumatorio de las derivadas parciales siempre y cuando dichos errores sean pequeños. No obstante, en ocasiones resulta más práctica la descomposición por partes de la función en sumas y productos para poder aplicar las dos reglas básicas del error de una suma y el error de un producto. En cualquier caso, ambos procedimientos dan como resultado la misma expresión.

2.12 Se desea evaluar de nuevo la exposición a la fuente del ejercicio 2.11. No obstante, esta vez se realizan varias mediciones que se llevan a cabo en días diferentes. Es decir: cada día se monta el equipo de medición y, después, se recoge. Se han obtenido los valores de irradiancia que se muestran en la tabla 18. Tanto la luminancia de la fuente, como el radio de la fuente y la distancia de medición son iguales a las anteriores:

- Radio de la fuente: $6,5 \pm 0,2 \text{ cm}$
- Distancia de medición: $100 \pm 1 \text{ cm}$
- Luminancia (L_v): $1,18 \cdot 10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$

¿Cómo se valora la exposición a esta fuente en la banda de la luz azul?

Tabla 18

Día	E_B $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$
1	132
2	143
3	129
4	138
5	119
6	126
7	135

SOLUCIÓN

La diferencia con el ejercicio 2.11 radica en el hecho de que no se realiza una única medición sino que se realizan varias, de forma que los datos obtenidos están sujetos a más fuentes de variabilidad que en el ejercicio anterior. Es decir: si bien en el ejercicio 2.11 la incertidumbre de la irradiancia estaba determinada por las especificaciones técnicas del fabricante, en este ejercicio la incertidumbre está determinada por la variabilidad del proceso de medición.

Partiendo de los datos de la tabla 18, el intervalo asociado a la irradiancia viene dado por:

$$E_B = 131 \pm 12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

Siguiendo el mismo razonamiento que en el ejercicio anterior, el valor medio de la radiancia se puede aproximar mediante la siguiente expresión:

$$L_B \cong E_B \frac{d^2}{\pi r^2} = 131 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \frac{(100 \text{ cm})^2}{\pi (6,5 \text{ cm})^2} \cong 9,87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Para estimar la incertidumbre asociada a las mediciones, se puede utilizar la ecuación desarrollada en el ejercicio 2.11:

$$\varepsilon_{L_B} = |L_B| \left(\left| \frac{1}{E_B} \right| \varepsilon_{E_B} + 2 \left| \frac{1}{d} \right| \varepsilon_d + 2 \left| \frac{1}{r} \right| \varepsilon_r \right)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{L_B} &= 9,87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \left(\frac{1}{131 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} 12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} + 2 \frac{1}{100 \text{ cm}} 1 \text{ cm} + 2 \frac{1}{6,5 \text{ cm}} 0,2 \text{ cm} = \right. \\ &\quad \left. = 1,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \right) \end{aligned}$$

Por lo tanto, el intervalo de la radiancia tiene como punto central el valor de L_B siendo el error absoluto la amplitud del mismo:

$$L_B = 9,87 \pm 1,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$8,16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \leq L_B \leq 11,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Como el intervalo así obtenido no contiene el valor límite de $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, se puede concluir que no se supera dicho límite.

NOTA

En relación con el ejercicio 2.11, en este se dispone de una serie de valores medidos a lo largo del tiempo mientras que con el primero sólo se dispone del error de medición del instrumento utilizado. De esta forma, se obtiene un intervalo de resultados que recoge, entre otros, las variaciones aleatorias que afectan al proceso de medición. Por ello, siempre que se quiera considerar el máximo número de aleatoriedades, es recomendable hacer varias mediciones.

2.13 Sea una luminaria industrial rectangular, compuesta por tubos de descarga y un reflector de aluminio anodizado, cuya luminancia es igual a $32 \cdot 10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Las mediciones se realizan a 300 ± 1 centímetros de distancia, en la dirección normal a la superficie de la fuente y en el nadir de la misma. Se han obtenido los siguientes valores:

- Dimensiones: $a = 60 \text{ cm}$, $b = 120 \text{ cm}$
- Irradiancia efectiva (E_{eff}): $835 \pm 10 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia UVA (E_{UVA}): $1,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \pm 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (luz azul) (E_b): $9,44 \pm 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
- Irradiancia efectiva (efecto térmico) (E_r): $15,73 \pm 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Valorar la exposición a dicha fuente teniendo en cuenta los errores asociados a las variables experimentales.

SOLUCIÓN

Este tipo de luminarias emite radiación tanto en el rango del ultravioleta como del visible, siendo despreciable la posible emisión en la banda del infrarrojo. Como la luminancia es superior a $10^4 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ es necesario evaluar la exposición correspondiente a los riesgos retinianos.

El valor límite del grupo 1 correspondiente a la exposición al ultravioleta es $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. De acuerdo con el gráfico de la figura 2.1 del ejercicio 2.2, el tiempo máximo de exposición para una irradiancia efectiva de $E_{\text{eff}} = 835 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ es superior a 8 horas. No obstante, es preferible realizar el cálculo formal para, más tarde, poder calcular el error.

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{eff}}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{835 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-2}} \approx 35,928 \cdot 10^3 \text{ s} \approx 9 \text{ horas y } 59 \text{ minutos}$$

La transmisión del error en la expresión anterior puede calcularse directamente aplicando la regla según la cual el error relativo de un producto o de una división es la suma de errores relativos del numerador y del denominador (ejercicio 2.11). Aplicando esta regla y convirtiendo los errores relativos en absolutos se obtiene:

$$e_{t_{\text{exp}}} = e_{H_{\text{eff}}} + e_{E_{\text{eff}}}$$

$$\varepsilon_{t_{\text{exp}}} = |t_{\text{exp}}| \left(\frac{1}{|H_{\text{eff}}|} \varepsilon_{H_{\text{eff}}} + \frac{1}{|E_{\text{eff}}|} \varepsilon_{E_{\text{eff}}} \right)$$

« H_{eff} » no es una variable sino que es una constante cuyo valor ha sido establecido en base a criterios experimentales y, por lo tanto, tiene asociado un error. Por el contrario, si se tratase de una constante de valor teórico, entonces el error asociado sería 0. Si bien el Real Decreto 486/2010 no proporciona los errores de las constantes utilizadas en los valores límite, porque no se conocen, en la resolución de este ejercicio se ha supuesto que como mínimo el error es el estimado en base a las cifras significativas de las mismas. De esta forma, en este caso se supone que $H_{\text{eff}} = 30 \pm 0,5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ y, por lo tanto, el intervalo del tiempo de exposición es:

$$\varepsilon_{t_{\text{exp}}} = 35,928 \cdot 10^3 \text{ s} \left(\frac{1}{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}} 0,5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} + \frac{1}{835 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \right) = 728 \text{ s}$$

$$t_{\text{exp}} = 35,928 \cdot 10^3 \pm 728 \text{ s}$$

$$35.200 \text{ s} \leq t_{\text{exp}} \leq 36.656 \text{ s}$$

$$9 \text{ horas y } 47 \text{ minutos} \leq t_{\text{exp}} \leq 10 \text{ horas y } 11 \text{ minutos}$$

Se sigue el mismo procedimiento para el valor límite del grupo 2 (exposición al UVA), con $H_{\text{UVA}} = 10^4 \pm 0,5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Como la expresión matemática para el cálculo del tiempo de exposición es igual al caso anterior, se puede utilizar directamente la misma expresión del error.

$$t_{\text{exp}} = \frac{H_{\text{UVA}}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{1,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} \approx 8.696 \text{ s} \approx 2 \text{ horas y } 25 \text{ minutos}$$

$$\varepsilon_{t_{\text{exp}}} = 8.696 \text{ s} \left(\frac{1}{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}} 0,5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} + \frac{1}{1.150 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}} 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \right) \approx 76 \text{ s}$$

$$t_{\text{exp}} = 8.696 \pm 76 \text{ s}$$

$$8.620 \text{ s} \leq t_{\text{exp}} \leq 8.772 \text{ s}$$

$$2 \text{ horas y } 24 \text{ minutos} \leq t_{\text{exp}} \leq 2 \text{ horas y } 26 \text{ minutos}$$

Para valorar la exposición relativa a los riesgos retinianos, es necesario calcular los parámetros geométricos de la fuente. La dimensión promedio de la fuente, el ángulo plano « α » y el ángulo sólido « ω » que subtiende la fuente respecto del punto de medición son:

$$Z = \frac{a+b}{2} = \frac{120 \text{ cm} + 60 \text{ cm}}{2} = 90 \text{ cm}$$

$$\alpha = \frac{90 \text{ cm}}{300 \text{ cm}} = 0,3 \text{ rad}$$

El ángulo sólido calculado es mayor que los ángulos mínimos del anexo E de forma que se utilizará este valor para aproximar la radiancia a partir de la irradiancia en los riesgos retinianos.

La radiancia de la exposición a la luz azul para $t > 10.000 \text{ s}$ es:

$$\omega \cong \frac{A_s}{d^2} = \frac{a \cdot b}{d^2} = \frac{120 \text{ cm} \cdot 60 \text{ cm}}{(300 \text{ cm})^2} = 0,08 \text{ sr}$$

La radiancia así calculada es mayor que el valor límite $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ (porque $\alpha \geq 11 \text{ mrad}$ y el ojo no está fijado médicamente) para tiempos de exposición superiores a 10^4 segundos. Por lo tanto, para calcular el tiempo máximo de exposición se utiliza la siguiente expresión:

$$L_B \cong \frac{E_B}{\omega} = \frac{9,44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{0,08 \text{ sr}} = 118 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El error asociado se obtiene desarrollando la expresión anterior tal y como se ha hecho para calcular el error de la exposición a la radiación ultravioleta, es decir:

$$L_B = \frac{10^6}{t} \rightarrow t = \frac{10^6}{L_B} = \frac{10^6}{\frac{9,44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{0,08 \text{ sr}}} \cong 8.475 \text{ s} \cong 2 \text{ horas y } 21 \text{ segundos}$$

El valor 10^6 es una constante experimental y, de nuevo, no es un valor exacto sino que tiene un error asociado. Al igual que ya se hizo antes, el error de dicha constante se estima en base a las cifras significativas de la misma, es decir, $10^6 \pm 0,5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. De esta forma, el error asociado al tiempo de exposición toma el siguiente valor:

$$e_t = e_{10^6} + e_{L_B} = e_{10^6} + e_{E_B} + e_{\omega} = e_{10^6} + e_{E_B} + e_{A_s} + 2e_d = e_{10^6} + e_{E_B} + e_a + e_b + 2e_d$$

$$\varepsilon_t = \left| t \right| \left(\frac{1}{10^6} \varepsilon_{10^6} + \frac{1}{|E_B|} \varepsilon_{E_B} + \frac{1}{|a|} \varepsilon_a + \frac{1}{|b|} \varepsilon_b + 2 \frac{1}{|d|} \varepsilon_d \right)$$

Por lo tanto, el intervalo del tiempo de exposición para la radiación de la luz azul es:

$$\varepsilon_t = 8.475 \text{ s} \left(\frac{1}{10^6} 0,5 + \frac{1}{9,44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} + \frac{1}{60 \text{ cm}} 0,5 \text{ cm} + \frac{1}{120 \text{ cm}} 0,5 \text{ cm} + 2 \frac{1}{300 \text{ cm}} 1 \text{ cm} \right) \approx 171 \text{ s}$$

Respecto del riesgo térmico retiniano relativo el grupo 4, la radiancia toma el siguiente valor:

$$t_{\text{exp}} = 8.475 \pm 171 \text{ s}$$

$$8.304 \text{ s} \leq t_{\text{exp}} \leq 8.646 \text{ s}$$

$$2 \text{ horas y } 18 \text{ minutos} \leq t_{\text{exp}} \leq 2 \text{ horas y } 24 \text{ minutos}$$

El error asociado se calcula desarrollando por partes la expresión anterior de igual forma que en los casos anteriores:

$$L_R \cong \frac{E_R}{\omega} = \frac{15,73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}{0,08 \text{ sr}} \approx 196,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

Así pues, el intervalo de la radiancia es: $L_R = 196,6 \pm 3,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$

El límite de exposición para « $t > 10 \text{ s}$ » se debe calcular con el coeficiente « $C_a = 100$ » ya que el valor del ángulo plano es superior a 100 mrad ($\alpha = 0,3 \text{ rad}$). Este límite tiene un error asociado porque tanto el numerador como el denominador son constantes experimentales.

$$e_{L_R} = e_{E_R} + e_{\omega} = e_{E_R} + e_{A_s} + 2e_d = e_{E_R} + e_a + e_b + 2e_d$$

$$\varepsilon_{L_R} = |L_R| \left(\frac{1}{|E_R|} \varepsilon_{E_R} + \frac{1}{|a|} \varepsilon_a + \frac{1}{|b|} \varepsilon_b + 2 \frac{1}{|d|} \varepsilon_d \right)$$

Se observa que el intervalo de la radiancia no pertenece al intervalo del valor límite, esto es, no se supera el valor límite:

$$\varepsilon_{L_R} = 196,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \left(\frac{1}{15,73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} + \frac{1}{60 \text{ cm}} 0,5 \text{ cm} + \frac{1}{120 \text{ cm}} 0,5 \text{ cm} + 2 \frac{1}{300 \text{ cm}} 1 \text{ cm} \right)$$

Los resultados obtenidos para cada una de las bandas estudiadas se resumen en la figura 2.10.

Se observa que el tiempo de exposición está determinado por el límite inferior de la luz azul a 2 horas y 18 minutos. Tanto para la banda del UVA como para del UV los límites inferiores de los intervalos son mayores que este valor. La exposición en la banda conjunta del visible y del IRA está muy alejada del límite de exposición y de su intervalo por lo que no se supera dicho límite.

NOTA

Al igual que las variables experimentales tienen un error asociado, ocurre lo mis-

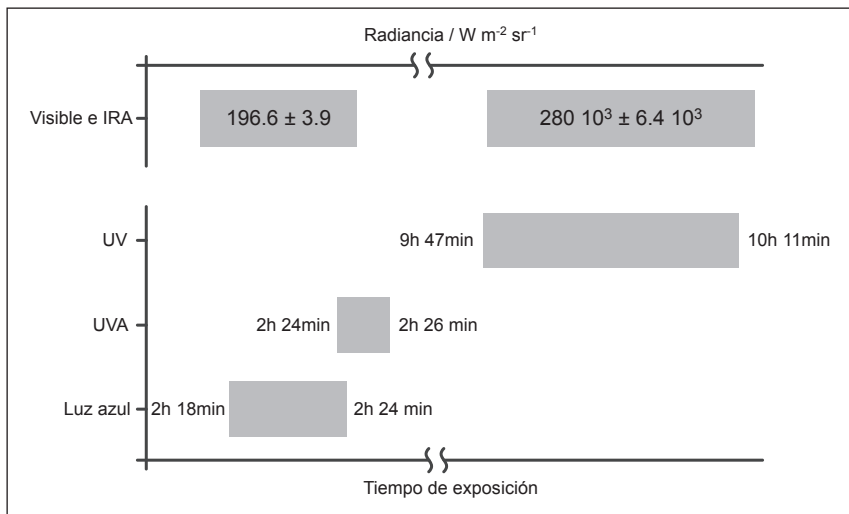


Figura 2.10. Resumen gráfico de resultados.

mo con las constantes numéricas siempre que estas tengan un origen empírico y no teórico. Por ello, los límites de exposición del anexo I del Real Decreto 486/2010 no son valores puntuales sino que representan un intervalo de valores que no debe superarse. Al no conocer el error asociado al valor límite, los autores del mismo, en este caso la ICNIRP (IRPA), suelen aplicar un coeficiente de seguridad, que en principio debe ofrecer protección a la mayoría de la población. Por ello el ejercicio anterior, aunque cumple la misión pedagógica de incitar a la pulcritud de cálculos y mediciones e intentar que los errores de valoración del higienista sean mínimos, no debe llevar a la conclusión errónea de que los valores obtenidos, por ejemplo de tiempo de exposición máximos, son exactamente la barrera entre lo seguro y lo peligroso.

3. CONTROL Y REDUCCIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LAS RADIACIONES ÓPTICAS

3.1 A partir de los datos calculados en el ejercicio 1.12 y con el objetivo de proteger a los trabajadores frente a la exposición a la luz solar en todo el rango del ultravioleta (180-400 nm), se propone utilizar un cristal especialmente diseñado para tal fin. ¿Cuál debería ser el valor de la transmitancia que debe tener dicho cristal para que el tiempo de exposición máximo sea de 1 minuto?

SOLUCIÓN

El tiempo de exposición máximo para esta banda radiométrica viene dado por la expresión del ejercicio 2.9:

$$t = \frac{30}{E_{\text{eff}}}$$

De esta forma, el valor máximo de irradiancia efectiva para un tiempo de exposición de 1 minuto viene dado por:

$$E_{\text{eff}} = \frac{30}{t} = \frac{30}{60} = 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

La transmitancia óptica «T» se define como el cociente de la intensidad que atraviesa un cuerpo entre la intensidad incidente. En el ámbito radiométrico se expresa en términos de intensidad radiante:

$$T = \frac{I_e}{I_{0,e}}$$

Como la distancia respecto del sol es muy grande en relación con el espesor del cristal, se puede hacer la siguiente aproximación (ejercicio 1.5):

$$T = \frac{I}{I_0} \cong \frac{E}{E_0}$$

La irradiancia incidente « E_0 » es la calculada en el ejercicio 1.12 para la banda espectral comprendida entre 180 y 400 nm: $E_{\text{eff}} \cong 24,93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, mientras que el valor de la irradiancia es el calculado para permitir una exposición de 1 minuto.

