

ANEXO II
Radiaciones ópticas láser

A. Tabla B.1 Valores límite de exposición de los ojos al láser ($T_{Exposición} \geq 10s$)

| Longitud de onda λ (nm) | Apertura | VALOR Límite | | Efecto |
|---------------------------------|-----------------------|---|--|-------------------------------------|
| | | Duración $10^1 \dots 10^3$ | $10^4 \dots 3 \cdot 10^4$ | |
| UVC | 3,5 mm | H=30 (J/m ²) | | Lesiones fotoquímicas y térmicas |
| UVB | | H=30 (J/m ²) | | |
| | 303 | H=40 (J/m ²) | | |
| | 304 | H=60 (J/m ²) | | |
| | 305 | H=100 (J/m ²) | | |
| | 306 | H=160 (J/m ²) | | |
| | 307 | H=250 (J/m ²) | | |
| | 308 | H=400 (J/m ²) | | |
| | 309 | H=630 (J/m ²) | | |
| | 310 | H=1·10 ³ (J/m ²) | | |
| | 311 | H=1,6·10 ³ (J/m ²) | | |
| | 312 | H=2,5·10 ³ (J/m ²) | | |
| | 313 | H=4,0·10 ³ (J/m ²) | | |
| | 314 | H=6,3·10 ³ (J/m ²) | | |
| UVA | 3,5 mm | H=1·10 ⁴ (J/m ²) | | Lesiones fotoquímicas y térmicas |
| Visible (2) | 400-600 | $E=1 \cdot C_B$ (W/m ²) $\gamma=1,1 \cdot t^{0,5}$ mrad (3) | $E=1 \cdot C_B$ (W/m ²) $\gamma=110$ mrad (3) | Lesiones de la retina (fotoquímica) |
| | 400-700 | Si $\alpha \leq 1,5$ mrad Entonces $E=10$ (J/m ²) | | Lesiones de la retina (térmica) |
| | | Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t \leq T_2$ Entonces $H=18 \cdot C_E \cdot t^{0,75}$ (J/m ²) | | |
| IRA | 7 mm | Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t > T_2$ Entonces $E=18 \cdot C_E \cdot T_2^{-0,25}$ (W/m ²) | | Lesiones térmicas |
| | | Si $\alpha \leq 1,5$ mrad Entonces $E=10 \cdot C_A \cdot C_C$ (W/m ²) | | |
| | | Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t \leq T_2$ Entonces $H=18 \cdot C_A \cdot C_C \cdot C_E \cdot t^{0,75}$ (J/m ²) | | |
| IRB e IRC | 1400- 10 ⁶ | | $E=18 \cdot C_A \cdot C_C \cdot T_2^{-0,25}$ (W/m ²) $E=1000$ (W/m ²) | Lesiones térmicas |

(1) Si aparecen dos límites para la longitud de onda del láser, se aplicará el más restrictivo.

(2) En el caso de una fuente pequeña con un $\alpha \leq 1,5$ mrad, los valores límite de E para la radiación visible (400 a 600nm) se reducen a los límites térmicos para $10 \leq t < T_1$ y a los límites fotoquímicos para exposiciones mayores. Los valores de T_1 y T_2 véase el apartado B de este anexo. Los valores límite para las lesiones de retina fotoquímica también pueden expresarse como $G=10^6 \cdot C_B$ (J·m⁻²·sr⁻¹) para $10 < t \leq 10.000s$ y $L=100 \cdot C_B$ para $1 > t > 10.000s$. Para medir G y L, γ_m debe emplearse como campo visual para el cálculo de los promedios. La frontera oficial entre la radiación visible y la infrarroja es de 780 nm según la CIE. (La notación G la utiliza CEN, Lp la utiliza CEI y CENELEC) (G: radiancia integrada, es la integral de la radiancia con respecto a un tiempo de exposición, expresada como energía radiante por unidad de área de la superficie radiante y por unidad de ángulo sólido de emisión, en julios por metro cuadrado por estereorradián (J·m⁻²·sr⁻¹)).

(3) γ : Ángulo del cono límite del campo visual de medición expresado en milirradiantes (mrad); γ_m : campo visual de medición (mrad). Si $\alpha > \gamma$, entonces $\gamma_m = \alpha$ (si se emplea un campo visual de medición mayor, el riesgo resulta sobrevalorado.) Si $\alpha < \gamma$, γ_m debe ser lo suficientemente amplio para incluir la fuente en su totalidad, pero no está limitado de otro modo y podría ser mayor que γ . α : ángulo subtendido de una fuente en milirradiantes (mrad). Abertura límite: la superficie circular sobre la que se calculan los promedios de la irradiancia y la exposición radiante.