Sustituyendo ambos valores en la expresión de la transmitancia se obtiene el valor de transmitancia del cristal:

$$T \cong \frac{0,5}{24,93} \cong 0,02 \rightarrow T = 2\%$$

NOTA

Las fuentes radiantes sufren una atenuación en su intensidad a lo largo de su propagación a través de un medio físico. El uso de cristales permite controlar la radiación incidente sobre el trabajador en función de su transmitancia.

3.2 Partiendo de un cristal cuya transmitancia es del 45,73%, ¿cuántos se necesitarían para conseguir la misma atenuación que en el ejercicio 3.1?

SOLUCIÓN

Cuando existen varios medios atenuantes, la transmitancia total se puede descomponer en función de la transmitancia de cada medio (figura 3.1) teniendo en cuenta que la intensidad radiante que atraviesa el medio es igual, a su vez, a la intensidad incidente en el siguiente medio, es decir:

$$I_i = I_{0,i+1}$$

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{I_1}{I_{0,1}} \frac{I_2}{I_{0,2}} \dots \frac{I_n}{I_{0,n}} = T_1 T_2 \dots T_n$$

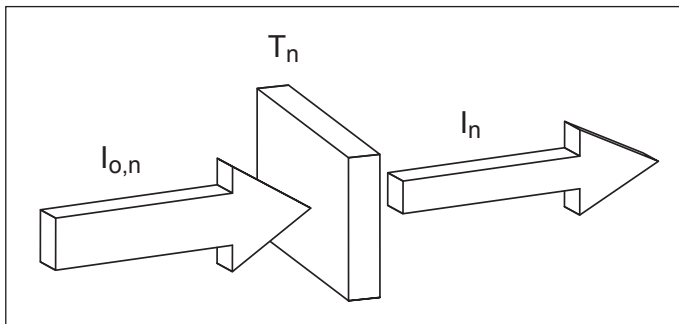


Figura 3.1. Transmitancia del n-ésimo cristal como relación de intensidades radiantes.

Como en este caso todos los cristales tienen la misma transmitancia (T_{cristal}), la expresión anterior queda reducida a:

$$T = T_1 T_2 \dots T_n = T_{\text{cristal}}^n$$

Sustituyendo el valor de transmitancia del cristal dado en el enunciado y el valor

de la transmitancia global calculado en el ejercicio 3.1, se puede obtener el número de cristales necesarios (n):

$$0,4573^n = 0,02$$

$$n = \frac{\log(0,02)}{\log(0,4573)} = 5,00$$

NOTA

Cuando existen varios medios atenuantes de forma consecutiva en el recorrido de la fuente radiante, la transmitancia total es igual a la multiplicación de las transmitancia individual de cada medio.

3.3 Idealmente, un cristal tiene transmitancia media del 91%. Calcular el valor de absorbancia de dicho cristal.

SOLUCIÓN

La absorbancia espectral « A_λ » se define como el logaritmo en base diez de la intensidad incidente entre la intensidad que atraviesa el medio:

$$A_\lambda = \log_{10} \frac{I_0}{I}$$

Teniendo en cuenta que la transmitancia «T» es la relación entre las intensidades a través e incidente:

$$T = \frac{I}{I_0}$$

De esta forma es posible introducir la transmitancia en la expresión de la absorbancia, obteniéndose la siguiente relación entre ambas variables:

$$A = \log_{10} \frac{1}{T}$$

Sustituyendo el valor de transmitancia del enunciado $T = 0,91$ se obtiene la absorbancia correspondiente:

$$A = \log_{10} \frac{1}{0,91} \cong 0,041$$

NOTA

Si bien en el ámbito radiométrico se utiliza más la transmitancia que la absorbancia, ambas magnitudes expresan, de forma diferente pero relacionada, la atenuación que sufre la intensidad radiante al atravesar un medio físico.

3.4 En un cristal con las propiedades de absorbancia calculadas en el ejercicio 3.3, ¿cuál es la pérdida en decibelios?

SOLUCIÓN

En ocasiones se expresa la disminución de la intensidad radiante en decibelios. Esta pérdida se relaciona con la absorbancia «A» y con la transmitancia «T» de la forma siguiente:

$$\text{pérdida (dB)} = 10 \cdot A = 10 \log_{10} \frac{1}{T}$$

Sabiendo que la absorbancia calculada en el ejercicio 3.3 es $A = 0,041$ y sustituyendo en la expresión anterior, se obtiene una pérdida:

$$\text{pérdida (dB)} = 10 \cdot 0,041 = 0,41 \text{ dB}$$

Cuando se habla de una pérdida de 3 dB esto quiere decir que la intensidad se reduce a la mitad de su valor. En efecto:

$$\text{pérdida (dB)} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} = 10 \log_{10} \frac{1}{0,5} = 10 \log_{10} 2 \approx 3 \text{ dB}$$

NOTA

El decibelio es una unidad utilizada frecuentemente en campos como la acústica, la electricidad, las telecomunicaciones, etc. Es particularmente útil, por su naturaleza logarítmica, cuando las escalas utilizadas son grandes.

3.5 Necesariamente, al aumentar la distancia respecto a una fuente radiante, se produce una disminución de la irradiancia. Sea una fuente de radiación ultravioleta monocromática e isotropa de longitud de onda $\lambda = 300 \text{ nm}$ cuya intensidad radiante es $I_e = 4,168 \text{ mW} \cdot \text{sr}^{-1}$. Se pide calcular la atenuación de dicha fuente en función de la distancia de exposición suponiendo que el ángulo de visión es igual a 0 radianes.

SOLUCIÓN

En el ejercicio 1.5 se obtuvo la siguiente expresión para la ley inversa de los cuadrados cuando el ángulo de visión es igual a 0 radianes:

$$E_{e,\text{final}} = E_{e,\text{inicial}} \frac{r_{\text{inicial}}^2}{r_{\text{final}}^2} = E_{e,\text{inicial}} \left(\frac{r_{\text{inicial}}}{r_{\text{final}}} \right)^2$$

En estas condiciones, la relación aproximada entre la intensidad radiante y la irradiancia viene dada por:

$$I_e = E_e \cdot r^2$$

Sustituyendo en la ley inversa de los cuadrados:

$$E_{e,final} = E_{e,inicial} \left(\frac{r_{inicial}}{r_{final}} \right)^2 = E_{e,inicial} \cdot r_{inicial}^2 \left(\frac{1}{r_{final}^2} \right) = I_{e,inicial} \left(\frac{1}{r_{final}^2} \right)$$

$$E_e = 4,168 \frac{1}{r^2} \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

La representación gráfica de la expresión anterior es la que se muestra en la figura 3.2.

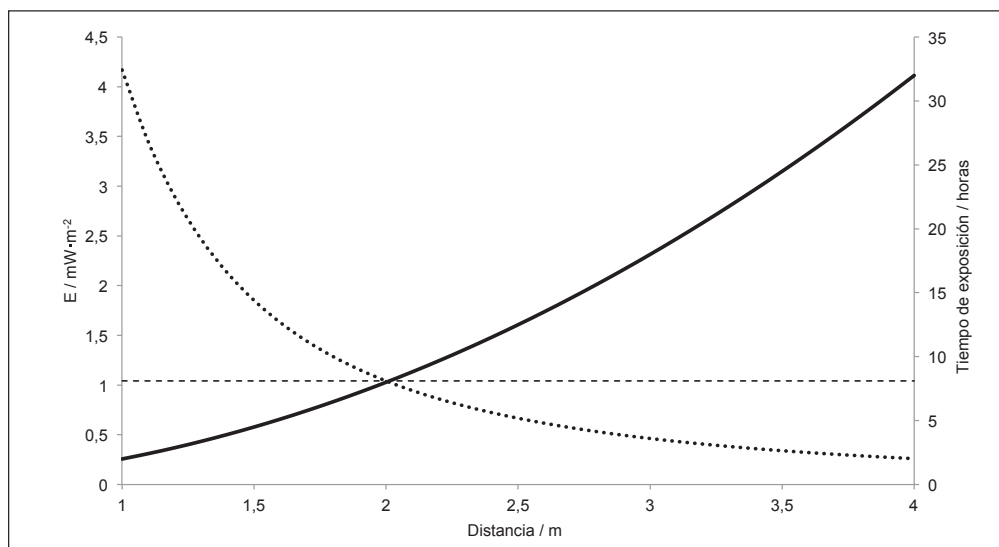


Figura 3.2. Irradiancia y tiempo de exposición a una fuente de UV en función de la distancia.

Se observa que la irradiancia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de exposición. Además, se ha representado el tiempo máximo de exposición teniendo en cuenta que para esta longitud de onda dicho valor viene dado por (ejercicio 2.9):

$$t_{\text{exp}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}}}$$

Es decir: a medida que la distancia a la fuente aumenta, también se reduce la dosis recibida y, por ende, aumenta el tiempo de exposición permitido. En la figura 3.2 se observa que el límite de exposición laboral (8 horas) corresponde a una distancia de 2 metros. En distancias inferiores, el tiempo de exposición deberá reducirse de forma que no se supere el valor límite.

NOTA

Cuando una fuente de radiación puede considerarse como puntual e isótropa, la irradiancia disminuye con el cuadrado de la distancia. Por ello, el alejamiento de

la fuente se erige como la medida más efectiva para disminuir el nivel de radiación recibido por el trabajador.

3.6 Tomando la misma fuente monocromática del ejercicio anterior, cuya intensidad radiante es $I = 4,168 \text{ mW} \cdot \text{sr}^{-1}$, y teniendo en cuenta que la distancia de un trabajador a la fuente es constante e igual a 1 metro, ¿es posible reducir la exposición modificando la orientación de dicha fuente?

SOLUCIÓN

Cuando existe un ángulo de visión « θ » diferente de cero, entonces la relación entre intensidad radiante e irradiancia (ejercicio 1.5) viene dada por:

$$I_e = E_e \frac{r^2}{\cos \theta}$$

El límite de exposición para la fuente del enunciado es el del grupo 1 del anexo I del Real Decreto 486/2010: $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Teniendo en cuenta la relación de la exposición radiante con la irradiancia y sustituyendo en la expresión anterior, se obtiene:

$$H_{\text{eff}} \cong E_{\text{eff}} t_{\text{exp}} \rightarrow E_{\text{eff}} = \frac{H_{\text{eff}}}{t_{\text{exp}}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{t_{\text{exp}}}$$

$$I_e = E_e \frac{r^2}{\cos \theta} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{t_{\text{exp}}} \cdot \frac{r^2}{\cos \theta} \rightarrow t_{\text{exp}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{I_e} \cdot \frac{r^2}{\cos \theta}$$

Los resultados de esta expresión (considerando $r = 1 \text{ m}$ e $I_e = 4,168 \text{ mW} \cdot \text{sr}^{-1}$) se muestran en la figura 3.3. Se observa que cuando el ángulo de visión es 0 (la línea de visión es perpendicular a la superficie radiante) el tiempo máximo de exposición es igual a 2 horas, en concordancia con los resultados del ejercicio 3.5.

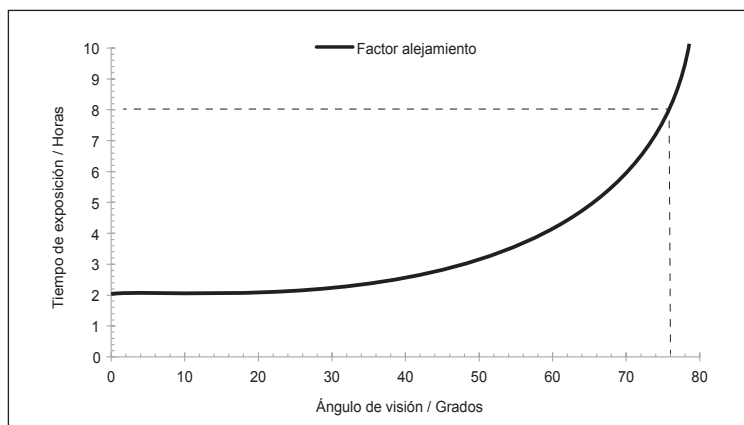


Figura 3.3. Tiempo de exposición en función del ángulo de visión.

A medida que aumenta el ángulo de visión, la dosis de radiación recibida disminuye y, por lo tanto, mayor puede ser el tiempo de exposición. En el caso particular propuesto en este ejercicio, cuando el ángulo es mayor que 75,5 grados, el tiempo es superior a 8 horas.

NOTA

La atenuación producida por la modificación del ángulo de visión tiene poca importancia para valores pequeños de dicho ángulo. Sólo cuando el ángulo es elevado, la atenuación es grande. En el límite, cuando el ángulo de visión es igual a 90 grados, el tiempo de exposición no está definido porque, en dicha situación, no existe exposición.

3.7 Incorporar el efecto de la dispersión producida por las moléculas atmosféricas utilizando el modelo propuesto por la ley de Beer-Lambert en la atenuación de la fuente del ejercicio 3.5. Valorar la importancia de la dispersión atmosférica en el ámbito laboral.

SOLUCIÓN

La ley de Beer-Lambert para la dispersión de Rayleigh, suponiendo constante la densidad del gas, puede escribirse como:

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \sigma_R \cdot N \cdot l$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\sigma_R N l}$$

siendo:

σ_R : la sección transversal de la dispersión de Rayleigh

N : el número de moléculas de aire por unidad de volumen

l : el recorrido de la luz a través del medio dispersante (la atmósfera, en este caso)

La sección transversal de la dispersión de Rayleigh puede calcularse mediante:

$$\sigma_R = \frac{128\pi^5 \alpha_0^2 (6 + 3\rho_n)}{3\lambda^4 (6 - 7\rho_n)}$$

Para la luz solar polarizada de forma natural y el aire atmosférico, se tienen los siguientes valores para el factor de despolarización « ρ_n » y el volumen de polarización « α_0 »:

$$\rho_n = 0,0279$$

$$\alpha_0 = 7 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^3$$

De esta forma la sección transversal de la dispersión de Rayleigh para una longitud de onda $\lambda = 300$ nm, toma el valor:

$$\sigma_R = 4,882 \cdot 10^{-30} \text{ m}^2$$

El número de moléculas de aire por unidad de volumen puede calcularse, suponiendo comportamiento ideal de la atmósfera en la superficie terrestre, como:

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A P}{RT} = 2,547 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$$

Se puede reescribir la ecuación de Beer-Lambert introduciendo la relación entre la intensidad radiante y la irradiancia hallada en el ejercicio 1.5. Además, el recorrido «l» corresponde a la distancia y por eso se tiene que «l=r».

$$\begin{aligned} I &= I_0 \cdot e^{-\sigma_R N l} & E \cdot r^2 &= I_0 \cdot e^{-\sigma_R N r} \\ I &= E \cdot r^2 & E &= I_0 \frac{e^{-\sigma_R N r}}{r^2} \end{aligned}$$

Se observa que la expresión anterior es idéntica a la ley inversa de los cuadrados (con un ángulo de visión igual a 0 grados) con el factor « $e^{-\sigma_R N r}$ » que es la dispersión producida por la atmósfera.

En el ejercicio 3.5 se obtuvo un valor de 2 metros como distancia a partir de la cual no se superaba el límite de exposición durante una jornada laboral de 8 horas. La atenuación debida a la dispersión de Rayleigh por las moléculas atmosféricas a dicha distancia es:

$$e^{-\sigma_R N r} = e^{-4,882 \cdot 10^{-30} \cdot 2,547 \cdot 10^{25} \cdot 2} = 0,99975$$

Es decir: para distancias pequeñas la dispersión de Rayleigh es prácticamente despreciable frente a la propia atenuación producida por el alejamiento de la fuente.

En la figura 3.4 se representa la atenuación producida por el factor de alejamiento « r^{-2} » y por el factor de dispersión de Rayleigh « $e^{-\sigma_R N r}$ ». Este último factor adquiere importancia cuando las distancias son muy grandes.

NOTA

En el entorno laboral, las distancias entre el trabajador y la fuente son pequeñas para que los efectos de la dispersión atmosférica sean apreciables.

3.8 A partir de la fuente y los datos del ejercicio 3.5, que corresponden a una parte de la radiación óptica emitida durante un proceso de soldadura, ¿qué número de cristal protector deberá utilizarse para que no se supere el límite de exposición en una jornada laboral de 8 horas cuando la distancia a la fuente es de 1 metro?

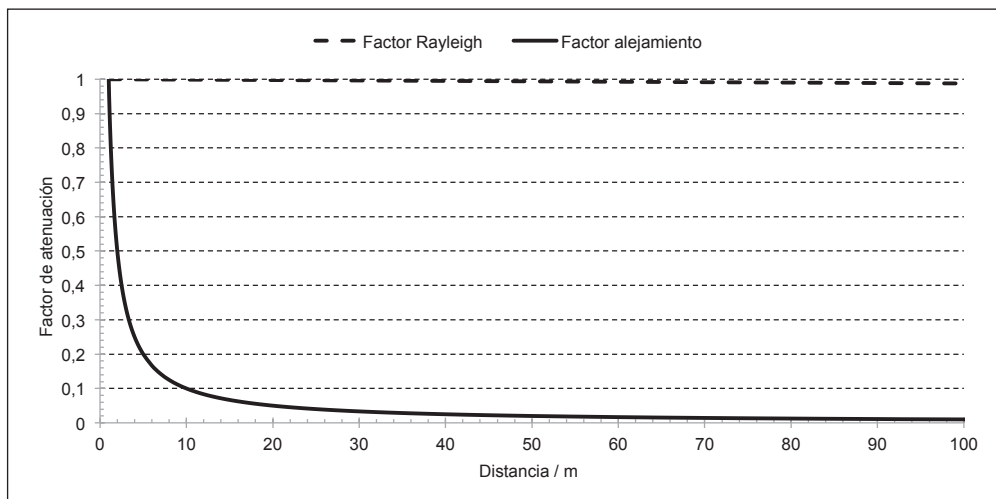


Figura 3.4. Comparación entre la atenuación debida al alejamiento de la fuente y a la dispersión atmosférica.

SOLUCIÓN

Como ya se ha visto en ejercicios anteriores, el límite de exposición laboral para 8 horas viene dado por:

$$E = \frac{30}{t} = \frac{30}{8 \cdot 60 \cdot 60} = 1,04167 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$$

De igual forma, la atenuación debida al alejamiento de la fuente y a la dispersión de Rayleigh (cuyo efecto es, de acuerdo con los resultados del ejercicio 3.7, despreciable) viene dada por la siguiente expresión:

$$E = I_0 \frac{1}{r^2} \cdot e^{-\sigma_R N r}$$

Despejando la variable « I_0 » en la expresión anterior y sustituyendo el resto de valores:

$$I_0 = E \cdot r^2 \cdot e^{\sigma_R N r}$$

$$I_0 = I = 1,04167 \cdot 1^2 \cdot e^{4,882 \cdot 10^{-30} \cdot 2,547 \cdot 10^{25} \cdot 1} = 1,04154 \text{ mW} \cdot \text{sr}^{-1}$$

El valor anterior es la intensidad máxima para una exposición de 8 horas. De acuerdo con el enunciado del ejercicio 3.5, la fuente tiene una intensidad « $I_0 = 4,168 \text{ mW} \cdot \text{sr}^{-1}$ », es decir, la fuente tiene una intensidad que es, aproximadamente, unas cuatro veces superior al límite calculado. Para disminuir esta intensidad, se utiliza un cristal protector cuya transmitancia deberá ser (ejercicio 3.1):

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{1,04154}{4,168} = 0,250$$

La clase de protección del cristal viene definida en la norma UNE-EN 165:2006 y consta de un “número de código” y un “grado de protección”. El número de protección es 3 ya que es el asignado a los filtros ultravioleta que permiten buen reconocimiento del color de acuerdo con la UNE-EN 166:2002. El grado de protección «N» se calcula mediante la siguiente expresión:

$$N = 1 + \frac{7}{3} \cdot \log_{10} \frac{1}{T}$$

Sustituyendo el valor calculado de transmitancia, se obtiene el siguiente grado de protección:

$$N = 1 + \frac{7}{3} \cdot \log_{10} \frac{1}{0,250} = 2,4$$

Por lo tanto, deberá utilizarse un filtro cuyo grado de protección sea igual o superior a 2,4. El filtro más cercano tiene un grado de 2,5 por lo que esa debería ser la elección final.

NOTA

El uso de un cristal protector de grado 2,5 disminuye la exposición laboral de tal forma que la distancia se ve reducida a 1 metro (originalmente 2 metros en el ejercicio 3.5) para 8 horas.

4. CASOS PRÁCTICOS

Caso 1. Exposición a radiación ultravioleta durante la soldadura eléctrica al arco de acero inoxidable con gas de protección.

Se desea evaluar el riesgo por exposición a radiaciones ópticas para el soldador y sus ayudantes, mediante medición de los parámetros adecuados que describen la radiación, así como determinar las medidas de prevención que deben ponerse en marcha.

Datos operativos básicos

Una de las operaciones que se llevan a cabo en una fábrica de sillas es la soldadura de las piezas del bastidor metálico que forma el asiento. Para ello se utilizan equipos de soldadura eléctrica tipo MAG (*Metal Active Gas*) que aplica una diferencia de potencial entre la pieza a soldar de acero inoxidable y el electrodo, que, alimentado en continuo, avanza mientras se consume. Se trabaja habitualmente con una intensidad de corriente de 180 Amperios. El electrodo fundido fluye sobre el metal base y forma el cordón que une las piezas. La diferencia de potencial entre la punta del electrodo y las piezas de metal crea un arco eléctrico de gran intensidad, que expone a radiaciones ópticas al trabajador que suelda y a compañeros próximos a él. El soldador trabaja toda su jornada (8 horas) en la operación mencionada, pero tras cronometrar la duración de las soldaduras y obtener datos sobre las sillas facturadas se estima que el tiempo real de soldadura (existencia del arco eléctrico) es de 2 horas al día.

El equipo de soldadura se encuentra ubicado a 1 metro de la pared de la nave, de hormigón. En el resto de la nave se realizan otros trabajos de manera que a cinco metros escasos se halla otro puesto de trabajo fijo.

El soldador utiliza una pantalla facial sujeta con arnés en la cabeza y ocular filtrante. Usa guantes de cuero y mono de trabajo de algodón y se cubre la parte delantera del cuerpo con mandil de protección. Lleva también polainas de protección frente a proyección de partículas incandescentes y botas de seguridad con puntera reforzada.

El resto de trabajadores de esa parte de la nave no usan prendas de protección (EPI), excepto las botas.

Evaluación de la exposición

El espectro electromagnético correspondiente a radiaciones ópticas del arco de soldadura varía en su perfil (irradiancia para cada longitud de onda) de acuerdo con el sistema de soldeo (soldadura manual al arco eléctrico con electrodo reves-

tido, TIG, MIG, MAG, etc.). El perfil también se puede ver afectado por la distancia. La diferente intensidad de corriente utilizada afecta a la magnitud pero no al perfil, el cual se mantiene. Se decide valorar el riesgo debido a las radiaciones ultravioleta (UV) y a la radiación visible.

Mediciones

Se dispone de un radiómetro espectral capaz de medir la irradiancia espectral entre 200 y 800 nm. También se dispone de un radiómetro de banda ancha con un detector capaz de medir sin ponderación alguna la banda de 315 a 400 nm (UVA) y otro detector que mide de forma ponderada de acuerdo con la función de ponderación «S(l)» la denominada irradiancia efectiva « E_{eff} » entre 200 y 400 nm, tal como se indica en el Real Decreto 486/2010.

Así mismo, el radiómetro dispone de un detector dotado del cabezal correspondiente (limitador de ángulo) que mide la radiancia espectral ponderada de acuerdo con la función de luz azul (L_{Blue}) o « L_B ».

Se realizan las mediciones con los instrumentos mencionados a una distancia aproximada de medio metro del foco de radiación, es decir, adecuada a la posición del soldador. En la figura 4.1.1 se muestra el perfil espectral en valores de irradiancia espectral correspondiente a la situación de trabajo descrita.

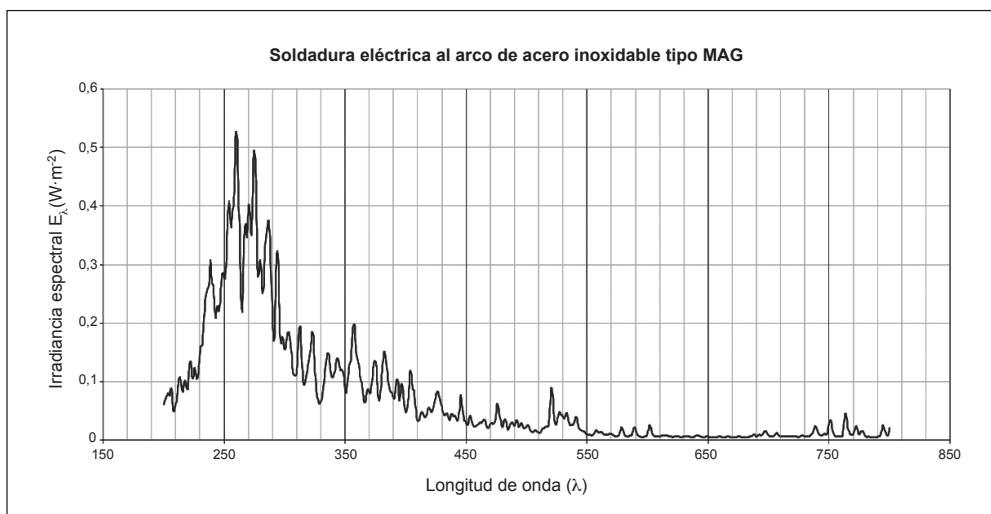


Figura 4.1.1. Valor de la irradiancia espectral « E_λ » frente a la longitud de onda en el puesto de trabajo del soldador.

La irradiancia efectiva « E_{eff} », a la misma distancia de medición y condiciones, tiene un valor de $E_{\text{eff}} = 13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

La irradiancia integrada linealmente entre 315 y 400 nm es $E_{315-400} = 9,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

La medición de radiancia ponderada muestra el siguiente resultado, promedio de varias mediciones: $L_B = 55 \pm 15 \text{ (W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$.

Valoración de los resultados

El espectro de la radiación electromagnética obtenido, entre 200 y 800 nm, muestra que la mayor parte de la radiación se emite entre 220 y 300 nm, longitudes de onda que contribuyen con mayor coeficiente de ponderación en la función «S(λ)», es decir, las consideradas de mayor riesgo por exposición a radiación ultravioleta de acuerdo con los criterios establecidos por la ICNIRP y recogidos en el Real Decreto 486/2010 (ver ejercicio 1.11).

Asimismo, en el espectro de la radiación se observa que, aun siendo menor, existe una cierta intensidad entre 300 y 500 nm, longitudes de onda que intervienen de forma importante (96,8 %) en el cómputo global de la función de ponderación de la luz azul, lo que indica que deberá valorarse el riesgo retiniano fotoquímico. De acuerdo con lo que se indica en el anexo I del Real Decreto 486/2010, el valor límite entre 180 y 400 nm es $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, que permite calcular el tiempo máximo de permanencia para evitar daños en los ojos, como fotoqueratitis, conjuntivitis, o en la piel, como eritema.

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = \frac{30}{13} = 2,31 \text{ segundos durante la jornada laboral}$$

Mientras que el valor límite entre 315 y 400 nm es $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ y el tiempo máximo para evitar daños en el cristalino por UVA es:

$$t_{\text{max}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}} = \frac{10^4}{9,4} = 17,73 \text{ minutos durante la jornada laboral}$$

Por otra parte, el valor límite entre 300 y 700 nm para evitar el riesgo de fotorretinitis es $L_B \cdot t = 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ por lo que el tiempo máximo de exposición a la luz del arco de soldadura es:

$$t_{\text{max}} = 1,8 \text{ segundos tomando la lectura promedio de } L_B \text{ y}$$

$$t_{\text{max}} = 1,4 \text{ segundos tomando el valor de } L_B = 70 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \text{ en el extremo superior del intervalo de medición.}$$

Conclusiones

De acuerdo con la información que se recaba durante la evaluación y con los resultados de las mediciones realizadas y su comparación con los valores límite que fija el Real Decreto 486/2010, existe riesgo por exposición a radiación ultravioleta y luz azul en el puesto de soldadura con el equipo tipo MAG y a la distancia de servicio.

El tiempo de funcionamiento de la soldadura frente al total de la jornada no tiene mucha importancia en este caso, pues los tiempos máximos de permanencia

calculados son muy pequeños y exigen protección total de la piel y los ojos de los trabajadores.

Aunque no se dispone de mediciones suficientes, de la información bibliográfica se desprende que es necesario proteger a los otros trabajadores próximos al puesto de soldadura debido a que los valores de irradiancia y radiancia de las radiaciones emitidas durante el soldeo pueden afectarles, no solo por la radiación directa sino también la que se pueda reflejar en paredes próximas y otras superficies.

Medidas preventivas

El operario soldador debe trabajar protegido con oculares filtrantes que, de acuerdo con la Norma UNE-EN 169:2003, deben ser de clase de protección 11, cuya transmitancia (ver ejercicios 3.1, 3.2, 3.3 ó 3.4) es la correspondiente al tipo de soldadura (MAG) y a la intensidad de corriente utilizada (180 A). Esa protección es adecuada en esas circunstancias si la distancia de los ojos al arco es aproximadamente 50 cm y la iluminación de fondo no es intensa. Asimismo, los ayudantes del soldador deberán protegerse, según la situación, con oculares filtrantes de clase entre 1,2 y 4.

Debido a la existencia de radiación UV, siempre que funcione la soldadura la piel también debe estar totalmente cubierta con la pantalla facial y la ropa de trabajo, de forma que no quede al descubierto durante el soldeo.

Para evitar la propagación de las radiaciones ópticas a otras zonas de la nave y proteger a los trabajadores de los puestos próximos, debería aislarse el entorno del puesto de trabajo de soldadura MAG con cortinas, pantallas (de acuerdo con la norma UNE-EN 1598/A1:2002) o simplemente paramentos de construcción que absorban la radiación.

NOTA

La estimación de la radiancia a partir de la irradiancia requiere gran precaución en la determinación del ángulo sólido correspondiente (ejercicio 1.7). La magnitud “radiancia” es potencia por unidad de superficie y ángulo sólido, es decir, la irradiancia en una cierta dirección definida por el ángulo sólido (ω). En la medición, este último queda determinado por la posición del detector y el propio campo de medición del detector. Pero si la radiancia es calculada a partir de la irradiancia medida, lo que es mas frecuente, el valor del ángulo debe obtenerse a partir del tamaño de la fuente y la distancia al ojo expuesto. En el caso del arco eléctrico no es fácil medir el tamaño de la fuente. A través de la fotografía del arco se puede aproximar el cálculo del tamaño. Marshall et al (1977) determinaron el tamaño para varios tipos de soldadura, considerando la superficie que incluye hasta la caída a «1/e» veces (37% del haz gaussiano) del pico máximo de irradiancia que se ha medido y de acuerdo con la imagen fotográfica del destello. Los valores máximo y mínimo de la superficie de la fuente luminosa de acuerdo con ese estudio se dataron en 1,2 y 9,2 mm². Al calcular el valor de $L_\lambda = E_\lambda / \omega$ para los dos posibles tamaños de la fuente los resultados son muy dis-

tintos (ver figura 4.1.2). Por este motivo y teniendo en cuenta que la mayoría de autores consideran el arco eléctrico de soldadura como fuente puntual, se recomienda utilizar el ángulo $\omega=10^{-4}$ sr. (Ver anexo E, sobre ángulos mínimos).

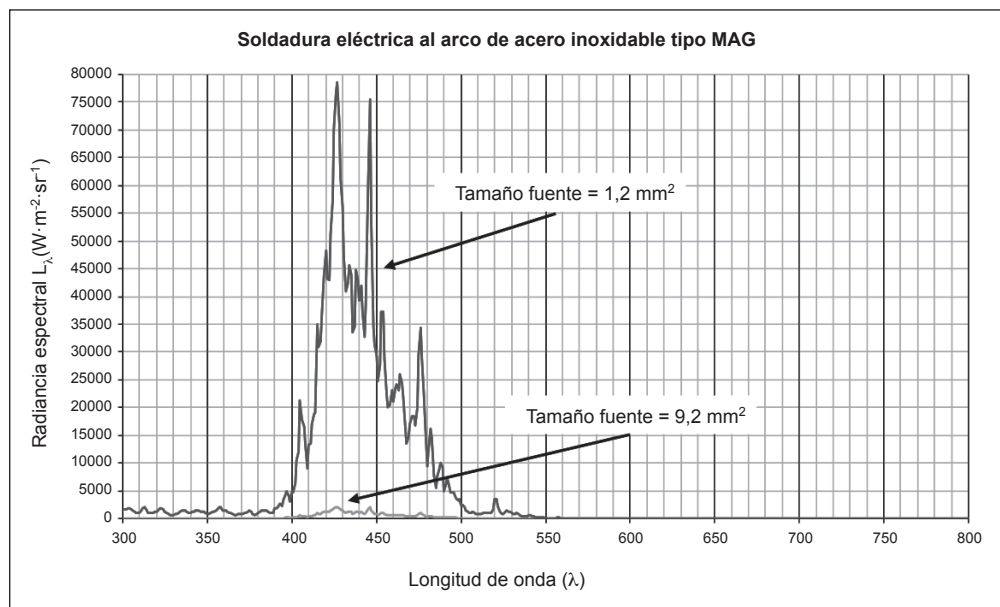


Figura 4.1.2. Valor de radiancia espectral L_λ frente a la longitud de onda en el puesto de trabajo del soldador, calculada para dos tamaños de fuente (1,2 y 9,2 mm²).

Por otra parte, la medición y valoración de la radiación correspondiente a IRA, aunque en este caso no se ha llevado a cabo, suele también conducir a la vulneración de los valores límite aunque con tiempos de exposición máximos superiores a los calculados para UVA y visible.

De párrafos anteriores se puede deducir que las operaciones de soldadura al arco eléctrico generan radiaciones ópticas que presentan mucha dificultad en su valoración a partir de mediciones (sobre todo la radiación visible), mientras que se sabe que en general pueden dar lugar a niveles de radiación de riesgo elevado. Por ello se recomienda que, directamente, los trabajadores y ayudantes utilicen medios de protección tanto individuales como colectivos sin necesidad de llevar a cabo una evaluación detallada.

Caso 2. Exposición a radiaciones ópticas durante la fabricación de botellas de vidrio.

Se desea evaluar el riesgo por exposición a radiaciones ópticas en los puestos de trabajo de control de la línea de soplado de vidrio y control de proceso de fundición.