(4) Para λ entre 1.400 y 10.000 nm el diámetro de apertura es 3,5mm. Para λ entre 10^5 a 10^6 el diámetro de apertura es 11 mm

Tabla B.2. Valores límite de exposición de los ojos al láser ($T_{\text{Exposición}} < 10s$)

| Longitud de onda λ (nm) (1) | Apertura | VALOR Límite | | | Efecto | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|--|--|----------------------------------|
| | | 10^{-13} a 10^{-11} | 10^{-11} a 10^{-9} | Duración | | | |
| UVC | | | | 10^{-9} a 10^{-7} | $5 \cdot 10^{-5}$ a 10^{-3} | $5 \cdot 10^{-5}$ a 10^{-10} | Lesiones fotoquímicas y térmicas |
| UVB | 180-280 | | | $H = 30$ | (J/m^2) | | |
| | 280-302 | | | $H = 30$ | (J/m^2) | | |
| | 303 | | | $H = 40$ | (J/m^2) | Si $t < 2,6 \cdot 10^{-9}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 304 | | | $H = 60$ | (J/m^2) | Si $t < 1,3 \cdot 10^{-8}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 305 | | | $H = 100$ | (J/m^2) | Si $t < 1,0 \cdot 10^{-7}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 306 | | | $H = 160$ | (J/m^2) | Si $t < 6,7 \cdot 10^{-7}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 307 | | | $H = 250$ | (J/m^2) | Si $t < 4,0 \cdot 10^{-6}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 308 | | | $H = 400$ | (J/m^2) | Si $t < 2,6 \cdot 10^{-5}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 309 | | | $H = 630$ | (J/m^2) | Si $t < 1,6 \cdot 10^{-4}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| | 310 | | | $H = 1 \cdot 10^3$ | (J/m^2) | Si $t < 1,0 \cdot 10^{-3}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | |
| 311 | | | $H = 1,6 \cdot 10^3$ | (J/m^2) | Si $t < 6,7 \cdot 10^{-3}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | | |
| 312 | | | $H = 2,5 \cdot 10^3$ | (J/m^2) | Si $t < 4,0 \cdot 10^{-2}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | | |
| 313 | | | $H = 4,0 \cdot 10^3$ | (J/m^2) | Si $t < 2,6 \cdot 10^{-1}$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | | |
| 314 | | | $H = 6,3 \cdot 10^3$ | (J/m^2) | Si $t < 1,6$ entonces $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (3) | | |
| UVA | | | | | | $H = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$ (J/m^2) | Lesiones fotoquímicas y térmicas |
| 400-700 | | | | $H = 5 \cdot 10^{-3} \cdot C_E$ (J/m^2) | $H = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E$ (J/m^2) | | |
| Visible e IRA | 7 mm | | | $H = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot C_E$ (J/m^2) | $H = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,75} \cdot C_E$ (J/m^2) | | |
| | | | | $H = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2) | $H = 2,7 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2) | $H = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_E$ (J/m^2) | |
| | | | | $H = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2) | $H = 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,75} \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2) | $H = 90 \cdot t^{0,75} \cdot C_C \cdot C_E$ (J/m^2) | |
| 1400-1500 | | | $E = 1 \cdot 10^{12}$ (W/m^2) | (2) | $H = 1 \cdot 10^3$ (J/m^2) | $H = 5,6 \cdot 10^8 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2) | Lesiones térmicas |
| 1500-1800 | Véase (4) | | $E = 1 \cdot 10^{13}$ (W/m^2) | (2) | $H = 1 \cdot 10^4$ (J/m^2) | $H = 5,6 \cdot 10^8 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2) | |
| 1800-2600 | | $E = 1 \cdot 10^{12}$ (W/m^2) | (2) | $H = 1 \cdot 10^3$ (J/m^2) | $H = 5,6 \cdot 10^8 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2) | | |
| 2600-10 ⁶ | | $E = 1 \cdot 10^{11}$ (W/m^2) | (2) | $H = 100$ (J/m^2) | $H = 5,6 \cdot 10^8 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2) | | |