Datos operativos básicos

Se dispone de dos líneas de soplado donde el vidrio fundido cae en vertical, desde una tolva, sobre el molde que tiene la forma de la botella (en realidad se trata de dos moldes, cada uno de media botella en corte longitudinal que posteriormente se unen). A continuación se produce el desmoldeo, también de forma automática, al abrirse el molde metálico y ser expulsada la botella y dirigida, mediante cinta transportadora, a un horno de temple donde obtiene las propiedades que se requieren. La visión directa de la fuente (vidrio fundido antes de enfriarse) se puede producir en tres ocasiones:

- Visión directa de la caída de la gota (gota de vidrio fundido que formará una botella). Antes de introducirse en el molde, la gota queda a la vista en el semicanal que la conduce, aproximadamente a una distancia de observación de 1,1 metros.
- Visión directa de la botella cuando sale del molde al rojo (a una distancia del trabajador de 0,7 metros en el peor de los casos), y que es conducida por cinta transportadora hacia el horno.
- Inspección de la botella para detectar defectos, que se lleva a cabo aleatoriamente y requiere la observación directa durante unos segundos de la botella al rojo a corta distancia de los ojos (0,5 metros). La botella tiene unas dimensiones aproximadas de 25 centímetros de alto por 8 centímetros de ancho (superficie aproximada si su imagen al rojo fuese una figura rectangular).

Durante el resto de tareas del operario el vidrio fundido no está visible. En este puesto de trabajo, los trabajadores no disponen de gafas de protección para la radiación óptica.

En el puesto de trabajo de control de la fundición se da la visión directa del vidrio fundido cuando el trabajador observa directamente la mezcla fundida en el interior del horno. Esta observación de control del funcionamiento del horno la lleva a cabo observando a través de una ranura de dimensiones 0,2 por 0,01 metros y también al mirar directamente por la abertura que queda en el encaje de la boca del horno y la tolva que lo alimenta con la mezcla de materia prima. Dicha abertura tiene unas dimensiones aproximadas de 0,25 por 0,12 metros. El trabajador dispone solamente de un ocular filtrante (monóculo), sin identificación de ningún tipo, para la observación directa del material fundido.

Todos los trabajadores visten camiseta de manga larga y pantalón largo de trabajo, ambos de algodón oscuro, y disponen de guantes de protección frente al contacto térmico.

La exposición a radiaciones ópticas se puede cuantificar mediante la medición de la irradiancia en las diferentes situaciones de trabajo descritas. Al tratarse de exposición ocular y dérmica, la primera de ellas requiere el conocimiento de la componente direccional de la irradiancia, es decir, de la radiancia «L», y del tamaño de la fuente. Este último se relaciona con el ángulo de subtensión (α).

La radiancia «L» de la fuente hacia el observador se obtendrá en cada situación al dividir la irradiancia «E» por el ángulo sólido correspondiente (ω):

$$L = \frac{E}{\omega}$$

El valor del ángulo sólido utilizado en la determinación de «L_B» es el calculado (ω) siempre que sea mayor que 0,01 sr, en caso contrario se utiliza $\omega = 0,01$ sr. De la misma forma se opera para determinar «L_R», aunque esta vez se elige el mayor entre ω calculado y 0,0001 sr.

Estas simplificaciones sobre el valor del ángulo se basan en las apreciaciones que se hacen en el apéndice E, y son las que se aplican en la resolución de casos que se muestra en la publicación de la Comisión Europea *Non-binding guide to good practice for implementing 2006/25/EC "Artificial Optical radiation"*.

Los datos geométricos de las diferentes situaciones de exposición ocular que son necesarios para la evaluación se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Datos geométricos de la observación de la fuente

Operación	Geometría de la observación de la fuente							
	Dimen- sión 1 m	Dimen- sión 2 m	Distancia a la fuente m	Super- ficie m ²	α mrad	ω sr	ω_B sr	ω_R sr
Desmoldeo y extracción de botellas a cinta transportadora	0,25	0,08	0,7	0,02	236	0,0408	0,0408	0,0408
Caída de la gota	0,25	0,08	1,1	0,02	150	0,0165	0,0165	0,0165
Observación del horno en la alimentación	0,25	0,12	1	0,03	185	0,0300	0,0300	0,0300
Observación del horno a través de ranura	0,2	0,01	0,8	0,002	131	0,0031	0,0100	0,0031
Inspección de la botella para observar defectos	0,25	0,08	0,3	0,02	550	0,2222	0,2222	0,2222
Inspección de la botella para observar defectos	0,25	0,08	0,7	0,02	236	0,0408	0,0408	0,0408

Evaluación de la exposición

Se desea evaluar la exposición a radiaciones ópticas en los puestos de trabajo de control líneas de soplado y en el de control de hornos. Como se desprende de los resultados de las mediciones, las radiaciones ópticas presentes pertenecen mayoritariamente al infrarrojo (IRA e IRB) en las posibles exposiciones de ojos y también de la piel.

Mediciones

Para evaluar los riesgos se realizan mediciones durante las operaciones anteriormente seleccionadas, en intervalos de un segundo y utilizando el valor máximo hallado en cada operación. Para ello, se utiliza un radiómetro de banda ancha con detectores sensibles a las diferentes bandas de longitud de onda y dotados de los filtros adecuados para obtener los valores de irradiancia según las funciones de ponderación establecidas en el Real Decreto 486/2010 para radiaciones ópticas incoherentes.

El cabezal de detección se coloca a la distancia del observador (trabajador que realiza la operación en cada caso). Se considera que el ángulo que forma la fuente y su imagen es nulo ($\cos \theta = 1$). Los resultados de las mediciones figuran en la tabla 20 y son valores de irradiancia por bandas de acuerdo con el real decreto, E_{eff} (180-400 nm), E_{UVA} (315-400 nm), E_{B} (300-700 nm), E_{R} (380-1.400 nm), E_{R} (780-1.400 nm) y E (380-3.000 nm). Los valores de radiancia figuran en la tabla 21 y son los calculados a partir de los datos de las tablas 19 y 20.

Tabla 20. Datos de irradiancia obtenidos mediante medición

Operación	Irradiancia $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$					
	E_{eff} 180-400 nm	E_{UVA} 315-400 nm	E_{B} 300-700 nm	E_{R} 380-1.400 nm	E_{R} 780-1.400 nm	E 380-3.000 nm
Desmoldeo y extracción de botellas a cinta transportadora	-	-	0,0068	0,2326	0,212	399
Caída de la gota	-	-	0,0023	0,1394	0,148	85
Observación del horno en la alimentación	0,0000102	0,002	0,00372	5,729	7,12	1.190
Observación del horno a través de ranura	-	0,002	0,00702	0,6978	0,786	236
Inspección de la botella para observar defectos	-	-	0,0717	0,9578	0,581	421

Tabla 21. Datos de radiancia «L» obtenidos por cálculo a partir de las tablas 19 y 20

Operación	L_B $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ 300-700 nm	L_R $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ 380-1.400 nm	L_R $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ 780-1.400 nm
Desmoldeo y extracción de botellas a cinta transportadora	0,166	5,69	5,19
Caída de la gota	0,139	8,43	8,95
Observación del horno en la alimentación	0,124	190,97	237,33
Observación del horno a través de ranura	0,702	225,10	253,55
Inspección de la botella para observar defectos	0,323	4,31	2,61

Valoración de los resultados

La valoración de los resultados obtenidos de «E» y «L» se hace por comparación con los valores límite que establece el real decreto para cada banda espectral y que se muestran en la tabla 22.

Respecto a la radiación ultravioleta, los resultados de las mediciones muestran valores muy inferiores a los valores límite. En la banda de 180 a 400 nm, el tiempo máximo de permanencia se obtiene dividiendo el valor límite de $H_{eff} = 30 J \cdot m^{-2}$ por la irradiancia efectiva hallada. En este caso, el único valor detectado por el instrumento es $E_{eff} = 10 \mu W \cdot m^{-2}$ (en la operación de observación del horno en la alimentación) de lo que se obtiene un tiempo máximo de exposición muy superior a 8 horas.

Para la banda de 315 a 400 nm, el tiempo máximo de permanencia se obtiene de la expresión:

$$L_B = \frac{10^6}{T_{ex}} = 10.000 W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$$

donde el valor límite es $H_{UVA} = 10^4 J \cdot m^{-2}$ y el valor de $E_{UVA} = 0,002 W \cdot m^{-2}$ sólo se ha detectado en las dos operaciones de observación del interior del horno.

Con estos datos, el tiempo máximo de exposición para la observación del vidrio fundido en el interior del horno es mayor que 8 horas.

Para la radiación visible, valorada con la función de ponderación correspondiente al denominado riesgo por luz azul (en realidad el color azul corresponde sólo a la banda de 400 a 490 nm), se ha supuesto un tiempo de fijación de la visión como mucho de 100 segundos, con lo que el valor límite que se obtiene del real decreto es:

$$L_{R(380-1.400nm)} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha}$$

La expresión se obtiene teniendo en cuenta que el ángulo de subtensión de la fuente es $\alpha \geq 11$ mrad y el tiempo de exposición es siempre mucho menor de 10.000 segundos.

Como se muestra en la tabla 20 los valores de « L_B » no alcanzan en ningún caso ni siquiera el valor de $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

La valoración del riesgo térmico retiniano en las bandas de 380 a 1.400 nm (visible + IRA) y de 780 a 1.400 nm (IRA) se lleva acabo comparando los valores de « L_R » medidos en esas bandas con sus respectivos límites de acuerdo con la normativa. Estos últimos (ver tabla 22) se obtienen teniendo en cuenta el valor del ángulo de subtensión (ver tabla 19) que determina el coeficiente C_α en las siguientes expresiones:

$$L_{R(380-1.400\text{nm})} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} \quad \text{y} \quad L_{R(780-1.400\text{nm})} = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha}$$

donde se ha considerado, por precaución, que la exposición puede ser mayor que 10 segundos.

Aunque la visión del interior del horno implica mayor radiancia en la exposición, todos los valores obtenidos de « L_R » en las diferentes operaciones son muy inferiores a los valores límite.

Por último, se deben valorar las exposiciones a IRA + IRB de la banda de 780 a 3.000 nm con respecto al riesgo ocular (quemadura corneal y cataratogenesis) y de radiación Vis + IRA + IRB como transmisión de calor radiante a la piel y el riesgo de quemadura correspondiente. En ambas se obtendrá el tiempo máximo de exposición despejando de las respectivas expresiones:

- Riesgo ocular:

$$E_{IR(780-3.000\text{nm})} = 18.000 t^{-0,75}$$

- Riesgo para la piel:

$$H_{\text{piel}(780-3.000\text{nm})} = E_{(780-3.000\text{nm})} \cdot t = 20.000 \cdot t^{0,25}$$

Los valores del tiempo máximo así obtenido se muestran en la tabla 22.

Debe observarse que el valor límite de « H_{piel} » está limitado en el Real Decreto 486/2010, para exposiciones menores de 10 segundos, pero la ICNIRP, autora de los criterios utilizados en dicha normativa, amplía el campo de utilización de la expresión matemática de « H_{piel} » en su documento “Stament on far infrared exposure” y asume, de acuerdo con la norma DIN 33403 (2001), que las curvas de umbral de dolor en función de la irradiancia son similares a la que dibuja la función del valor límite y mediante la citada expresión extiende hasta 1.000 segundos de exposición su aplicación. De acuerdo con esto se han calculado los tiempos máximos de exposición de la tabla 22 para la radiación sobre la piel de longitud de onda entre 380 y 3.000 nm.

Como se puede comprobar los tiempos máximos de exposición así calculados son del orden de pocos minutos, mientras que en la observación del interior del horno

en la boca de alimentación es de 37 segundos para el riesgo ocular por infrarrojo IRA e IRB.

Tabla 22. Valores límite para las magnitudes «E», «L» y tiempo máximo de exposición, de acuerdo con el Real Decreto 486/2010

Operación	Valor límite de la magnitud establecida para cada banda						
	H_{ef} J·m ⁻² 180-400 nm	H_{UVA} J·m ⁻² 315-400 nm	$L_B^{(1)}$ W·m ⁻² , sr ⁻¹ 300-700 nm	L_R W·m ⁻² , sr ⁻¹ 380-1.400 nm	L_R W·m ⁻² , sr ⁻¹ 780-1.400 nm	Tiempo de exposición min	
						Ojos 780-3.000 nm	Piel 380-3.000 nm
Desmoldeo y extracción de botellas a cinta transportadora	30	10 ⁴	10.000	280.000	60.000	2,7	3,1
Caída de la gota			10.000	280.000	60.000	21,0	24,0
Observación del horno en la alimentación			10.000	280.000	60.000	0,6	0,7
Observación del horno a través de ranura			10.000	280.000	60.000	5,4	6,2
Inspección de la botella para observar defectos			10.000	280.000	60.000	2,5	2,9
(1) Suponiendo que el tiempo de exposición es como mucho de 100 segundos							

Conclusiones

A partir de los datos obtenidos por medición de la irradiancia se puede concluir que la exposición a radiación ultravioleta es irrelevante.

De la comparación de los valores de «L_B» con los valores límite establecidos en el real decreto para esa magnitud, se deduce que la exposición a radiación visible es, en todos los casos, de muy pequeña magnitud pues su relación comparativa es de 1 a 10.000.

Lo mismo puede decirse respecto a la valoración del riesgo térmico retiniano por exposición a la radiación óptica de las bandas de 380 a 1.400 nm y de 780 a 1.400 nm, donde los valores respectivos de «L_R» son muy inferiores a los límites.

Los niveles de irradiancia entre 380 y 3.000 nm podrían suponer riesgo de cataratogénesis o quemadura corneal para los operarios expuestos. Los tiempos máximos calculados de acuerdo con el Real Decreto 486/2010 son suficientemente pequeños para considerar la aplicación de medidas preventivas.

También puede vulnerarse, en situaciones puntuales del trabajo, el valor límite establecido para proteger del daño por quemadura cutánea.

Medidas preventivas

Los trabajadores deberían disponer y utilizar pantallas faciales o protección ocular filtrante que cumpla con la norma UNE EN 171, ofreciendo un grado de protección en función de la temperatura de la fuente incandescente, que en este caso será diferente para la visión del horno o de las botellas, pues estas últimas se encuentran a menor temperatura. En la elección de los filtros deben tenerse en cuenta las necesidades de visibilidad y de reconocimiento de colores en el puesto de trabajo donde se ejecuta el control de calidad de las botellas por inspección visual a corta distancia.

Es recomendable que la piel permanezca cubierta con la pantalla facial y la ropa de trabajo durante la jornada laboral.

Para proteger a los trabajadores de la radiación térmica se pueden añadir pantallas en lugares estratégicos del proceso.

Diferentes autores llaman la atención sobre el posible riesgo de hipertermia en situaciones puntuales debido a la realización de esfuerzos considerables y teniendo en cuenta la importante aportación de calor de las fuentes de IR al ambiente de los locales.

Caso 3. Exposición a radiación ultravioleta y visible durante tratamientos de fototerapia.

Se desea evaluar el riesgo por exposición a radiaciones ópticas del personal médico que asiste a los pacientes sometidos a tratamientos de fototerapia, mediante medición de los parámetros adecuados que describen la radiación, así como determinar las medidas de prevención que deben aplicarse.

Datos operativos básicos

En la unidad de dermatología de un hospital se somete a los pacientes a fototerapia para el tratamiento de diversas afecciones cutáneas, como psoriasis, vitíligo, dermatitis atópica, etc.

Para este tipo de tratamientos el hospital dispone de una cabina de cuerpo entero y de una lámpara para manos. Los dos equipos pueden emitir en las longitudes de onda del UVA, del UVB o ambas longitudes a la vez. El médico especialista es el responsable de prescribir el tipo de radiación más adecuada para cada paciente, la dosis máxima por sesión y el tiempo de exposición necesario que, como mínimo, suele ser de 1,5 minutos por sesión, pudiendo llegar hasta los 20 minutos a medida que aumenta el número de sesiones a las que ya se haya sometido el paciente.

Los dos equipos están ubicados en una misma sala con paredes blancas y se encuentran aproximadamente a dos metros el uno del otro.

La cabina de cuerpo entero contiene 32 tubos fluorescentes de radiación UVA (con longitudes de onda de entre 315 y 380 nm y un pico de emisión en 350 nm) y otros 16 tubos de radiación UVB (con longitudes de onda de entre 305 y 315 nm y un pico de emisión en 311 nm).

La cabina no emite radiación si la puerta está abierta, por lo que durante su funcionamiento no es posible la exposición directa de los trabajadores. No obstante, puede haber pequeñas fugas a través de las diferentes aberturas del equipo, necesarias para garantizar la ventilación del mismo. Las fugas se producen esencialmente en dos zonas situadas en la parte delantera de la cabina: la rendija que queda por encima de la puerta de la cabina (apertura de 1 m por 2 cm) y dos grupos de rendijas dispuestas en forma circular situadas en la parte superior de la puerta (cada grupo ocupa aproximadamente la superficie de un círculo de 4 cm de diámetro).

La lámpara para manos funciona con 10 tubos fluorescentes. Cuatro de ellos emiten radiación UVA con una longitud de onda de entre 320 y 370 nm. El resto emiten radiación UVB con una longitud de onda de entre 285 y 350 nm y un pico de emisión en 310/315 nm.

En la parte frontal de la lámpara existe una abertura de 400 mm de largo y 100 mm de ancho por la cual el paciente introduce las manos. No existe ningún tipo de protección que limite la propagación de la radiación.

Mientras se realiza el tratamiento hay una enfermera permanentemente en la sala que se encarga de asistir a los pacientes. La enfermera sólo está cerca de los equipos cuando debe conectarlos y asistir a los pacientes que deban utilizarlos. Durante el resto del tiempo permanece en su mesa de trabajo, situada a unos dos metros de la cabina y a tres metros de la lámpara para manos. Cuando la enfermera está trabajando en su mesa, la única fuente a la que puede mirar es la lámpara de manos, la cabina queda fuera de su campo de visión.

Normalmente, durante la jornada de trabajo de la enfermera, de 8 horas, siempre existe alguno de los dos equipos en marcha y es habitual que ambos funcionen simultáneamente, por lo que a veces la enfermera debe permanecer cerca de uno que ya está en funcionamiento mientras conecta el otro o asiste a un paciente.

La enfermera no utiliza ningún tipo de equipo de protección individual contra la exposición a radiaciones ópticas.

Antes de la exposición a UVA el paciente es tratado con un fármaco fotosensibilizante para aumentar la sensibilidad de su piel a la radiación.

Evaluación de la exposición

Las fuentes de fototerapia suelen emitir principalmente en la región UV del espectro electromagnético y es posible que también emitan en el visible, especialmente en la región correspondiente a la luz azul. Se decide valorar el riesgo debido a las radiaciones ultravioleta (UV) y a la radiación visible.

Mediciones

Se utiliza un radiómetro de banda ancha con detectores capaces de medir la irradiancia en las bandas de 220 a 400 nm (UV), de 3.314 a 400 nm (UVA) y de 400 a 700 nm (UV y visible).

Se realizan las mediciones con los instrumentos mencionados en varias zonas:

- En los puntos más desfavorables de exposición (muy cerca de las fuentes).
- En alguno de los puntos en que se suele situar la enfermera para conectar los equipos o asistir a los pacientes que los utilizan.
- En la mesa de trabajo de la enfermera (con el detector dirigido a la rendija superior de la cabina para cuerpo entero).

En las tablas 23 y 24 se muestran los siguientes datos obtenidos en los diferentes puntos de medición:

- Irradiancia efectiva para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 180 y 400 nm, E_{eff} (irradiancia ponderada con $S(\lambda)$).
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 315 y 400 nm, E_{UVA} .
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 300 y 700 nm, E_{B} (irradiancia ponderada con $B(\lambda)$).

Tabla 23. Valores de irradiancia correspondientes a la lámpara para manos, obtenidos a partir de las mediciones en diferentes puntos

Punto de medición	E_{eff} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{UVA} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{B} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Posición del paciente (frente a la lámpara, a 50 cm de la lámpara, a la altura de las manos)	0,02153	27,97	7,24
Frente a la lámpara, a un metro	0,001155	1,388	0,8249
En diagonal a la lámpara, a 1,5 m	0,0001092	0,192	0,2119
En la mesa de la enfermera, a la altura de los ojos	-	0,009	0,1291

Tabla 24. Valores de irradiancia correspondientes a la cabina de cuerpo entero (a 3,80 Joules), obtenidos a partir de las mediciones en diferentes puntos

Punto de medición	E_{eff} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{UVA} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{B} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Rendija superior	0,000715	0,95	0,3598
Rendijas circulares	0,0008337	1,198	0,3593
A 50 cm, altura de las rendijas circulares	0,0000463	0,063	0,3322
A 50 cm, altura de la rendija superior	0,0000463	0,063	0,3052

Valoración de los resultados

De acuerdo con el anexo I del Real Decreto 486/2010, el valor límite entre 180 y 400 nm corresponde a una exposición radiante de $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$. Teniendo en cuenta que la energía es el producto de la potencia por el tiempo de exposición, podemos obtener el tiempo máximo de exposición (ver tablas 25 y 26) a partir de la siguiente expresión:

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Tabla 25. Irradiancia efectiva y tiempo máximo de permanencia (lámpara para manos)

Punto de medición	E_{eff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max}
Posición del paciente (frente a la lámpara, a 50 cm de la lámpara, a la altura de las manos)	0,02153	23,22 min
Frente a la lámpara, a 1 metro	0,001155	31,22 h
En diagonal a lámpara, a 1,5 metros	0,0001092	76,31 h
En la mesa de la enfermera, a la altura de los ojos	-	-

Tabla 26. Irradiancia efectiva y tiempo máximo de permanencia (cabina de cuerpo entero) a 3,80 Joules

Punto de medición	E_{eff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max} h
Rendija superior	0,000715	11,66
Rendijas circulares	0,0008337	10
A 50 cm, altura de las rendijas circulares	0,0000463	179,99
A 50 cm, altura de la rendija superior	0,0000463	179,99

Por otra parte, teniendo en cuenta que el valor límite entre 315 y 400 nm es $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, el tiempo máximo de exposición (ver tablas 27 y 28) para evitar daños en el cristalino por UVA se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$t_{\text{max}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Por último, el valor límite entre 300 y 700 nm para evitar el riesgo de fotorretinitis es $L_B = 10^6 \cdot t^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$. El valor de « L_B » se puede obtener dividiendo la irradiancia « E_B » por un ángulo sólido. Ese ángulo sólido debería ser el ángulo sólido sub-

Tabla 27. Irradiancia E_{UVA} y tiempo máximo de permanencia (lámpara para manos)

Punto de medición	E_{UVA} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max}
Posición del paciente (frente a la lámpara, a 50 cm de la lámpara, a la altura de las manos)	27,97	5,96 min
Frente a la lámpara, a 1 metro	1,388	5,92 h
En diagonal a lámpara, a 1,5 metros	0,192	14,47 h
En la mesa de la enfermera, a la altura de los ojos	0,009	308,64 h

Tabla 28. Irradiancia E_{UVA} y tiempo máximo de permanencia (cabina de cuerpo entero) a 3,80 Joules

Punto de medición	E_{UVA} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max} h
Rendija superior	0,95	2,92
Rendijas circulares	1,198	2,32
A 50 cm, altura de las rendijas circulares	0,063	44,09
A 50 cm, altura de la rendija superior	0,063	44,09

tendido por la fuente (ω) o un ángulo sólido obtenido a partir del campo de visión del instrumento de medición (ϕ), el que sea mayor de los dos.

El valor del campo de visión que el Real Decreto 486/2010 establece en caso de riesgo fotoquímico para la retina ($\phi = 110 \text{ mrad}$) corresponde a un ángulo sólido de $\omega_B = 0,01 \text{ sr}$.

El ángulo sólido subtendido por la fuente « ω », en estereorradianes (sr), se calcula aplicando la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{A'}{r^2} = \frac{A \cdot \cos \theta}{r^2}$$

donde:

A' área aparente de la fuente (cm^2)

r distancia entre el trabajador (o el detector) y la fuente (cm)

A área de la fuente (cm^2)

θ ángulo entre la perpendicular a la superficie de la fuente y la línea de visión del observador

En el caso de la lámpara para manos, el área aparente de la fuente se puede obtener a partir de las dimensiones de la apertura frontal por la que se introducen las manos:

$$A' = (40 \cdot \cos \theta) \cdot (10 \cdot \cos \theta)$$

Para la cabina de cuerpo entero, el área aparente de la fuente se obtiene a partir de las dimensiones de las aperturas a través de las cuales existen fugas de radiación:

- Para la rendija superior:

$$A' = (100 \cdot \cos \theta) \cdot (2 \cdot \cos \theta)$$

- Para cada rendija circular:

$$A' = (\pi \cdot r^2) \cdot \cos \theta = \pi \cdot 2^2 \cdot \cos \theta = 12,57 \cdot \cos \theta$$

por lo que el área aparente de las dos rendijas circulares será de $(25 \cdot \cos \theta)$ cm².

El ángulo subtendido correspondiente a los diferentes puntos de medición se puede obtener a partir de las tablas 29 y 30.

Tabla 29. Cálculo del ángulo subtendido por la fuente en cada uno de los puntos de medición de la lámpara para manos

Punto de medición	θ	A' cm ²	r cm	ω sr
Posición del paciente (frente a la lámpara, a 50 cm de la lámpara, a la altura de las manos)	0°	400	50	0,16
Frente a la lámpara, a 1 metro	0°	400	100	0,04
En diagonal a lámpara, a 1,5 metros	45°	200	150	0,009
En la mesa de la enfermera, a la altura de los ojos	60°	100	200	0,0025

Tabla 30. Cálculo del ángulo subtendido por la fuente en cada uno de los puntos de medición de la cabina de cuerpo entero

Punto de medición	θ	A' cm ²	r cm	ω sr
Rendija superior	0°	200	1	200
Rendijas circulares	0°	25	1	25
A 50 cm, altura de las rendijas circulares	0°	25	50	0,01
A 50 cm, altura de la rendija superior	0°	200	50	0,08

En todos los puntos de medición, excepto en la mesa de la enfermera, $\omega > 0,01$ sr, por lo que en esos puntos el cálculo de la radiancia efectiva « L_B » se llevará a cabo utilizando los ángulos sólidos calculados en las tablas 29 y 30. En el punto de medición correspondiente a la mesa de la enfermera se utilizará el valor de 0,01 sr.

El tiempo máximo de exposición a la radiación se puede obtener dividiendo 10^6 por la radiancia efectiva « L_B » tal y como queda reflejado en las tablas 31 y 32.

Tabla 31. Radiancia efectiva y tiempo máximo de permanencia correspondientes a la lámpara para manos

Punto de medición	ω sr	E_B $W \cdot m^{-2}$	L_B $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	t_{max} h
Posición del paciente (frente a la lámpara, a 50 cm de la lámpara, a la altura de las manos)	0,16	7,24	45,25	6,14
Frente a la lámpara, a 1 metro	0,04	0,8249	20,62	13,47
En diagonal a lámpara, a 1,5 metros	0,009	0,2119	23,8	11,67
En la mesa de la enfermera, a la altura de los ojos	0,0025	0,1291	51,64	5,38

Tabla 32. Radiancia efectiva y tiempo máximo de permanencia correspondientes a la cabina de cuerpo entero

Punto de medición	ω sr	E_B $W \cdot m^{-2}$	L_B $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	t_{max} h
Rendija superior	200	0,3598	0,0018	154.406,77
Rendijas circulares	25	0,3593	0,0144	19.327,71
A 50 cm, altura de las rendijas circulares	0,01	0,3322	33,22	8,35
A 50 cm, altura de la rendija superior	0,08	0,3052	3,82	72,81

Conclusiones

Teniendo en cuenta los datos recopilados durante la evaluación y el resultado de las mediciones realizadas, no es probable que exista un riesgo de exposición de la trabajadora a las radiaciones ópticas emitidas por los equipos de fototerapia.

En el caso de la exposición a radiaciones UV, el único punto de medición en el que el tiempo de exposición máximo permitido es inferior a una hora es el correspondiente a la posición del paciente en la lámpara para manos. Es del todo improbable que los trabajadores permanezcan en ese punto el tiempo suficiente para alcanzar el valor límite de exposición.

El valor límite para la exposición a radiación UVA se supera a las 6 horas de exposición cuando la persona está situada aproximadamente a un metro de la lámpara para manos y a las 2 – 3 horas si la persona está junto a las rendijas de la cabina para cuerpo entero. En este caso también es improbable que la enfermera permanezca en esas ubicaciones tanto tiempo como para que su exposición sea excesiva.

El riesgo por luz azul sólo se aprecia en la posición del paciente usuario de la lámpara para manos y, aún así, el tiempo de exposición necesario para aparición de daños en la retina es superior a 6 horas. Hay que tener en cuenta, además, que

la medición en este punto se ha realizado con el detector situado a la altura de las manos y que no es de esperar que los ojos del trabajador o el paciente se encuentren en esa posición.

En la mesa de trabajo de la enfermera el valor límite de exposición para riesgos en la retina provocados por exposición a luz azul se supera a las 5,38 horas de exposición. No obstante, no es probable que la trabajadora permanezca tanto tiempo mirando a la lámpara, por lo que se puede considerar que no existe riesgo alguno de exposición.

Medidas preventivas

Aunque en general el riesgo de efectos agudos en el trabajador por exposición a radiaciones UV es relativamente bajo (ya que es improbable que permanezca expuesto el tiempo suficiente para que aparezcan esos efectos), sí existe un riesgo de efectos a largo plazo debido a la exposición acumulada a radiaciones UV. Ese riesgo debería minimizarse aumentando tanto como sea posible la distancia a las fuentes de radiación. Además, el tiempo de permanencia junto a las fuentes debería ser el mínimo indispensable. Asimismo, para evitar la dispersión innecesaria de la radiación y las posibles molestias por la visión de la luz azul, es recomendable rodear las fuentes con cortinas o, como mínimo, situar una cortina entre el espacio en el que se sitúan las fuentes y el espacio en el que se encuentra la mesa de trabajo de la enfermera.

Cuando el trabajador deba situarse cerca de la lámpara o la cabina, sería conveniente el uso de protección ocular para fuentes de radiación UV que reúnan los requisitos básicos de protección establecidos en la norma UNE EN 166:2002 y los requisitos específicos de transmisión recogidos en la norma UNE EN 170:2003. De acuerdo con esta última norma, a los filtros utilizados con fuentes de radiación UV y visible les corresponde un código de protección 2 y un grado de protección de 2 a 4.

También sería conveniente que el trabajador utilizara guantes y ropa adecuados para cubrirse la piel cuando deba acercarse o manipular las fuentes.

Caso 4. Exposición a radiación ultravioleta y visible durante tratamientos de fototerapia (neonatología).

Se pretende evaluar el riesgo por exposición a radiaciones ópticas de los trabajadores que se ocupan de los bebés con ictericia sometidos a tratamientos de fototerapia. Para ello, se medirán los parámetros que describen la radiación. Se pretende también proponer algunas de las medidas de prevención que sería conveniente aplicar.

Datos operativos básicos

La fototerapia es una de las técnicas más utilizadas para el tratamiento de los recién nacidos con ictericia, una afección que ocasiona una coloración amarillenta en la piel, en los tejidos y en los fluidos del cuerpo debido a la acumulación de bi-

lirrubina en la sangre. Se produce porque los bebés nacen con un mayor número de glóbulos rojos del que necesitan. Estos glóbulos rojos excedentes se destruyen y liberan bilirrubina.

La fototerapia utiliza energía luminosa para transformar la bilirrubina y convertirla en moléculas que puedan ser excretadas. Este tratamiento también se emplea como profilaxis en los grandes prematuros.

La bilirrubina absorbe la luz con mayor intensidad en la región azul del espectro electromagnético, cerca de los 460 nm, por lo que esta región se considera la más efectiva para la degradación de la bilirrubina.

En el servicio de neonatología de un hospital se utilizan tres equipos de fototerapia para el tratamiento de la hiperbilirrubinemia. Se trata de equipos móviles que se pueden utilizar sobre cunas, cunas térmicas o incubadoras:

- Equipo 1. La fuente de luz proviene de una bombilla de halogenuro metálico de 50 W y 7 cm de diámetro situada en una caja de luz.
- Equipo 2. La fuente de luz, situada en un cerramiento de plástico ligero de 23 x 45 cm, consiste en LED (*light emitting diodes*) de luz azul que emiten en el rango de 400-500 nm (con un pico de emisión entre 450 y 470 nm). También utiliza LED de luz amarilla con un pico de emisión entre 585 y 595 nm.
- Equipo 3. Utiliza cuatro tubos fluorescentes de luz azul para el tratamiento de la hiperbilirrubina y dos tubos de luz blanca para el diagnóstico. Los dos tipos de fluorescentes se pueden encender por separado o juntos. La caja de luz que contiene los fluorescentes tiene unas dimensiones de 25 x 40 cm.

Los fabricantes de las lámparas indican que los cerramientos de las fuentes están diseñados para filtrar la radiación UV e IR y reducir así el riesgo de lesiones en la piel y los ojos del paciente.

La jornada de trabajo en el servicio de neonatología es de 8 horas en tres turnos fijos y la duración de los tratamientos oscila entre 48 y 72 horas para cada paciente, según la severidad del cuadro clínico, durante las cuales la lámpara permanece siempre encendida.

Los trabajadores del área desarrollan sus tareas en las inmediaciones de las lámparas, aunque sólo se acercan a ellas en el momento de manipular al neonato. En algunos casos el nivel de bilirrubina es tan alto que es preferible no apartarlo de la luz mientras se cambian los pañales, se administra el biberón, etc. Se estima que el tiempo máximo de exposición junto a la lámpara en esas situaciones sería de 2 horas diarias.

Durante la aplicación del tratamiento, los ojos del neonato se protegen con gafas o parches opacos fabricados con un material suave. El personal hospitalario no utiliza ningún tipo de protección frente a la radiación.

Evaluación de la exposición

Las fuentes de fototerapia utilizadas en el tratamiento de la ictericia suelen emitir principalmente en la región del visible correspondiente a la luz azul, aunque también es posible que exista emisión en las regiones ultravioleta (UV) e infrarrojo

cercano (IR) del espectro. Se decide valorar el riesgo debido a la radiación visible, a las radiaciones UV e IR.

Mediciones

Se utiliza un radiómetro de banda ancha con detectores, sensibles a las diferentes bandas de longitud de onda, dotados de los filtros adecuados para obtener los valores de irradiancia según las funciones de ponderación establecidas en el Real Decreto 486/2010 para radiaciones ópticas incoherentes.

Las mediciones se realizan dirigiendo el detector hacia la fuente o hacia el reflejo de esta en la cuna o en la parte superior de la incubadora.

Durante las mediciones, los equipos 1 y 2 se utilizan sobre cunas vacías cubiertas por una sábana blanca, mientras que el equipo 3 se sitúa sobre una incubadora ocupada por un recién nacido afectado por ictericia.

En la tabla 33 se muestran los siguientes datos obtenidos en los diferentes puntos de medición:

- Irradiancia efectiva para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 180 y 400 nm, E_{eff} (irradiancia ponderada con $S(\lambda)$).
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 315 y 400 nm, E_{UVA} .
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 300 y 700 nm, E_{B} (irradiancia ponderada con $B(\lambda)$).

Los resultados correspondientes a la irradiancia en las bandas de octava del IR están muy por debajo del límite de exposición, por lo que no se han incluido en la tabla 33.