(1) Si aparecen dos límites para la longitud de onda del láser, se aplicará el más restrictivo.
 (2) habida cuenta de la falta de datos para estas duraciones de los pulsos, se recomienda la utilización de límites de irradiancia para los establecidos por la ICNIRP
 (3) En caso de múltiples pulsos, las duraciones del pulso láser de los pulsos producidos en un intervalo T_{max} (Tabla B.7) deberán ser sumado y el valor del tiempo resultante sustituirse por t en $5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t^{0,25}$
 (4) Cuando $1400 \leq \lambda < 10^6$ el diámetro de apertura es 1mm para $t \leq 0,3$ y $1,5 \cdot t^{0,75}$ para $0,3 < t < 10$. Cuando $10 \leq \lambda < 10^6$ el diámetro de apertura es 11mm.

Tabla B.3 Valores límite de exposición de la piel al láser

| Longitud de onda λ (nm) | Apertura | VALOR Límite | | | | Efecto | |
|---------------------------------|----------------------|---|--|---|--|--|-------------------|
| | | Duración | | | | | |
| | | 10^{-9} - 10^{-7} | 10^2 - 10^3 | 10^3 - 10^4 | 10^4 - $3 \cdot 10^4$ | | |
| UV (A,B,C) | | $<10^9$ | Mismos valores que los límites de exposición para los ojos (tabla B.1 y B.2) | | | | Eritema |
| Visible e IRA | 180-400 | $E=3 \cdot 10^{10}$ (W/m ²) | | | | | Lesiones térmicas |
| | 400-700 | $E=2 \cdot 10^{11}$ (W/m ²) | | | | | |
| IRB e IRC | 700-1400 | $E=2 \cdot 10^{11} \cdot C_A$ (W/m ²) | $H=200 \cdot C_A$ (J/m ²) | $H=1,1 \cdot 10^4 \cdot C_A \cdot t^{0,25}$ (J/m ²) | $E=2 \cdot 10^3 \cdot C_A$ (W/m ²) | Lesiones térmicas | |
| | 1400-1500 | $E=1 \cdot 10^{12}$ (W/m ²) | | | | | |
| | 1500-1800 | $E=1 \cdot 10^{13}$ (W/m ²) | | | | | |
| | 1800-2600 | $E=1 \cdot 10^{12}$ (W/m ²) | | | | | |
| | 2600-10 ⁶ | $E=1 \cdot 10^{11}$ (W/m ²) | | | | | |
| | | 3,5 mm | | | | Mismos valores que los límites de exposición para los ojos (tabla B.1 y B.2) | Lesiones térmicas |

(1) Si aparecen dos límites para la longitud de onda del láser, se aplicará el más restrictivo.

B. Expresiones y factores de corrección

Los valores de exposición a las radiaciones ópticas que son pertinentes desde un punto de vista biofísico pueden determinarse mediante las fórmulas recogidas a continuación. Los resultados deben compararse con los correspondientes valores límite establecidos en las tablas B.1, B.2 y B.3

A una determinada fuente de radiación óptica láser pueden corresponder varios valores de exposición con sus correspondientes límites de exposición.

Para el cálculo de los coeficientes de las expresiones de las tablas B.1, B.2 y B.3 deben consultarse las tablas B.4, B.5, B.6 y B.7 (Parámetros utilizados por la ICNIRP)

Donde:

$$E = \frac{dP}{dA} [W m^{-2}]$$

dP: Potencia, expresada en vatios (W)

dA: Área o superficie, expresada en metros (m)

E(t), E : Irradiancia o densidad de potencia espectral, la potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie, expresada en vatios por metro cuadrado ($W \cdot m^{-2}$).

Los valores E(t) y E pueden proceder de mediciones o pueden ser facilitados el fabricante.

$$H = \int_0^t E(t) \cdot dt [J m^{-2}]$$

H : Exposición radiante, la integral con respecto al tiempo de la irradiancia, expresada en julios por metro cuadrado ($J \cdot m^{-2}$)

t: Duración de la exposición, expresada en segundos (s).