Tabla 33. Valores de irradiancia correspondientes a los tres equipos de fototerapia, obtenidos a partir de las mediciones en diferentes puntos

		Punto de medición	E_{eff} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{UVA} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{B} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Equipo	1	Perpendicularmente a la fuente, a 80 cm	-	-	0,134
		Perpendicularmente al reflejo en la cuna, a 20 cm	-	-	0,657
	2	Perpendicularmente a la fuente, a 60 cm	-	-	7,77
		A la altura de los ojos y apuntando a la fuente, a 40 cm	-	-	0,676
		Reflejo de la fuente sobre la incubadora, a 20 cm	-	-	0,728
	3	Perpendicularmente a la fuente, a 40 cm	0,0000022	0,022	19,7
		Reflejo de la fuente en la cuna, a 40 cm, desde la posición usual del trabajador	-	-	1,72

Valoración de los resultados

De acuerdo con los valores límite del anexo I del Real Decreto 486/2010, podemos obtener el tiempo máximo de exposición a los valores medidos de « E_{eff} » y « E_{UVA} » a partir de las expresiones siguientes:

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

$$t_{\text{max}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Tal y como se observa en la tabla 33, no se han detectado niveles significativos de emisión de radiación UV en ninguno de los equipos evaluados. La tabla 34 muestra el tiempo máximo de permanencia en el único de los puntos de medición en el que se ha detectado dicha emisión.

Tabla 34. Tiempo máximo de permanencia correspondiente a las mediciones de E_{eff} y E_{UVA} para el equipo de fototerapia 3

		Punto de medición	E_{eff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max} h	E_{UVA} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max} h
Equipo	3	Reflejo de la fuente en la cuna, a 40 cm, desde la posición usual del trabajador	0,0000022	3.787,88	0,022	126,26

Respecto a la valoración del riesgo de fotorretinitis por exposición a radiación visible, la tabla 35 muestra el tiempo de exposición máximo a dicha radiación en cada uno de los puntos de medición, calculado a partir de la siguiente expresión:

$$t_{\text{max}} = \frac{10^6}{L_B \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}} = \frac{(10^6 \cdot \omega \text{ sr})}{E_B \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

La tabla 36 muestra el cálculo del área de cada uno de los puntos de emisión de la radiación.

Conclusiones

A la vista de los resultados de la evaluación no es probable que exista un riesgo de exposición a radiaciones ópticas para los trabajadores del servicio de neonatología.

Los equipos de fototerapia estudiados presentan muy baja o ninguna emisión en el rango de la radiaciones UV. En el caso de la radiación visible, el tiempo máximo de exposición supera las 8h, incluso en los puntos de medición más desfavorables, es decir, con el detector apuntando directamente a la fuente de radiación.

Tabla 35. Cálculo del tiempo máximo de permanencia correspondiente a las mediciones de E_B para los 3 equipos de fototerapia

		Punto de medición	θ	A'^* cm ²	r cm	ω^{**} sr	$E_{B'}$ W·m ⁻²	$L_{B'}$ W·m ⁻² ·sr ⁻¹	t_{\max} h
Equipo	1	Perpendicularmente a la fuente, a 80 cm	0°	38,5	80	0,006	0,134	13,4	20,73
		Perpendicularmente al reflejo en la cuna, a 20 cm	0°	314,2	20	0,785	0,657	0,837	332,065
	2	Perpendicularmente a la fuente, a 60 cm	0°	1.035	60	0,288	7,77	27,026	10,278
		A la altura de los ojos y apuntando a la fuente, a 40 cm	10°	1.019,3	40	0,637	0,676	1,061	261,772
		Reflejo de la fuente sobre la incubadora, a 20 cm	45°	600	20	1,5	0,728	0,485	572,738
	3	Perpendicularmente a la fuente, a 40 cm	0°	1.000	40	0,625	19,7	31,52	8,813
		Reflejo de la fuente en la cuna, a 40 cm, desde la posición usual del trabajador	45°	1600	40	1	1,72	1,72	161,499
	<p>* Para el cálculo de las áreas se han tenido en cuenta los datos de la tabla 36.</p> <p>** En el primer punto de medición $\omega < 0,01$ sr, por lo que en ese punto se considera que $\omega = 0,01$ sr. En el resto de puntos se utilizan los ángulos sólidos calculados para obtener el valor de la radiancia efectiva «L_B».</p>								

Tabla 36. Cálculo del área de cada uno de los puntos de emisión de la radiación

		Punto de emisión	Longitud cm	Ancho cm
Equipo	1	Fuente (circular)	7	7
		Reflejo en la cuna (circular)	20	20
	2	Fuente	45	23
		Reflejo en la incubadora	48	25
	3	Fuente	40	25
		Reflejo en la cuna	80	40

Es altamente improbable que los trabajadores miren hacia esos puntos el tiempo necesario para la aparición de fotorretinitis.

Medidas preventivas

Para disminuir los posibles efectos a largo plazo de la exposición a radiaciones UV, los trabajadores deberían permanecer cerca de las cunas o incubadoras el tiempo mínimo necesario para atender a los recién nacidos.

También es conveniente evitar o reducir al máximo la dispersión de la radiación en la sala. Para ello, se recomienda colocar una tela que vaya desde la fuente hasta la cuna o la incubadora, cubriendo las zonas que no sean indispensables para el control visual del neonato. De esta forma, no sólo se consigue proteger al trabajador, sino también a otros niños cercanos que no necesitan el tratamiento. Además, la cobertura puede contribuir al aumento de la eficacia de la radiación a la hora de disminuir los niveles de bilirrubina del paciente.

Los trabajadores deben evitar la visión directa de las lámparas. Cuando deban acercarse a la fuente de radiación sería conveniente la utilización de protección ocular para fuentes de radiación UV que reúnan los requisitos básicos de protección establecidos en la norma UNE EN 166:2002 y los requisitos específicos de transmisión recogidos en la norma UNE EN 170:2003. De acuerdo con esta última norma, a los filtros utilizados con fuentes de radiación UV y visible les corresponde un código de protección 2 y un grado de protección de 2 a 4.

También es recomendable el uso de guantes y ropa adecuados para cubrir la piel cuando el trabajador deba manipular al neonato.

Caso 5. Exposición a radiación ultravioleta y visible en la iluminación de quirófanos y salas de partos.

Se pretende evaluar el riesgo por exposición a radiaciones ópticas de las personas que trabajan en quirófanos y salas de partos. Para ello, se medirán los parámetros que describen la radiación. Además, se propondrán algunas medidas de prevención que sería conveniente aplicar.

Datos operativos básicos

Las lámparas de quirófano son imprescindibles para aportar la iluminación necesaria durante las intervenciones quirúrgicas. En un quirófano se demandan de 10.000 a 100.000 lux en el área de operación y una iluminación de áreas circundantes de 500 lux.

Una de las salas de operaciones de un hospital está equipada con tres lámparas de quirófano que pueden funcionar simultáneamente durante una misma operación:

- Lámpara 1. Utiliza ledes dispuestos en una luminaria de 50 cm de diámetro.
- Lámpara 2. La luminaria está compuesta por tres círculos concéntricos de

30, 42 y 65 cm de diámetro. La fuente de luz proviene de varios ledes dispuestos en el círculo interior y en la corona circular exterior.

- Lámpara 3. Funciona con una bombilla halógena insertada en una luminaria cuya salida de luz tiene un diámetro de 35 cm.

Los filtros de las lámparas están diseñados para reducir la transmisión de la radiación IR y limitar así el aumento de temperatura en el quirófano.

Por otro lado, la iluminación general de la sala proviene de cuatro luminarias de 20 cm de ancho por 290 cm de largo situadas en el techo. Dos de las luminarias emiten luz blanca y las otras dos emiten luz azul. Estas dos últimas se utilizan cuando se aplica cirugía laparoscópica para facilitar la lectura de la pantalla del monitor, ya que la luz blanca produce reflejos en la pantalla. Los trabajadores suelen quejarse de molestias por la visión de la luz azul que ilumina toda la sala durante las operaciones.

El tipo de operaciones que se realizan en el quirófano pueden tener una duración de hasta 7 horas. Si se realizan laparoscopías, la luz azul suele estar encendida durante unas 5 horas.

Además, una de las salas de partos del hospital está equipada con una lámpara de quirófano. Si no existen complicaciones en el parto, se utiliza simplemente la iluminación general de la sala, pero en caso de que se precise realizar una episiotomía o aplicar puntos de sutura, se enciende la lámpara de quirófano para proporcionar un mayor nivel de iluminación durante la intervención. La lámpara, de 58 cm de diámetro, utiliza una fuente de iluminación halógena.

El personal hospitalario no utiliza ningún tipo de protección frente a la radiación.

Evaluación de la exposición

Las lámparas de quirófano suelen emitir principalmente en la región del visible correspondiente a la luz azul, aunque también es posible que exista emisión en la región ultravioleta (UV) e infrarroja (IR) del espectro. Se decide valorar el riesgo debido a la radiación visible y a las radiaciones UV e IR.

Mediciones

Se emplea un radiómetro de banda ancha con detectores, sensibles a las diferentes bandas de longitud de onda, dotados de los filtros adecuados para obtener los valores de irradiancia según las funciones de ponderación establecidas en el Real Decreto 486/2010 para radiaciones ópticas incoherentes.

Se realizan mediciones con el instrumento mencionado dirigiendo el detector hacia la fuente o hacia el reflejo de esta en la sábana. También se realizaron mediciones del reflejo de la radiación en la piel del trabajador o el instrumental quirúrgico. Los datos obtenidos en dichas mediciones eran muy similares a los correspondientes al reflejo en la sábana, por lo que no se han incluido en la tabla de resultados.

En la tabla 37 se muestran los siguientes datos obtenidos en los diferentes puntos de medición:

- Irradiancia efectiva para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 180 y 400 nm, E_{eff} (irradiancia ponderada con $S(\lambda)$).
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 315 y 400 nm, E_{UVA} .
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 300 y 700 nm, E_{B} (irradiancia ponderada con $B(\lambda)$).

Los resultados correspondientes a la irradiancia en las bandas de octava del IR están muy por debajo del límite de exposición, por lo que no se han incluido en la tabla 37.

Tabla 37. Valores de irradiancia correspondientes a las lámparas, obtenidos a partir de las mediciones en diferentes puntos

Ubicación	Lámpara	Punto de medición	E_{eff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	E_{UVA} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	E_{B} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Quirófano	Las tres a la vez (1+2+3)	Reflejo en la sábana, a 30 cm, desde la posición del trabajador a la altura del pecho	-	-	0,356
	2	Apuntando a la fuente, a 60 cm	0,0000042	0,042	31,6
	Luz azul	Apuntando a la fuente, a 250 cm (altura de la cintura)	-	-	0,298
Sala de partos	3	Apuntando a la lámpara, a 100 cm (altura cama)	0,0000386	0,386	44,8
		Reflejo en la sábana, a 40 cm, desde un extremo de la cama	-	0,002	0,819

Valoración de los resultados

De acuerdo con los valores límite del anexo I del Real Decreto 486/2010, el tiempo máximo de exposición a los valores medidos de E_{eff} y E_{UVA} se puede calcular a partir de las expresiones siguientes:

$$t_{\text{max}} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

$$t_{\text{max}} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Tal y como se observa en la tabla 37, no se han detectado niveles significativos de

emisión de radiación UV en ninguno de los equipos evaluados. La tabla 38 muestra el tiempo máximo de permanencia en los dos únicos puntos de medición en los que se ha detectado dicha emisión.

Tabla 38. Tiempo máximo de permanencia correspondiente a las mediciones de E_{eff} y E_{UVA} para la lámpara 2 del quirófano y la lámpara de la sala de partos

Lámpara	Punto de medición	E_{eff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max} h	E_{UVA} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{max} h
2	Apuntando a la fuente, a 60 cm	0,0000042	1.984,127	0,042	66,14
Sala de partos	Apuntando a la lámpara, a 100 cm (altura cama)	0,0000386	215,89	0,386	7,19
	Reflejo en la sábana, a 40 cm, desde un extremo de la cama	0	—	0,002	1.388,89

En cuanto a la valoración del riesgo de fotorretinitis por exposición a radiación visible, la tabla 39 muestra el tiempo de exposición máximo a dicha radiación en cada uno de los puntos de medición, calculado a partir de la siguiente expresión:

$$t_{\text{max}} = \frac{10^6}{L_B \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}} = \frac{(10^6 \cdot \omega \text{ sr})}{E_B \cdot \text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

En la tabla 40 se muestra el cálculo del área de cada uno de los puntos de emisión de la radiación.

Conclusiones

Tal y como reflejan los resultados de la evaluación no es probable que exista un riesgo de exposición a radiaciones ópticas para los trabajadores que utilizan las lámparas del quirófano y de la sala de partos.

Tan solo se ha registrado exposición a radiaciones UV en dos de los puntos de medición y en ambos casos la exposición es baja. El único punto de medición en el que el tiempo máximo de exposición a UVA para proteger contra el riesgo de cataratas es inferior a 8 h corresponde a la lámpara de la sala de partos, enfocando el detector directamente hacia la fuente. Es muy difícil que se alcance el límite de exposición, puesto que las lámparas suelen estar por encima de las cabezas de los trabajadores y es improbable que la mirada de estos se dirija directamente hacia la fuente. Además, la fuente es muy brillante, por lo que sería incómodo mirar directamente hacia ella durante periodos largos de tiempo.

Respecto a la radiación visible, ocurre algo similar, ya que los tiempos máximos de exposición sólo están por debajo de las 8h cuando el detector apunta a la fuente a una distancia relativamente corta.

Tabla 39. Cálculo del tiempo máximo de permanencia correspondiente a las mediciones de E_b para cada lámpara

		Lámpara	Punto de medición	q	A' * cm²	r cm	ω *** sr	E _{B'} W·m ⁻²	L _{B'} W·m ⁻² ·sr ⁻¹	t _{max} h
Ubicación	Quirófano	Las tres a la vez (1+2+3)	Reflejo en la sábana, a 30 cm, desde el pecho del trabajador	30°	153,04	30	0,17	0,356	2,09	132,68
		2	Apuntando a la fuente, a 60 cm	0°	2.639,72**	60	0,73	31,6	43,09	6,45
		Luz azul	Apuntando a la fuente, a 250 cm (altura de la cintura)	0°	5.800	250	0,09	0,298	3,21	86,50
	Sala de partos	Sala de partos	Apuntando a la lámpara, a 100 cm (altura cama)	0°	2.642,08	100	0,26	44,8	169,56	1,64
			Reflejo en la sábana, a 40 cm, desde un extremo de la cama	30°	272,07	40	0,17	0,819	4,82	57,67

* Para el cálculo de las áreas se han tenido en cuenta los datos de la tabla 36.

** El área de la lámpara 2 del quirófano corresponde a la suma de las áreas del círculo interno (de 30 cm de diámetro) y de la corona circular externa:
Área del círculo interno = $\pi \cdot 152 = 706,858 \text{ cm}^2$
Área de la corona circular externa = área del círculo externo – área del círculo intermedio = $\pi \cdot (32,52 - 212) = 1.932,865 \text{ cm}^2$
Área de la lámpara 2 = $706,858 + 1932,865 = 2639,723 \text{ cm}^2$

*** En todos los puntos de medición $\omega > 0,01 \text{ sr}$, por lo que en todos los casos se utilizan los ángulos sólidos calculados para obtener el valor de la radiancia efectiva «L_B».

Tabla 40. Cálculo del área de cada uno de los puntos de emisión de la radiación

		Punto de emisión	Longitud cm	Ancho cm	Área cm ²
Quirófano	Las tres a la vez (1+2+3)	Reflejo en la sábana (circular)	15	15	176,715
	Luz azul	Fuente	20	290	5.800
Sala de partos	Sala de partos	Fuente (circular)	58	58	2.642,079
		Reflejo en la sábana (circular)	20	20	314,159

Medidas preventivas

La evaluación del riesgo de la lámpara de luz azul del quirófano se debería considerar desde el punto de vista de la posible incomodidad que pueda causar a los trabajadores, ya que no presenta un riesgo en cuanto a su emisión de radiaciones ópticas. Para disminuir las molestias a los trabajadores se recomienda encender la lámpara de luz azul sólo durante el periodo de tiempo en que se realiza la cirugía laparoscópica, manteniendo un nivel de iluminación bajo.

Para disminuir los posibles efectos a largo plazo de la exposición a radiaciones UV conviene evitar que los trabajadores se sitúen justo debajo de la fuente de radiación o que miren directamente hacia ella. La fuente debería dirigirse hacia el punto en el que se precisa una mayor iluminación, evitando la dispersión de la radiación hacia otros lugares.

Conviene asimismo proteger la piel del trabajador que puede entrar en contacto con la radiación, aunque se asume que esta práctica ya se realiza de forma habitual tanto en los quirófanos como en las salas de partos.

Caso 6. Exposición a radiación ultravioleta y visible en cabinas de flujo laminar vertical.

Se pretende evaluar el riesgo por exposición a radiaciones ópticas de los trabajadores de un laboratorio de microbiología en el que se utilizan cabinas de flujo laminar vertical para asegurar la ausencia de contaminación del producto manipulado. Para ello, se medirán los parámetros que describen la radiación. También se propondrán algunas medidas de prevención que sería conveniente aplicar.

Datos operativos básicos

Las cabinas, cuya superficie de trabajo es de acero inoxidable, están equipadas con un fluorescente de luz blanca de 36 W y con un fluorescente de luz ultravioleta C que, gracias a su poder germicida, destruye los microorganismos presentes en el aire o en las superficies que están directamente expuestas a la radiación, por medio de la degradación de su ADN.

Los fluorescentes, de 2 por 70 cm cada uno, están situados en el interior de las cabinas incidiendo de forma vertical sobre la superficie de trabajo.

La luz UVC suele estar apagada y sólo se utiliza para desinfectar la cabina después de haber trabajado con ella. Normalmente la desinfección se realiza cada día al finalizar la jornada laboral.

Las cabinas disponen de paneles frontales resistentes a la radiación UV que impiden que esta incida en las áreas cercanas a la cabina.