λ : Longitud de onda, expresada en nanómetros (nm)

Tabla B.4 Determinación del cálculo del C_A , C_B , C_C y T_1

| Factor | Longitud de onda λ (nm) | Valor |
|--------|---------------------------------|--|
| C_A | $\lambda < 700$ | $C_A = 1,0$ |
| | $700 \text{ --- } 1050$ | $C_A = 10^{0,002 \cdot (\lambda - 700)}$ |
| | $1050 \text{ --- } 1400$ | $C_A = 5,0$ |
| C_B | $400 \text{ --- } 450$ | $C_B = 1,0$ |
| | $450 \text{ --- } 700$ | $C_B = 10^{0,02 \cdot (\lambda - 450)}$ |
| C_C | $700 \text{ --- } 1150$ | $C_C = 1,0$ |
| | $1150 \text{ --- } 1200$ | $C_C = 10^{0,018 \cdot (\lambda - 1150)}$ |
| | $1200 \text{ --- } 1400$ | $C_C = 8,0$ |
| T_1 | $\lambda < 450$ | $T_1 = 10 \text{ (s)}$ |
| | $450 \text{ --- } 500$ | $T_1 = 10 \cdot 10^{0,02 \cdot (\lambda - 450)} \text{ (s)}$ |
| | $\lambda > 500$ | $T_1 = 100 \text{ (s)}$ |

Tabla B.5 Determinación del cálculo del C_E

| Factor | Intervalo de α (mrad) $\alpha_{\min} = 1,5$ mrad (efectos térmicos) | Valor |
|--------|---|--|
| C_E | $\alpha < \alpha_{\min}$ | $C_E = 1,0$ |
| | $\alpha_{\min} < \alpha < 100$ | $C_E = \alpha / \alpha_{\min}$ |
| | $\alpha > 100$ | $C_E = \alpha^2 / (\alpha_{\min} \cdot \alpha_{\max})$ con $\alpha_{\max} = 100$ mrad |
| T_2 | $\alpha < 1,5$ | $T_2 = 10$ (s) |
| | $1,5 < \alpha < 100$ | $T_2 = 10 \cdot 10^{(\alpha - 1,5) / 98,5}$ (s) |
| | $\alpha > 100$ | $T_2 = 100$ (s) |

Tabla B.6 Determinación del cálculo del γ

| Factor | Intervalo de t_{expo} (s) | Valor |
|----------|------------------------------------|-------------------------------------|
| γ | $t \leq 100$ | $\gamma = 11$ (mrad) |
| | $100 < t < 10^4$ | $\gamma = 1,1 \cdot t^{0,5}$ (mrad) |
| | $t > 10^4$ | $\gamma = 110$ (mrad) |

Tabla B.7 Factores para exposiciones reiteradas

| Factor | Intervalo de t_{expo} (s) | Valor |
|------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| T_{\min} | $315 < \lambda \leq 400$ | $T_{\min} = 1 \cdot 10^{-9}$ (s) |
| | $400 < \lambda \leq 1050$ | $T_{\min} = 18 \cdot 10^{-6}$ (s) |
| | $1050 < \lambda \leq 1400$ | $T_{\min} = 50 \cdot 10^{-6}$ (s) |
| | $1400 < \lambda \leq 1500$ | $T_{\min} = 1 \cdot 10^{-3}$ (s) |
| | $1500 < \lambda \leq 1800$ | $T_{\min} = 10$ (s) |
| | $1800 < \lambda \leq 2600$ | $T_{\min} = 1 \cdot 10^{-3}$ (s) |
| | $2600 < \lambda \leq 10^6$ | $T_{\min} = 1 \cdot 10^{-7}$ (s) |

Nota: Cada una de las tres reglas siguientes debería aplicarse a todas las exposiciones reiteradas que se produzcan por una utilización repetitiva de sistemas de láser de pulsos o de barrido:

- 1) La exposición a cualquier pulso único de un tren de pulsos no deberá superar el valor límite de exposición para un pulso único de esa duración;
- 2) La exposición a cualquier grupo de pulsos (o subgrupo de pulsos de un tren) durante un tiempo t no deberá superar el valor límite de exposición para el tiempo t ;
- 3) La exposición de cualquier pulso único dentro de un grupo de pulsos no deberá superar el valor límite de exposición para un pulso único multiplicado por el factor de corrección térmico acumulativo $C_p = N^{-0,25}$, en el que N representa el número de pulsos. Esta regla sólo se aplica a los límites de exposición con objeto de evitar las lesiones térmicas, cuando todos los pulsos producidos en menos de T_{\min} se consideran como un pulso único.