Algunas de las cabinas incorporan sistemas de seguridad que desconectan automáticamente la luz UVC al abrir el panel frontal, pero la mayoría de ellas no cuentan con este sistema.

Recientemente uno de los investigadores del laboratorio sufrió un eritema en manos y brazos por la exposición durante 1 hora a la radiación UVC emitida por la cabina. El laboratorio dispone de una norma de seguridad en la que se especifica la prohibición de trabajar en las cabinas mientras la luz UVC esté encendida, aunque esa prohibición no se ha señalizado. El investigador herido conocía la norma, pero olvidó cerciorarse de que la luz UVC estaba apagada antes de comenzar a manipular las muestras en el interior de la cabina.

Evaluación de la exposición

Se decide evaluar el riesgo por exposición a radiación UV al que ha estado sometido el investigador accidentado.

Mediciones

Se emplea un radiómetro de banda ancha con detectores capaces de medir la irradiancia en las bandas de 220 a 400 nm (UV) y de 3.314 a 400 nm (UVA).

Se realizan mediciones con el instrumento mencionado dirigiendo el detector hacia la fuente o hacia el reflejo de esta en el interior de la cabina.

En la tabla 41 se muestran los siguientes datos obtenidos en los diferentes puntos de medición:

- Irradiancia efectiva para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 180 y 400 nm, E_{eff} (irradiancia ponderada con $S(\lambda)$).
- Irradiancia para el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 315 y 400 nm, E_{UVA} .

Tabla 41. Valores de irradiancia correspondientes al fluorescente UV, obtenidos a partir de las mediciones en diferentes puntos

Punto de medición	E_{eff} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	E_{UVA} $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Dentro de la cabina, en dirección a la fuente, a 60 cm	2,079	0,046
En el plano de entrada a la cabina, en paralelo al plano de trabajo, sin el panel frontal	0,0507	–
A 30 cm del plano de entrada a la cabina, en paralelo al plano de trabajo, sin el panel frontal	0,00745	–
A la altura de los ojos, junto al panel frontal	0,00322	0,003

Valoración de los resultados

De acuerdo con los valores límite del anexo I del Real Decreto 486/2010, el tiempo máximo de exposición a los valores medidos de E_{eff} y E_{UVA} se puede calcular a partir de las expresiones siguientes:

$$t_{\max} = \frac{30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{eff}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

$$t_{\max} = \frac{10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}}{E_{\text{UVA}} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}}$$

La tabla 42 muestra el tiempo máximo de permanencia en los puntos de medición para proteger al trabajador contra los efectos para la salud derivados de la exposición a radiación UV.

Tabla 42. Tiempo máximo de permanencia correspondiente a las mediciones de E_{eff} y E_{UVA} para la cabina

Punto de medición	E_{eff} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{\max} h	E_{UVA} $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	t_{\max} h
Dentro de la cabina, en dirección a la fuente, a 60 cm	2,079	0,004	0,046	60,386
En el plano de entrada a la cabina, en paralelo al plano de trabajo, sin el panel frontal	0,0507	0,164	0	—
A 30 cm del plano de entrada a la cabina, en paralelo al plano de trabajo, sin el panel frontal	0,00745	1,118	0	—
A la altura de los ojos, junto al panel frontal	0,00322	2,588	0,003	925,926

Conclusiones

A la vista de los resultados de la tabla 42, no existe un riesgo por exposición a radiación UVA, pero sí por exposición a las radiaciones con una longitud de onda de entre 180 y 400 nm, rango en el cual se encuentran las UVC (entre 100 y 280 nm). De acuerdo con el apartado anterior, el tiempo máximo de exposición de un trabajador situado a 60 cm de la fuente (distancia entre el plano de trabajo y el fluorescente de luz UVC) es de 14,43 segundos. Las manos y brazos del investigador accidentado permanecieron en el plano de trabajo durante aproximadamente una hora, superando por tanto el límite establecido en el Real Decreto 486/2006.

Medidas preventivas

A la vista de los datos obtenidos, sería recomendable instalar un panel frontal resistente a la radiación UV y asociar su apertura a la desconexión del fluorescente.

te de luz UVC. Como medida inmediata, se deberían señalizar las cabinas para advertir de la prohibición de trabajar en ellas cuando la luz UVC esté encendida. Además, en aplicación de los principios generales de prevención, para reducir toda exposición innecesaria, se recomiendan las siguientes medidas de prevención:

- Seleccionar e instalar los fluorescentes de radiación UV, de forma que su potencia sea la más baja posible que permita obtener la dosis de radiación requerida.
- Aumentar tanto como sea posible la distancia de las personas a las cabinas cuando la luz UVC esté encendida.
- Llevar ropa de manga larga y guantes el operador que deba permanecer un tiempo prolongado trabajando en la cabina.

BIBLIOGRAFÍA

- Directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a riesgos derivados de los agentes físicos (radiaciones ópticas artificiales).
- HSE. A non-binding guide to the artificial optical radiation Directive 2006/25/EC.
- The international commission on non-ionizing radiation protection, 2006. Icnirp statement on far infrared radiation exposure. *Health Physics*, 91(6), 630-645.
- Majidi, F., Abedi, K., Reza, S., 2011. Occupational exposure to infrared radiation in aluminum and cast-iron foundries in Zanzan Iran. *International Journal of Occupational Hygiene*, 3 (1), 33-37.
- Diego, B., Rupérez, M. J. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 755. Radiaciones ópticas: metodología de evaluación de la exposición laboral.
- Diego, B., Rupérez, M. J. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 903. Radiaciones ópticas artificiales: criterios de evaluación.
- Real Decreto 486/2010, de 23 de abril, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a radiaciones ópticas artificiales.
- Tomàs, X., Cuadros, J., González L., 2006. Introducción al cálculo numérico. IQS, Barcelona.
- Vázquez, M., Hanslmeier A., 2006. Ultraviolet radiation in the solar system. *Astrophysics and space science library*, Volume 331, Springer, The Netherlands.
- Marshall, W.J. et al., 1977. "Non-ionizing radiation protection special study no. 42-0312-77. Evaluation of the potential retinal hazards from optical radiation generated by electric welding and cutting arcs," US Army Environmental Hygiene Agency, Aberdeen Proving Ground, MD, USA.
- UNE-EN 165:2006, Protección individual de los ojos. Vocabulario.
- UNE-EN 166:2002, Protección individual de los ojos. Especificaciones.
- UNE-EN 167:2002, Protección individual de los ojos. Métodos de ensayo ópticos.
- UNE-EN 169:2003, Protección individual de los ojos. Filtros para soldadura y técnicas relacionadas. Especificaciones del coeficiente de transmisión (transmitancia) y uso recomendado.

- UNE-EN 170:2003, Protección individual de los ojos. Filtros para el ultravioleta. Especificaciones del coeficiente de transmisión (transmitancia) y uso recomendado.
- UNE-EN 171:2002, Protección individual de los ojos. Filtros para el infrarrojo. Especificaciones del coeficiente de transmisión (transmitancia) y uso recomendado.
- UNE-EN 14255-1:2007, Medición y evaluación de la exposición de las personas a la radiación óptica incoherente. Parte 1: Radiación ultravioleta emitida por fuentes artificiales en el lugar de trabajo.
- UNE-EN 14255-2:2007, Medición y evaluación de exposiciones de las personas a la radiación óptica incoherente. Parte 2: Radiación visible e infrarroja emitida por fuentes artificiales en el lugar de trabajo.
- UNE-EN 14255-3:2009, Medición y evaluación de la exposición de las personas a la radiación óptica incoherente. Parte 3: Radiación ultravioleta emitida por el sol.
- UNE-EN 14255-4:2007, Medición y evaluación de la exposición de las personas a la radiación óptica incoherente. Parte 4: Terminología y magnitudes usadas en mediciones de exposición a radiación ultravioleta, visible e infrarroja.
- UNE-EN 62471:2009, Seguridad fotobiológica de lámparas y de los aparatos que utilizan lámparas.
- UNE-EN 1598/A1:2002, Higiene y seguridad en el soldeo y procesos afines. Cortinas, lamas y pantallas transparentes para procesos de soldeo por arco.

ANEXOS

ANEXO A

Bandas de longitud de onda correspondientes a los grupos de la tabla A.1 del Real Decreto 486/2010 (ver figura A.1).

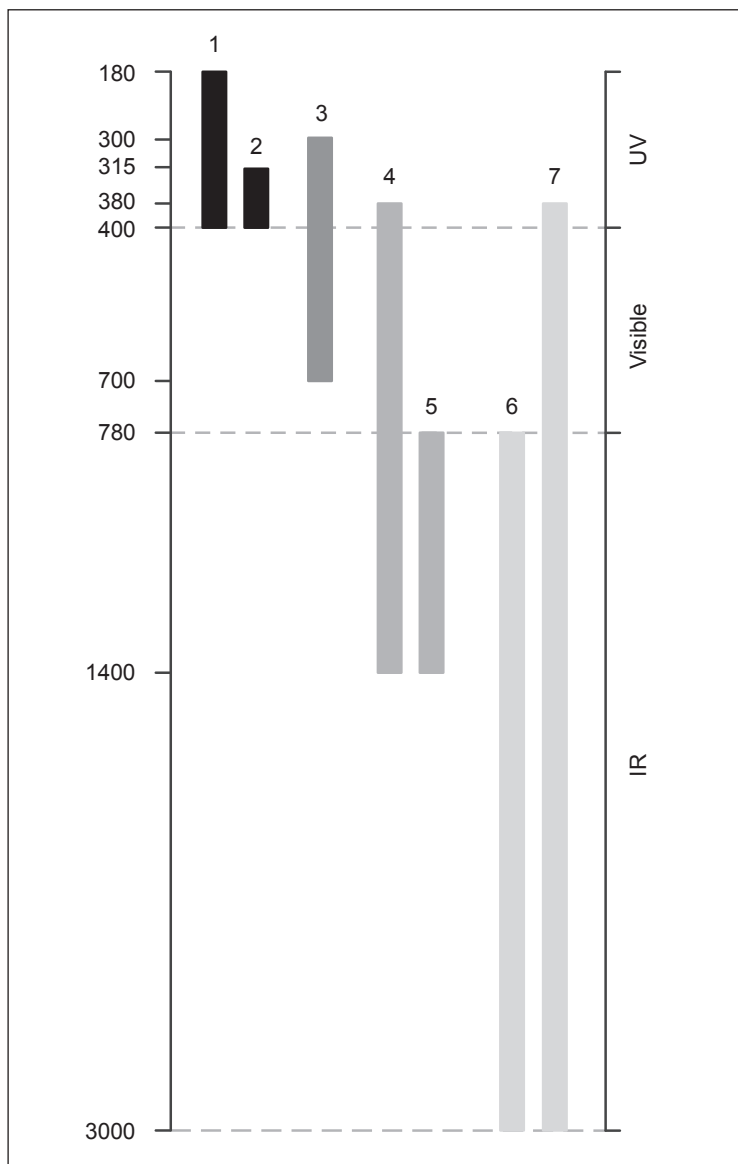


Figura A.1. Bandas de longitud de onda.

ANEXO B (ejercicio 1.4)

El error relativo «e» en tanto por ciento se calcula de la siguiente forma:

$$e = 100 \frac{|A_s - A_p|}{A_s}$$

siendo « A_s » el valor del área esférica (el área proyectada sobre la esfera) y « A_p » el área plana.

$$A_s = \frac{\pi}{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2} \left(r^2 + d^2 \left(\sqrt{1 + \left(\frac{r}{d}\right)^2} - 1 \right)^2 \right)$$

$$A_p = \pi \cdot r^2$$

La figura B.1 muestra el error relativo en función del radio del sensor y de la distancia entre el sensor y la fuente. Se observa que, en general, el error es inferior al 0,75% cuando « $r/d < 0,1$ ».

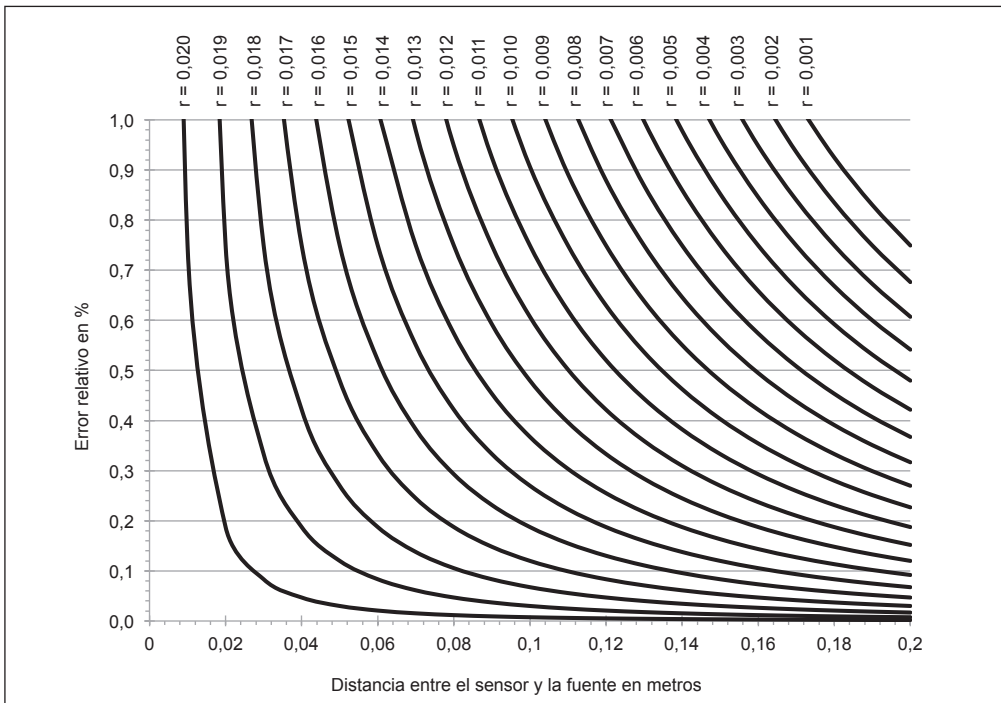


Figura B.1. Error relativo en porcentaje para la aproximación del cálculo del área del ejercicio 1.4.

ANEXO C (ejercicio 1.8)

El error relativo «e» en tanto por ciento en la aproximación « $\tan \alpha \approx \alpha$ » se calcula de la siguiente forma:

$$e = 100 \frac{|\tan \alpha - \alpha|}{\tan \alpha}$$

Cuando el ángulo es superior a 0,173031 rad, el error relativo en la aproximación « $\tan \alpha \approx \alpha$ » es superior al 1% (ver figura C.1).

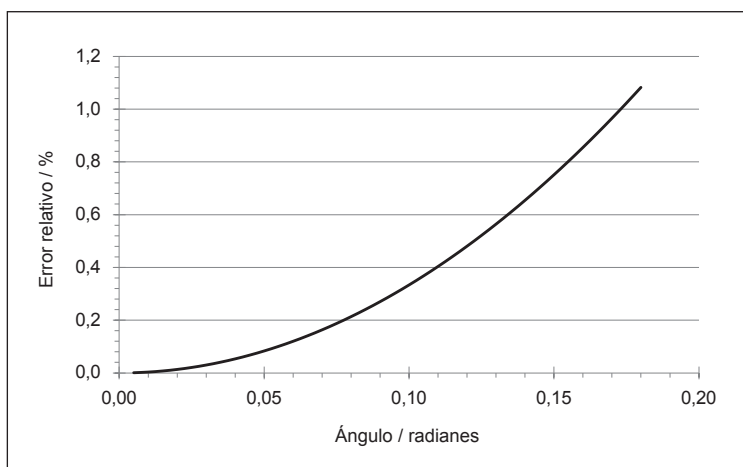


Figura C.1. Error relativo para la aproximación « $\tan \alpha \approx \alpha$ »

ANEXO D (ejercicio 1.12)

A continuación se detallan los pasos para el cálculo de la radiancia total de un cuerpo negro en una banda de longitudes de onda. Partiendo de la ley de Planck para la radiancia espectral de un cuerpo negro, la radiancia total se obtiene integrando dicha expresión a lo largo del intervalo $[\lambda_1, \lambda_2]$:

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda \quad \text{tal que } \lambda_2 > \lambda_1$$

$$L_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{Ley de Planck}$$

$$L = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda$$

Se hace el cambio de variable siguiente:

$$x = \frac{hc}{kT\lambda} \rightarrow d\lambda = -\frac{kT}{hc} \lambda^2 dx$$

$$x_1 = \frac{hc}{kT\lambda_1} \quad x_2 = \frac{hc}{kT\lambda_2}$$

Sustituyendo en la integral se obtiene:

$$\begin{aligned} L &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda = \int_{x_1}^{x_2} -\frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{kT}{hc} \lambda^2 \cdot \frac{1}{e^x - 1} dx = -2hc^2 \frac{kT}{hc} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{e^x - 1} dx \\ &= -2hc^2 \frac{kT}{hc} \cdot \left(\frac{kT}{hc} \right)^3 \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{hc}{kT} \right)^3 \cdot \frac{1}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{e^x - 1} dx = -2hc^2 \left(\frac{kT}{hc} \right)^4 \int_{x_1}^{x_2} x^3 \cdot \frac{1}{e^x - 1} dx \\ &= -2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \int_{x_1}^{x_2} x^3 \cdot \frac{1}{e^x - 1} dx \end{aligned}$$

El término « $1/e^x - 1$ » se puede desarrollar aplicando Taylor de forma que:

$$\frac{1}{e^x - 1} = \sum_{n=1}^{n=\infty} e^{-nx}$$

Introduciendo la igualdad anterior en la integral:

$$L = -2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \int_{x_1}^{x_2} x^3 \cdot \frac{1}{e^x - 1} dx = -2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \int_{x_1}^{x_2} x^3 \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} e^{-nx} dx = -2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} \int_{x_1}^{x_2} x^3 \cdot e^{-nx} dx$$

La integral resultante puede resolverse por partes:

$$\begin{aligned}
 \int x^3 e^{-nx} dx &= \left[\begin{array}{ll} u = x^3 & du = 3x^2 dx \\ dv = e^{-nx} dx & v = -\frac{e^{-nx}}{n} \end{array} \right] = -x^3 \frac{e^{-nx}}{n} + \int 3x^2 \frac{e^{-nx}}{n} dx \\
 &= -x^3 \frac{e^{-nx}}{n} + \frac{3}{n} \int x^2 e^{-nx} dx = \left[\begin{array}{ll} u = x^2 & du = 2x dx \\ dv = e^{-nx} dx & v = -\frac{e^{-nx}}{n} \end{array} \right] = \\
 &= -x^3 \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{3}{n} x^2 \frac{e^{-nx}}{n} + \frac{3}{n} \int 2x \frac{e^{-nx}}{n} dx \\
 &= -x^3 \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{3}{n} x^2 \frac{e^{-nx}}{n} + \frac{6}{n^2} \int x e^{-nx} dx = \left[\begin{array}{ll} u = x & du = dx \\ dv = e^{-nx} dx & v = -\frac{e^{-nx}}{n} \end{array} \right] \\
 &= -x^3 \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{3}{n} x^2 \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{6}{n^2} x \frac{e^{-nx}}{n} + \frac{6}{n^2} \int \frac{e^{-nx}}{n} dx = \\
 &= -x^3 \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{3}{n} x^2 \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{6}{n^2} x \frac{e^{-nx}}{n} - \frac{6}{n^2} \frac{e^{-nx}}{n^2} = e^{-nx} \left(\frac{x^3}{n} + 3 \frac{x^2}{n^2} + 6 \frac{x}{n^3} + 6 \frac{1}{n^4} \right)
 \end{aligned}$$

Sustituyendo este resultado en la expresión de la radiancia, se obtiene:

$$L = -2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \int_{x_1}^{x_2} x^3 e^{-nx} dx = 2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(e^{-nx} \left(\frac{x^3}{n} + 3 \frac{x^2}{n^2} + 6 \frac{x}{n^3} + 6 \frac{1}{n^4} \right) \right) \Bigg|_{x_1}^{x_2}$$

Finalmente sólo hace falta sustituir los límites de integración y deshacer el cambio de variable inicial:

$$\begin{aligned}
 L &= 2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \left(\sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{x_2^3}{n} + \frac{3x_2^2}{n^2} + \frac{6x_2}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_2} - \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{x_1^3}{n} + \frac{3x_1^2}{n^2} + \frac{6x_1}{n^3} + \frac{6}{n^4} \right) e^{-nx_1} \right) \\
 x_i &= \frac{hc}{kT\lambda_i}
 \end{aligned}$$

Si se quiere obtener la radiancia total del espectro electromagnético, entonces sólo hay que hacer $\lambda_1 = 0$ y $\lambda_2 = \infty$ en la expresión anterior, de forma que se obtiene la siguiente ecuación:

$$L = 2 \frac{k^4 T^4}{h^3 c^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{6}{n^4} \right) = 2 \frac{\pi^4 k^4}{15 h^3 c^2} T^4 = \frac{\sigma}{\pi} T^4 [W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}]$$

constante de Stefan – Boltzmann: $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

ANEXO E (ángulos mínimos)

El área irradiada en la retina depende, en mayor medida, del tamaño de la angular de la fuente. Este valor de área irradiada es necesario para aquellas situaciones en las que se debe estimar el valor de la radiancia «L_e» a partir de la irradiancia «E_e» (ejercicio 1.7).

Debido a las características físicas del globo ocular existen unos valores mínimos que dependen del tiempo de exposición (UNE-EN 62471:2008). Se excluyen aquellas situaciones en las que el ojo está fijado médicamente, como, por ejemplo, durante operaciones oftalmológicas.

- El tamaño angular mínimo de una imagen en la retina es $\alpha_{\min} = 0,0017$ radianes. Este tamaño mínimo se mantiene constante hasta los 0,25 segundos.
- Cuando el tiempo de exposición es de 10 a 100 segundos, la imagen retiniana se extiende hasta cubrir un área tal que el ángulo mínimo plano correspondiente es de 0,011 radianes. Este tamaño mínimo es debido a los movimientos rápidos del ojo.
- A partir de 10⁴ segundos (unas 2,8 horas) el tamaño de la imagen tiene un tamaño angular mínimo de 0,1 radianes debido, principalmente, a los movimientos del ojo determinados por la tarea.

La norma UNE-EN 62471:2008 presenta la dependencia temporal de los ángulos de la forma que se muestra en la tabla 43.

Tabla 43. Dependencia temporal de los ángulos (UNE-EN 62471:2008)

Tipo de riesgo a valorar	Duración de la exposición s	Campo de visión ⁽¹⁾ rad
Fotorretinitis	0,25-10	$0,011 \cdot (t/10)^{0,5}$
	10-100	0,011
	100-10.000	$0,00 \cdot t^{0,5}$
	>10.000	0,1
Lesión térmica retiniana cuando existe estímulo visual	<0,25-10	0,0017
	0,25-10	$0,011 \cdot (t/10)^{0,5}$
Lesión térmica retiniana cuando el estímulo visual es débil	>10	0,011
(1) Ángulo plano que cubre la imagen en la retina		

Para simplificar el manejo de la tabla 43 y seleccionando valores conservativos, en la resolución de los problemas de este texto se han utilizado los valores angulares que se indican en la tabla 44. Desde un punto de vista preventivo esta opción es favorable, pues se obtienen valores de radiancia superiores; no obstante, si el re-

sultado de los cálculos muestra que se superan los valores límite, deben revisarse con atención los factores de exposición para asegurarse de que no se trata de una sobrevaloración exagerada de la misma.

Tabla 44. Valores angulares utilizados a partir de la propuesta de la norma UNE-EN 62471:2008

Tiempo exposición s	Valores mínimos	
	Ángulo plano α rad	Ángulo sólido ⁽¹⁾ ω sr
t < 10	0,0017	0,000002
10 ≤ t < 10.000	0,011	0,0001
t > 10.000	0,1	0,008
(1) El ángulo sólido se ha calculado a partir del ángulo plano utilizando la expresión incluida en la nota final del ejercicio 1.4		

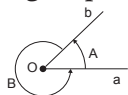
APÉNDICES

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Absorbancia

Logaritmo en base diez de la relación entre la intensidad incidente y la intensidad que atraviesa el medio.

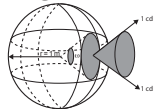
Ángulo plano



Cada una de las dos partes en que dos semirrectas con el mismo origen dividen al plano que determinan.

Unidad SI: rad (Radián)

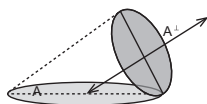
Ángulo sólido



Es el ángulo que desde un punto subtiende un objeto en el espacio tridimensional.

Unidad SI: sr (Estereorradián)

Área aparente



El área aparente vista desde una dirección determinada se define como la proyección de una superficie sobre un plano perpendicular a dicha dirección.

$$A^{\perp} = A \cdot \cos \alpha$$

Candela

Unidad básica (SI) de intensidad luminosa en una dirección dada de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$ Hz y de la cual la intensidad radiada en esa dirección es 1/683 vatios por estereorradián.

Energía radiante

Energía emitida, transferida o recibida en forma de radiación.

Unidad SI: J (Julio)

Exposición radiante (H)

La irradiancia integrada con respecto al tiempo, expresada en julios por metro cuadrado ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$).

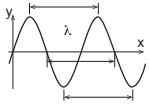
Fotometría

Ciencia que se ocupa del estudio de la medida de la parte de la radiación electromagnética correspondiente a la parte visible del espectro.

Fotón

Cuanto de luz: partícula luminosa sin masa y con energía « $h \cdot f$ » donde « f » es la frecuencia asociada a la luz y « h » la constante de Planck.

Frecuencia	Número de vibraciones o ciclos por unidad de tiempo. Unidad SI: Hz (Hercio)
Flujo luminoso	Energía radiante de una fuente de luz que produce una sensación luminosa. $\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$ Unidad SI: lm (Lumen)
Flujo radiante	Potencia total de la radiación electromagnética, se define como la energía de las ondas electromagnéticas por unidad de tiempo. $\phi = \frac{dQ}{dt}$ Unidad SI: W (Vatio)
Iluminancia	Cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área. $E = \frac{\phi}{S}$ Unidad SI: lx (lux)
Intensidad luminosa	Cantidad de flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. $I = \frac{\phi}{\omega}$ Unidad SI: cd (Candela)
Intensidad radiante	Flujo radiante por unidad de ángulo sólido. Unidad SI: $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ (Vatio por estereorradián)
Irradiancia (E)	Irradiancia o densidad de potencia: es la potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie. $E = \frac{d\phi}{dA}$ Unidad SI: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Vatio por metro cuadrado)
Isotropía	Propiedad de un cuerpo consistente en que cualquiera que sea la dirección que en el mismo se considere, presenta el mismo comportamiento e idénticas propiedades. RAE: Característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección.
Láser	Láser: Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (del inglés: <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>); todo dispositivo susceptible de producir o amplificar la radiación electromagnética en el intervalo de la longitud de onda de la radiación óptica, principalmente mediante el proceso de emisión estimulada controlada.

Longitud de onda 	<p>Distancia desde el inicio de un ciclo completo de una onda hasta su final.</p> <p>La relación entre longitud de onda (λ), velocidad de la onda (v) y su frecuencia (f) es:</p> $\lambda = \frac{v}{f}$ <p>Unidad SI: m (Metro)</p>
Luminancia	<p>Densidad angular y superficial de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada.</p> $L_v = \frac{d^2\Phi}{dS \cdot d\omega S \cdot d\omega}$ <p>Unidad SI: cd·m⁻² (Candela por metro cuadrado)</p>
Radiación electromagnética	<p>Combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía.</p>
Radiación incoherente	<p>Toda radiación óptica distinta de una radiación láser.</p>
Radiación infrarroja	<p>Radiación óptica cuya longitud de onda es mayor que las de las radiaciones visibles.</p> <p>El intervalo de radiaciones infrarrojas, entre 780 nm y 106 nm, se suele dividir en:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Radiaciones infrarrojas A (de 780 nm a 1.400 nm) - Radiaciones infrarrojas B (de 1.400 nm a 3.000 nm) - Radiaciones infrarrojas C (de 3.000 nm a 10⁶ nm).
Radiación isótropa	<p>Radiación que presenta las mismas propiedades, independientemente de la dirección en que se midan.</p>
Radiación láser	<p>Radiación óptica procedente de un láser.</p>
Radiación óptica	<p>Radiación electromagnética de una longitud de onda entre la región de transición a rayos X (longitud de onda aproximada de 1 nm) y la región de transición a ondas de radio (longitud de onda aproximada de 10⁶ nm).</p>
Radiación ultravioleta	<p>Radiación óptica cuya longitud de onda es menor que la de la radiación visible.</p> <p>El intervalo de radiación ultravioleta, entre 100 nm y 400 nm, se suele dividir en:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Radiación UVA, de 315 a 400 nm - Radiación UVB, de 280 a 315 nm - Radiación UVC, de 100 a 280 nm

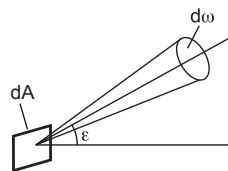
Radiación visible

Cualquier radiación óptica capaz de provocar directamente una sensación visual.

Nota: No existen límites precisos para el intervalo espectral de las radiaciones visibles, ya que estas dependen de la cantidad de potencia radiante que llega a la retina y de la sensibilidad del observador. El límite inferior generalmente aceptado se sitúa entre 360 y 400 nm, y el superior entre 760 y 830 nm.

Radiancia (L)

La radiancia en una dirección determinada en un punto determinado de una superficie real o teórica se define mediante la fórmula:



$$L = \frac{d\Phi}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad \text{Unidad SI: } \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \text{ (Vatio por metro cuadrado y estereorradián)}$$

donde: dF_v es la potencia radiante transmitida por un rayo elemental que pasa a través del punto determinado y se propaga en el ángulo sólido $d\omega$ que contiene la dirección determinada; dA es la superficie de una sección de ese rayo que contiene el punto determinado; ϵ es el ángulo entre el ángulo normal de esa sección y la dirección del rayo.

Radiometría

Ciencia que se ocupa del estudio de la medida de la radiación electromagnética. Su campo abarca todas las longitudes de onda del espectro electromagnético.

Temperatura de color

Temperatura del cuerpo negro que emite una radiación de la misma cromaticidad que la radiación considerada.

Unidad SI: K (Grados Kelvin)

Transmitancia

Relación entre la intensidad que atraviesa el medio y la intensidad incidente.

FORMULARIO

Expresión	Valor límite	Parte del cuerpo/Riesgo
<p>λ: 180-400 nm (UV A-B-C)</p> $E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$ $H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} \cdot \Delta t$	$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ <p>(valor referido a 8 horas)</p>	<p>OJOS</p> <p>Córnea → Fotoqueratitis</p> <p>Conjuntiva → Conjuntivitis</p> <p>Cristalino → Cataratas</p> <p>PIEL</p> <p>Eritema, elastosis, cáncer de piel</p>
<p>λ: 315-400 nm (UVA)</p> $E_{\text{UVA}} = \sum_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$ $H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} \cdot \Delta t$	$H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ <p>(valor referido a 8 horas)</p>	<p>OJOS</p> <p>Cristalino → Cataratas</p>
<p>λ: 300-700 nm (luz azul)¹</p> <p>($\alpha \geq 11 \text{ mrad}$)</p> $L_B = \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	<p>$t \leq 10.000 \text{ s}$</p> $L_B = 10^6 \cdot t^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ <p>$t > 10.000 \text{ s}$</p> $L_B = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	<p>OJOS</p> <p>Retina → Fotorretinitis</p>
<p>($\alpha < 11 \text{ mrad}$)²</p> $E_B = \sum_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	<p>$t \leq 10.000 \text{ s}$</p> $E_B = 100 \cdot t^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ <p>$t > 10.000 \text{ s}$</p> $E_B = 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	
<p>λ: 380-1.400 nm (visible e IRA)</p> $L_R = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	<p>$t > 10 \text{ s}$</p> $L_R = (2,8 \cdot 10^7) \cdot C_a^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ <p>$10 \mu\text{s} \leq t < 10 \text{ s}$</p> $L_R = (5 \cdot 10^7) \cdot (C_a^{-1} \cdot t^{-0,25}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ <p>$t < 10 \text{ s}$</p> $L_R = (8,89 \cdot 10^8) \cdot (C_a^{-1}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	<p>$\alpha \leq 1,7 \text{ mrad}$</p> $C_a = 1,7$ <p>$1,7 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$</p> $C_a = \alpha$ <p>$\alpha > 100 \text{ mrad}$</p> $C_a = 100$
<p>λ: 780-1.400 nm (IRA)</p> $L_R = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$	<p>$t > 10 \text{ s}$</p> $L_R = (6 \cdot 10^6) \cdot C_a^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ <p>$10 \mu\text{s} \leq t < 10 \text{ s}$</p> $L_R = (5 \cdot 10^7) \cdot (C_a^{-1} \cdot t^{-0,25}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ <p>$t < 10 \text{ s}$</p> $L_R = (8,89 \cdot 10^8) \cdot (C_a^{-1}) \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	<p>$\alpha \leq 11 \text{ mrad}$</p> $C_a = 11$ <p>$11 \leq \alpha \leq 100 \text{ mrad}$</p> $C_a = \alpha$ <p>$\alpha > 100 \text{ mrad}$</p> $C_a = 100$

<p>λ: 780-3.000 nm (IRA e IRB)</p> $E_{IR} = \sum_{\lambda=780\text{ nm}}^{\lambda=3.000\text{ nm}} E_{\lambda} \cdot (\lambda) \cdot d\lambda$	<p>$t \leq 1.000\text{ s}$ $E_{IR} = 18.000 \cdot t^{0,75} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$</p> <hr/> <p>$t > 1.000\text{ s}$ $E_{IR} = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$</p>	<p>OJOS Córnea → Quemaduras Cristalino → Cataratas</p>
<p>λ: 380-3.000 nm (visible, IRA e IRB)</p> $E_{IR} = \sum_{\lambda=380\text{ nm}}^{\lambda=3.000\text{ nm}} E_{\lambda} \cdot (\lambda) \cdot d\lambda$ $H_{piel} = E_{piel} \cdot \Delta t$	<p>$t < 10\text{ s}$ $H_{piel} = 20.000 \cdot t^{0,25} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$</p>	<p>PIEL Quemaduras</p>

- 1 El intervalo de 300 a 700 nm comprende parte de los rayos UVB, todos los UVA y la mayor parte de las radiaciones visibles, denominándose riesgo «de luz azul». En sentido estricto, la luz azul corresponde únicamente al intervalo de 400 a 490 nm aproximadamente.
- 2 Para fijar la mirada sobre fuentes muy pequeñas con un $\alpha < 11\text{ mrad}$, « L_B » puede convertirse a « E_B ». Esto es aplicable únicamente en el caso de instrumentos oftalmológicos o al ojo estabilizado durante la anestesia. El tiempo máximo de «mirada fija» se calcula mediante la fórmula: $t_{\max} = 100 \cdot E_B^{-1}$, este valor debido al movimiento ocular no es superior a 100 s.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EMPLEO
Y SEGURIDAD SOCIAL



INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO