



1 Introducción

Los conceptos de la seguridad con láser con seres humanos, se llevan a la práctica con una serie de cálculos, establecidos en normas especializadas. Los aspectos de interés son la máxima radiación permisible (MPE) para la piel o los ojos, la mínima distancia segura (AEL) desde una fuente de radiación para irradiancia directa o indirecta, otros efectos dañino de un haz láser y la caracterización de sistema de laser pulsante.

2 Magnitudes radiométricas y sus unidades

Las mediciones con magnitudes relacionadas a la radiación óptica, requieren equipo especializado, no fácilmente accesible. Al aprender la medición de la radiación óptica, se logra mejor conocimiento sobre sus propiedades, control y aplicaciones, se debe utilizar el vocabulario técnico y se pueden interpretar las especificaciones de los equipos.

La medición de la energía radiante se logra a través de la radiometría. La radiometría trata con la medición de toda la energía óptica radiante, tanto visible como invisible, y se aplica así al espectro óptico completo. La fotometría es un sistema que involucra el espectro visible al ser humano para efectos de salud ocupacional.

Las mediciones radiométricas tienen referencia a constantes físicas. Las mediciones fotométricas se basan en la respuesta del ojo humano. Los términos y conceptos geométricos de la radiometría y la fotometría son similares. Las diferencias se presentan en los símbolos de las cantidades y las unidades, a través de ISO 80000:7. La tabla 1 presenta las magnitudes radiométricas más importantes, sus símbolos y unidades.

Magnitud	Símbolo	Descripción	Símbolo de la unidad (nombre)
Energía radiante	Q_e	Cantidad de energía	J (joule)
Flujo radiante	Φ_e	Razón de transferencia de energía	W (watt)
Irradiancia	E_e	Flujo radiante por unidad de área incidente sobre una superficie	$W \cdot m^{-2}$ (watt por metro cuadrado)
Intensidad radiante	I_e	Flujo radiante por unidad de ángulo sólido radiado desde una fuente	$W \cdot sr^{-1}$ (watt por estereorradián)
Radiancia	L_e	Intensidad radiante radiada por unidad de área proyectada de una fuente	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$ (watt por estereorradián por metro cuadrado)

Tabla 1 Magnitudes, símbolos y unidades radiométricos (ISO 80000:7, 2008)

La radiación óptica es energía radiante transmitida por medio de ondas electromagnéticas en el ámbito de 100 nm hasta 1000 μm . Incluye la radiación visible al ojo humano (la luz), con longitudes de onda entre 380 nm a 780 nm, y las radiaciones infrarroja y ultravioleta.

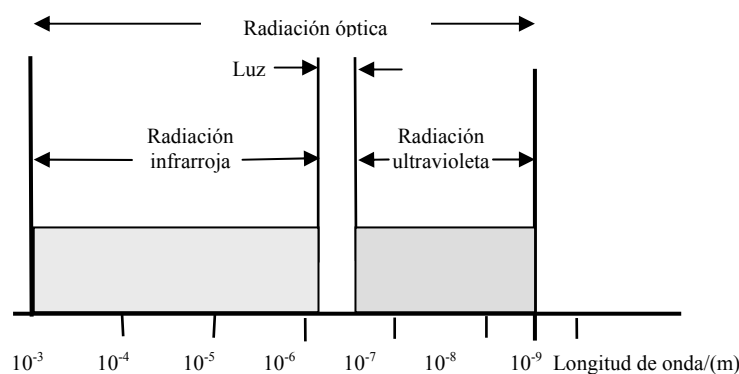


Figura 1 Espectro de radiación óptica



3 Fundamentos

Las normas aplicables como ANSI Z136.1-2007 o EN 60825-1, son profundas y deben ser estudiadas con detalle. Como introducción al tema, en este taller se analizan las tablas necesarias, para los cálculos relativos a seguridad con láser.

Los peligros de los láseres provienen de las características de la radiación emitida. Al comparar los láseres con otras fuentes de radiación óptica, se obtienen altas densidades recibidas de energía y de flujo (irradiancia). Debido a la pequeña divergencia del haz, la irradiancia puede ser muy grande, aún a largas distancias, siendo este un peligro potencial con láseres usados en metrología.

Además de la radiación directa, la radiación esparcida o reflejada puede causar daño en un receptor, aún a largas distancias de la fuente de radiación. La tabla 2 muestra una comparación de irradiancias para diferentes fuentes de radiación.

Fuente de radiación óptica	Irradiancia W/cm ²
Constante solar	0,135
Sol con lente de aumento	10 ² - 10 ³
Flama de gas	10 ³
Lámpara de arco	10 ⁴
Haz de electrones	10 ⁷ - 10 ⁸
Has láser continuo	10 ⁷
Haz láser pulsante	10 ⁸
Pulso gigante de haz láser	10 ¹⁰ - 10 ¹⁴

Tabla 2 Comparación de irradiancias para varias fuentes de radiación óptica

La pequeña irradiancia en las fuentes ópticas convencionales, provienen de su emisión dentro de un gran ángulo sólido.

Además de la observación directa dentro de un haz láser, otras fuentes potenciales de daño son los haces reflejados y esparcidos, los haces no protegidos de radiación UV e IR y fuentes de radiación móviles como en rastreadores o espejos móviles. Los láseres emiten en un amplio ámbito espectral, desde pocos nanómetros hasta cientos de micrómetros. La tabla 3 es una clasificación general con algunos tipos de láseres.

Tipos de láser	Longitud de onda/nm	Flujo CW / Flujo pico por pulso
Hidrógeno (H ₂)	116, 123, 160	----- / 1 MW
Nitrógeno (N ₂)	337	----- / 5 MW
Excimer	193, 248, 308, 351	----- / 1000 MW
Argón (Ar ⁺)	488, 514	10 W / -----
HeNe	543, 594, 632,8	< 1 W / -----
Nd:YAG	473, 532, 1064	2 kW / 1 TW
GaAlAs; InGaAsP	650 - 1550	algunos watts
CO ₂	10600	20 kW / 100 TW

Tabla 3 Flujos radiantes obtenibles y longitudes de onda de algunos tipos de láseres

Los láseres Excimer, Nd:YAG y CO₂ se usan particularmente en procesamiento de materiales.

El daño de los tejidos biológicos (piel, ojo) debido a un haz láser, depende fuertemente de la longitud de onda y de la duración de la exposición. Esto es de primordial importancia, al formular una clasificación de seguridad con láser y fijar límites a la radiación. Bajo esta consideración, los valores de máxima radiación permitida, son muy diferentes de la tabla 3. El ámbito desde 180 nm a 1 mm, se subdivide en 11 ámbitos, con una gradación muy fina, debido a las normas actuales.



4 Clasificación para la seguridad con láseres (ANSI Z136.1-2007)

La clase indica un incremento de peligro de un láser, con un incremento en el número de clase.

Clase 1:

Es un láser o un sistema láser que puede ser considerado como seguro, bajo condiciones razonables, lo que incluye su observación con instrumentos ópticos.

Los sistemas que incorporan láseres de un número de clase más alto, pueden ser considerados en esta categoría. Por ejemplo, los sistemas reproductores de CD/DVD/BR, contienen un diodo láser clase 3A, y han sido asegurados en un alojamiento protector con cierres, de tal forma que bajo ninguna circunstancia, el haz láser pueda abandonar el sistema.

Clase 1 M:

Son láseres que emiten en el ámbito espectral desde 302,5 nm a 4000 nm, y bajo condiciones razonables, se asumen seguros, pero podrían ser dañinos, si se observa el haz con instrumentos ópticos. Esto se aplica bajo las siguientes condiciones:

- Si los componentes ópticos del instrumento, pudieran estar más cerca que 100 mm del dispositivo láser, colocados en un haz divergente para enfocar o colimar el haz.
- Si un haz colimado tiene un diámetro mayor que los siguientes diámetros:
 - 302,5 nm – 400 nm: D = 25 mm
 - 400 nm – 1400 nm: D = 50 mm
 - 1400 nm – 4000 nm: D = 25 mm

Clase 2:

Son láseres de baja potencia (flujo radiante), en el ámbito visible (400 nm a 700 nm). Estos láseres no son realmente seguros. Sin embargo, la protección al ojo es garantizada, por el reflejo del parpadeo ($t = 0,25$ s), lo que significa que si al ojo le incide un haz láser de esta clase, la respuesta natural de cerrar el ojo, es suficiente para prevenir daño. Una emisión fuera del ámbito espectral mencionado, debe ser de ser categorizada como láser clase 1.

Clase 2M:

Son láseres de baja potencia (flujo radiante), en el ámbito visible (400 nm a 700 nm). Sin embargo, la protección al ojo es garantizada, por el reflejo del parpadeo ($t = 0,25$ s), lo que significa que si al ojo le incide un haz láser de esta clase, la respuesta natural de cerrar el ojo, es suficiente para prevenir daño.

Una observación dentro del haz podría ser dañina, si se realiza con instrumentos ópticos. Una emisión fuera del ámbito espectral mencionado, debe ser de ser categorizada como láser clase 1.

Se aplican dos condiciones:

- Para un haz divergente, si los instrumentos ópticos podrían estar insertados dentro del haz láser, más cerca de 100 mm del dispositivo láser.
- Para un haz colimado, si el diámetro del haz es mayor que los siguientes diámetros:
 - 302,5 nm – 400 nm: D = 25 mm
 - 400 nm – 1400 nm: D = 50 mm
 - 1400 nm – 4000 nm: D = 25 mm

Clase 3R:

Pertenecen láseres que emiten en el ámbito espectral desde 302,5 nm a 1 mm. Una observación dentro del haz puede ser dañina. El límite de la radiación accesible, es 5 veces el límite para la clase 2 en el ámbito mencionado, y 5 veces el límite de la clase 1, para otras longitudes de onda.



Como regla práctica se tiene: el flujo (potencia) máximo Φ_e permitido es 5 mW, si la irradiancia no excede 25 W/m². En este caso, se permite que entre al ojo un flujo máximo de 1 mW, sin daño serio, presumiendo un diámetro de pupila de 7 mm.

Clase 3B:

Una observación dentro del haz láser es dañina, bajo circunstancias usuales (dentro de la Distancia nominal de riesgo ocular (NOHD – Nominal Ocular Hazard Distance). La observación de reflexiones difusas, es usualmente segura

Clase 4:

Estos láseres son siempre peligrosos para los ojos y la piel, aún para reflexiones difusas. Son peligrosos por crear fuego y explosiones.

Aunque parece simple clasificar un determinado láser, en alguna de las 7 clases descritas, no es suficiente solamente conocer el flujo radiante de salida del dispositivo. La cantidad responsable de daño en la piel o el ojo humano, es la irradiancia del haz láser, con unidades W/m² (o W/cm²). Se debe conocer para la zona de incidencia y a una distancia L desde el láser, el flujo radiante real del láser y la dimensión del haz láser, siendo aquí donde se realiza la consideración de seguridad.

5 Limite de emisión accesible (AEL – Accesible Emission Limit)

Los valores limitantes de AEL están definidos para clase de láser. Aquí la longitud de onda, así como la duración de la radiación son los parámetros decisivos. Los valores limitantes para una máxima radiación permitida, están definidos por la longitud de onda o una mezcla de longitudes de onda, por la duración de la emisión (importante para sistemas pulsantes) y por la sección irradiada en el cuerpo (piel, ojo).

Para la irradiancia del ojo, este valor es principalmente dado por el tamaño de la imagen del haz sobre la retina, y por eso la siguiente consideración, se basa en los límites para la exposición permitida sobre la retina. Se analiza la interacción y daño de la luz, en los tejidos biológicos.

El daño a tejidos biológicos por radiación óptica, es causado por varios mecanismos dependientes de la longitud de onda. La luz absorbida en un tejido, es generalmente convertida en calor y causa los llamados daños térmicos.

Más aún, pueden ocurrir reacciones termo acústicas y fotoquímicas, que provocan desnaturalización de proteínas y enzimas, coagulación, evaporación explosiva de tejidos (cavitación) y foto ablación. Ejemplos de los efectos dañinos de radiación láser en la piel y ojos se presentan en la tabla 4, como función de la longitud de onda.

Longitud de onda	Clase espectral	Ojos	Piel
100 nm – 280 nm	UVC (UV lejano)	Foto queratitis	Enrojecimiento, peligro de quemadura de cáncer
280 nm – 315 nm	UVB (UV medio)	Foto queratitis	Envejecimiento progresivo de la piel, peligro de cáncer
315 nm – 400 nm	UVA (UV cercano)	Catarata foto química	Bronceado, quemadura, reacciones fotosensitivas
400 nm – 780 nm	Visible	Daño en la retina por efectos térmicos y fotoquímicos	Bronceado, quemadura, reacciones fotosensitivas
780 nm – 1400 nm	IRA (IR cercano)	Quemadura de la retina, catarata	Bronceado, reacciones fotosensitivas
1400 nm – 3000 nm	IRB (IR medio)	Quemadura de la cornea, “nubosidad” de la lente, raspadura en la cámara de liquido del ojo	Quemadura, reacciones fotosensitivas
3000 nm – 10000 nm	IRC (IR lejano)	Quemadura de la cornea	Quemadura, reacciones fotosensitivas

Tabla 4 Ejemplos del efecto de daño de la radiación óptica en los tejidos biológicos. Los efectos biológicos resultantes, se usan parcialmente en tratamiento terapéutico en medicina con láser

Estos valores limitantes, establecidos en las normas, varían con respecto al efecto del haz láser en:

- 1) La cornea de los ojos (por observación directa dentro del haz),
- 2) La cornea de los ojos por observación de fuentes extendidas o ante una reflexión difusa,
- 3) La piel.

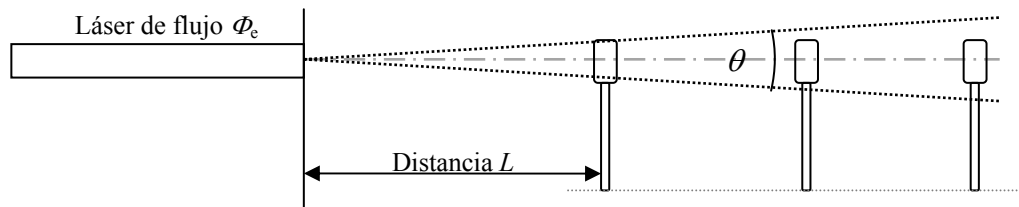


Figura 2 Para un emisor láser dado, entre mayor es la divergencia del haz, menor es la irradiancia y así menor es el riesgo potencial para un observador

5.1 Valores limitantes para el ojo humano

Son valores particularmente bajos, dentro del ámbito visible e IR cercano (400 nm – 1400 nm), debido a las propiedades espectrales del ojo humano. Radiación óptica en este ámbito, entra al ojo y es enfocada sobre la retina. Considerando un diámetro de pupila de 7 mm, la imagen en la retina puede alcanzar hasta 20 μm de diámetro, lo que corresponde a una densidad de flujo por un factor de 122 500.

Los valores limitantes, fijados para irradiancia sobre el ojo, por observación directa dentro del haz (irradiancia sobre la córnea), se muestran en la tabla 5, según la norma EN 60825-1. Cuando se calcula un valor de MPE, se aplican factores de corrección C_i , T_i .

Para exposición debajo de 10^{-9} s, no hay o solo hay información limitada respecto al efecto de pulsos ultra cortos de láser, para un tiempo dado. Para este ámbito de tiempo, los valores de MPE se han derivado de valores de una exposición o duración de tiempo de 10^{-9} s. Los valores de MPE, están debajo de valores de riesgo, probados y recomendados científicamente. Estos valores no se deben tratar como valores limitantes precisos, y están “seguros” y “peligrosos”.

t / s		$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$	$10 - 10^2$	$10^2 - 10^3$	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$
λ / nm										
Visible	400 - 700	$5 \times 10^{-3} C_6 \text{ J/m}^2$		$18 t^{0,75} C_6 \text{ J/m}^2$			10 W m^{-2}			

Tabla 5 Valores de MPE para el ojo, en el ámbito visible, como función de la longitud de onda y duración de exposición (EN 60825-1, ANSI Z136.1:2007). $C_6 = 1$ para haces < 1,5 mrad.



5.2 Piel

La estructura de los valores limitantes dentro del ámbito espectral desde 400 nm a 1400 nm, es relativamente simple para irradiancia de la piel, ya que comparada con el ojo, no hay efecto de enfoque. La parte relevante de la norma EN 60825-1 se muestra en la tabla 6.

t / s	$10^{-9} - 10^{-7}$	$10^{-7} - 1,8 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5} - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10$	$10 - 10^2$	$10^2 - 10^3$	$10^3 - 10^4$	$10^2 - 10^3$
λ / nm									
Visible									
400 - 700		200 J/m ²		$1,1 \times 10^4 t^{0,25}$ J/m ²				2000 W m ⁻²	

Tabla 6 Valores de MPE para la piel, en el ámbito visible, como función de la longitud de onda y duración de exposición (EN 60825-1, ANSI Z136.1:2007)

6 Gafas para seguridad con láser

Las normas requieren las gafas adecuadas de protección al usar sistemas láser, cuando ninguna otra precaución puede ser tomada, para evitar la ocurrencia de radiación dañina al ojo.

Las normas actuales para vidrios protectores para haz láser, se definen por ejemplo en la norma EN207, y para gafas de seguridad con láser en EN208. Estos vidrios son comparables a un filtro con una transmitancia $\tau(\lambda)$, figura 3.

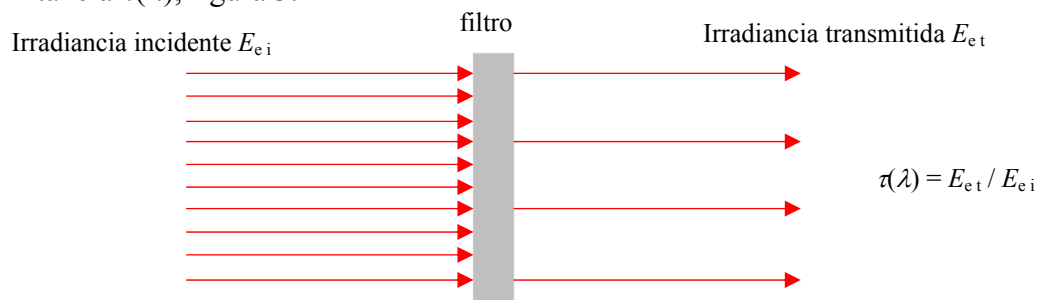


Figura 3 Ilustración de la atenuación de un haz láser, por un filtro con transmitancia espectral o densidad óptica D

Una medida para la atenuación de un filtro, es su densidad óptica D :

$$D = -\log \tau(\lambda)$$

Ejemplo:

Una densidad óptica de 6 representa un factor de atenuación de 10^{-6} .

Las gafas para trabajar con láser, operan disipando la energía, de manera similar a los filtros de densidad neutral. La diferencia es que las gafas para láser, solo bloquean un ámbito angosto de longitudes de onda, lo que permite al usuario, algún grado de visibilidad. Mientras que las gafas para láser pueden tener una densidad óptica suficiente, deben ser capaces de ofrecer un nivel de protección, sin quemadura inmediata del ojo.

La norma EN 207 establece, que la gafa debe proteger al usuario por un mínimo de 10 s (clasificación D) o 100 pulsos (clasificación I y R), sin falla, cuando se expone a un haz láser.



Las gafas protectoras para propósitos de ajuste de haz láser visible, se caracterizan por una pequeña atenuación dentro del ámbito espectral visible, y transmite en este, una radiación residual para poder realizar los ajustes. La atenuación es más fuerte fuera del ámbito visible. El ámbito total se subdivide en cinco clases protectoras, tabla 7.

Clases protectoras	Transmitancia espectral $\tau(\lambda)$	Máximo flujo permitido desde el láser Φ / W	Máxima energía pico permitida Q / J
R1	$10^{-2} < \tau(\lambda) < 10^{-1}$	0,01	2×10^{-6}
R2	$10^{-3} < \tau(\lambda) < 10^{-2}$	0,1	2×10^{-5}
R3	$10^{-4} < \tau(\lambda) < 10^{-3}$	1	2×10^{-4}
R4	$10^{-5} < \tau(\lambda) < 10^{-4}$	10	2×10^{-3}
R5	$10^{-6} < \tau(\lambda) < 10^{-5}$	100	2×10^{-2}

Tabla 7 Clases protectoras con transmisión espectral $\tau(\lambda)$, y máxima radiación casual permisible (no intencional, para observación directa dentro del haz) para gafas de ajuste de haz láser (cumplimiento con EN 208)

Se dispone de gafas para láser, para protección pura y no para alineamiento, que se clasifican para un ámbito entre 180 nm y 1000 μm . La protección se mantiene aún para observación directa dentro del haz láser. La tabla 8 resume las zonas de protección para un ámbito desde 315 nm a 1400 nm. La base es una duración de 10 s o 100 pulsos a una baja razón de repetición.

Clase de protección L	Máxima transmitancia espectral $\tau(\lambda)$	Densidad permitida para flujo radiante o energía en el ámbito espectral $315 \text{ nm} < \lambda < 1400 \text{ nm}$ para láser CW (onda continua) (D) en W/m^2 , pulsante o pulso gigante (I, R) en J/m^2 y láseres pulsantes acoplados en modo (M) en W/m^2	
		D	I, R
L1	10^{-1}	10^2	5×10^{-2}
L2	10^{-2}	10^3	5×10^{-1}
L3	10^{-3}	10^4	5×10^0
L4	10^{-4}	10^5	5×10^1
-	-	-	-
L10	10^{-10}	10^{11}	5×10^7

Tabla 8 Clases protectoras, transmisión espectral y densidades de flujo y energía permisibles para filtros de seguridad con láser usados para gafas de protección o cortinas protectoras (EN 207)

La clasificación D se aplica a láseres de onda continua o láseres pulsantes con duración mayor que 0,2 s, y la irradiancia se mide en W/m^2 . Se debe tener cuidado al usar el flujo promedio máximo del láser. La norma I se aplica a láseres pulsantes de duración entre 0,25 s a 10^{-6} s y la norma R para láseres pulsantes de duración entre 10^{-6} s y 10^{-9} s, ambos medidos en J/m^2 . La clasificación M es para longitudes de pulso menores de 10^{-9} s.

La escala L es una medida de que tan bien es capaz una gafa, de hacer frente a un haz láser, y consiste de 10 niveles de densidad óptica. Considera la máxima densidad de flujo o energía, que la gafa puede absorber en un tiempo mínimo, sin degradación en el desempeño. Además considera la transmitancia espectral a la longitud de onda del láser. Si estas dos medidas denotan diferentes niveles de L, entonces se usa el número L más bajo.



La escala L se subdivide en tres bandas, que toman en cuenta la habilidad natural del ojo para bloquear longitudes de onda cortas. La banda 1 cubre un ámbito desde 180 nm a 315 nm, la banda 2 cubre desde 316 nm a 1400 nm y la banda 3 cubre desde 1401 nm a 1000 μm .

El grado de transmisión de las gafas protectoras, no debe cambiar bajo la influencia de un haz láser. Un haz láser de HeNe, por ejemplo es atenuado por un factor de 10, cuando se usa una clase protectora L1. Dependiendo del flujo de salida del láser, y la máxima radiación permisible, se decide cual tipo de protección usar.

7 Propagación de un haz láser

Para tomar las mediciones correctas en seguridad con láser, se debe conocer en cierta distancia, la irradiancia de la fuente de radiación óptica. Si el valor de irradiancia es menor al valor establecido en las normas como MPE, no habrá riesgo de daño al ojo. En la tabla 1 se presentan las unidades para el flujo radiante, la intensidad radiante y la irradiancia. El flujo radiante se puede medir con el instrumento apropiado, o confiar en valores de las especificaciones.

7.1 NOHD (Nominal ocular hazard distance)

El ángulo sólido Ω se analiza con ayuda de la figura 4.

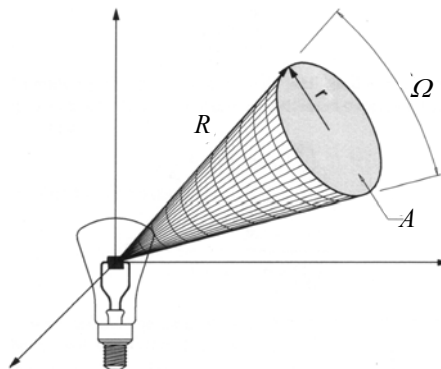


Figura 4 Arreglo para determinar el ángulo sólido

Una cierta cantidad de un haz óptico, define un área A sobre la superficie de una esfera, y el ángulo sólido se define por:

$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

La unidad es el estereorradián (sr). El área de la superficie curva de este cono, es siempre igual al cuadrado del radio de la esfera, multiplicado por el ángulo sólido. Un ángulo sólido de un estereorradián es un patrón o referencia. Todos los otros ángulos sólidos se describen como partes fraccionales o múltiplos de 1 sr. Una esfera completa tiene 4π sr.

El medio ángulo del cono que corresponde a un ángulo sólido de 1 sr, es aproximadamente $32,7^\circ$.

La intensidad radiante corresponde al flujo que atraviesa una unidad de ángulo sólido (en W/sr). Para estimar la intensidad radiante, se debe conocer el ángulo sólido del flujo radiante medido. Por ejemplo, un diafragma de radio r , colocado a una distancia R de la fuente, puede ser usada:

$$\Omega = \frac{\pi r^2}{R^2}$$

En la figura 5, una fuente emite un flujo radiante $\Phi_{\text{total}} = 250$ mW en forma esférica (caso ideal de manera uniforme, $\Omega = 4\pi$ sr), entonces la intensidad radiante I_e se calcula como 19,894 mW/sr.



Si se coloca un diafragma con radio $r = 15$ mm, a una distancia $R = 80$ cm a la fuente de radiación óptica, se obtiene un ángulo sólido del diafragma $\Omega_{\text{diafragma}} = 1,104 \times 10^{-3}$ sr.

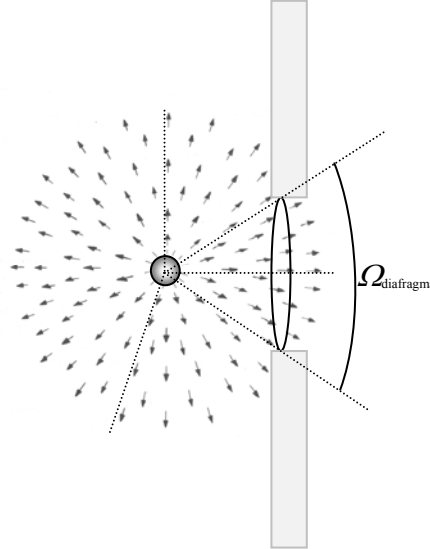


Figura 5 Diafragma en frente de una fuente ideal

El flujo radiante que atraviesa el diafragma ($\Phi_{e d}$), se encuentra considerando que la intensidad radiante es invariante. Esto es $19,894 \text{ mW/sr} = \Phi_{e d} / \Omega_{\text{diafragma}}$; Se obtiene $\Phi_{e d} = 21,963 \text{ } \mu\text{W}$. Si $A_{\text{diafragma}}$ es el área aproximada de la abertura del diafragma, la irradiancia se define como:

$$E_{e d} = \frac{\Phi_{e d}}{A_{\text{diafragma}}}$$

Usando la definición de ángulo sólido se obtiene:

$$E_{e d} = \frac{\Phi_{e d}}{R^2 \cdot \Omega_{\text{diafragma}}}$$

Se despeja la irradiancia como:

$$E_{e d} = \frac{I_e}{R^2}$$

Este es un ejemplo de la ley del cuadrado inverso de la distancia, considerando que la fuente de la figura 5 es puntual, o al menos muy pequeña comparada con la distancia de medición. En el caso de análisis, la irradiancia $E_{e d} = 31,084 \text{ mW/m}^2$. Este valor también se obtiene con el flujo radiante y el área del diafragma.

Para el caso en que la fuente es un dispositivo láser, se tiene la siguiente configuración:

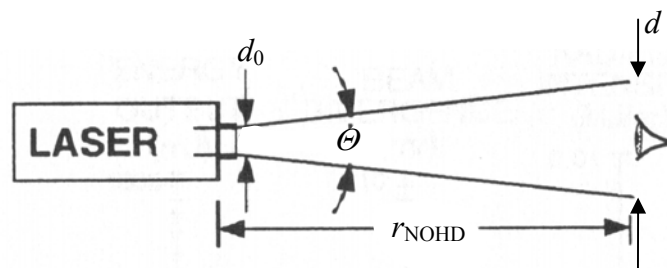


Figura 5 Esquema de emisión de un haz láser (gaussiano) aplicado a observación directa

Para un haz láser gaussiano, con un ángulo de divergencia total pequeño, se tiene:

$$d^2 = d_0^2 + \Theta^2 z^2$$

En el punto donde se localiza el observador, a la distancia z desde el láser, se tiene una irradiancia:

$$E_{e,d} = \frac{\Phi_e}{A} = \frac{\Phi_e}{\frac{\pi}{4} d^2} = \frac{4 \Phi_e}{\pi (d_0^2 + \Theta^2 z^2)}$$

Un haz láser puede ser considerado seguro a una distancia z , usando el valor $MPE \leq E_e$, y que para un láser particular, se toma de la tabla 5. Utilizando ya sea especificaciones del fabricante o realizando mediciones para el flujo radiante, el diámetro del haz a la salida, el ángulo total de divergencia y la localización donde se debe cumplir el valor de MPE, se obtiene la distancia mínima donde el láser se considera seguro, en términos de NOHD:

$$z_{\text{NOHD}} = \frac{1}{\Theta} \left[\left(\frac{4 \cdot \Phi_e}{\pi \cdot MPE} \right) - d_0^2 \right]^{1/2}$$

7.2 NOHD para reflector difuso

Debido a la reflexión difusa o esparcimiento, la radiación óptica se distribuye en un espacio extendido, que depende de la superficie esparcidora, figura 6.

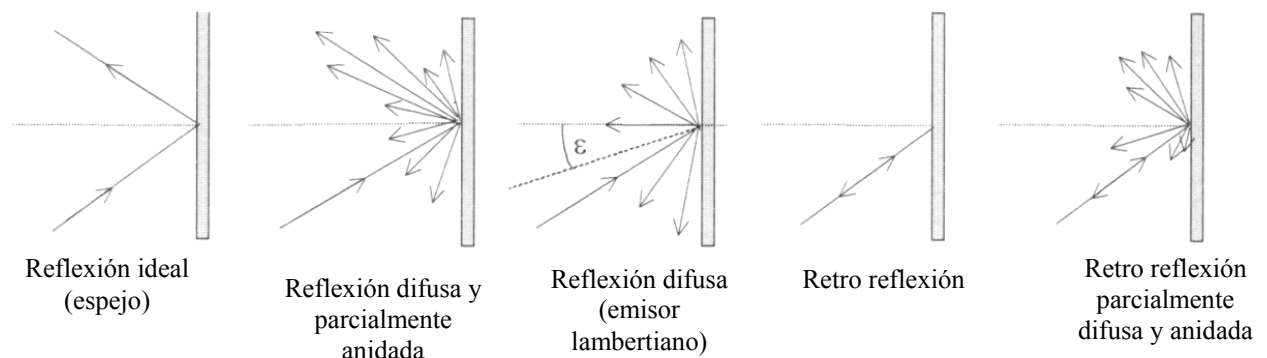


Figura 6 Tipos de reflexión y distribución espacial

Esta superficie se puede considerar como una fuente secundaria, con propiedades modificadas a la radiación óptica. Para el esparcimiento difuso de un haz láser, se puede suponer una superficie hemisférica como área irradiada, para el cálculo aproximado de la irradiancia E_e .

Se asume que la superficie radiante emite isotrópicamente, en un ángulo sólido en un área de una superficie hemisférica.

La distancia r a la superficie de esparcimiento, debe ser grande comparada a su diámetro. En este caso, se considera la superficie de esparcimiento como una fuente puntual, tipo emisor lambertiano, de área dS , y se aplica la ley de Lambert para el flujo radiante.

Al igualar el flujo incidente sobre un hemisferio, con el flujo radiante de la irradiancia incidente, que corresponde a MPE, se obtiene:

$$\rho \Phi_{e, \text{incidente}} = \frac{\pi E_e r^2}{\cos \theta}$$

A partir de esta ecuación se obtiene la formula para la zona de riesgo nominal NHZ, figura 7:

$$r_{\text{NHZ}} = \left(\frac{\rho \Phi_{e \text{ incidente}} \cos \theta}{\pi \text{MPE}} \right)^{1/2}$$

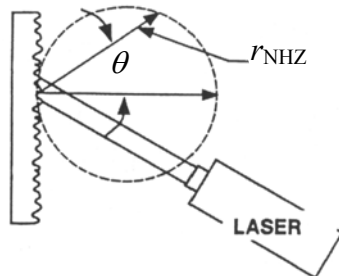


Figura 7 Zona de riesgo nominal por reflexión difusa y su distribución espacial

7.3 Valores de MPE para radiación pulsante

La irradiancia producida por un pulso simple, dentro de una secuencia de pulsos, no debe superar el valor permitido para un pulso simple de láser $\text{MPE}_{\text{simple}}$.

El valor de MPE, para la irradiancia promedio de una secuencia de pulsos de duración T ($\text{MPR}_{\text{promedio}}$) no debe superar el valor de un pulso simple de igual duración T .

La irradiancia de pulso simple $\text{MPR}_{\text{corregido}}$, en la secuencia de pulsos, no debe superar el valor MPE de un pulso simple, multiplicado por el factor de corrección $N^{0,25}$, N - número de pulsos.

De los tres valores determinados, el valor más limitante es decisivo. Los pasos para obtener el valor MPE para un sistema de láser pulsante es:

1. Fijar un tiempo de exposición T de la secuencia de pulsos (por ejemplo a 0,25 s), para el ámbito visible).
2. Determinar la duración t de un pulso simple de láser.
3. Determinar el número de pulsos durante la exposición T .
4. Determinar el valor de MPE para un pulso simple de la tabla 5 como $H_{\text{MPE, simple}}$.
5. Determinar el valor de MPE para una radiación promedio; aquí el valor MPE de un pulso equivalente de exposición T se determina de la tabla 5.
6. El valor MPE promedio se calcula como:

$$H_{\text{MPE promedio}} = \frac{H_{\text{MPE equivalente}}}{N}$$

7. La determinación con el factor de corrección es:

$$H_{\text{MPE corregido}} = H_{\text{MPE simple}} \cdot N^{0,25}$$

8. Se selecciona el valor más limitante (más pequeño) entre $\text{MPE}_{\text{simple}}$, $\text{MPR}_{\text{promedio}}$, $\text{MPR}_{\text{corregido}}$.
9. Para una secuencia irregular de pulsos (modulación de pulsos), se debe considerar la frecuencia instantánea más alta (inverso del pulso más corto).

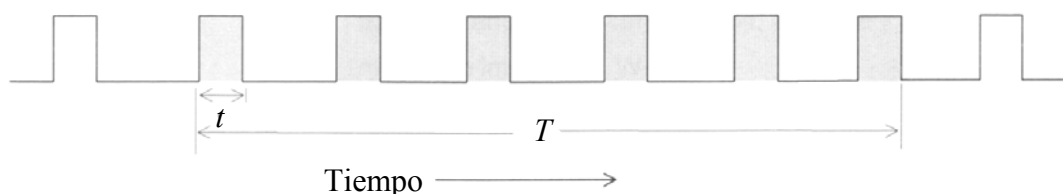


Figura 8 Secuencia regular de pulsos (T – exposición de 6 pulsos, cada uno de duración t)



7.3 Montaje experimental

Cinco tipos de dispositivos láser, se utilizan como fuentes de radiación óptica. Se diferencian en longitud de onda, calidad del haz y modo de operación. Se cubre el ámbito visible (473 nm) hasta el IR cercano (1064 nm). Para medición del flujo óptico, se usa un fotodetector con una consola para medidor de flujo óptico desde pocos nanowatts a 50 mW. Se usa un detector térmico si el flujo es mayor a 50 mW. Las características principales se presentan en la tabla 6.

Láser	Longitud de onda λ /nm	Flujo (potencia) Φ_e /mW	Diámetro del haz d_0 /mm	Divergencia del haz Θ /mrad
Nd:YAG duplicado en frecuencia	(L1) 473 (azul) *	5	2	1,5
DPSS	(L4) 593,5 (amarillo)	< 1	1,5	1,5
HeNe	(L3) 632,6 (rojo)	2,5	0,8	1,4
Nd:YAG bombeado por diodo	CW (L5) 1064 (IR)	100	< 2	< 2
	Q switch (L2) 532 (verde)	5 **	2	1,5
Fotodetector de silicio (LM 2)		Ámbito espectral: 400 nm – 1064 nm, abertura 7,9 mm, Irradiancia máxima 1 kW/m ² , sensibilidad 1 nW		
Detector con termopila (LM 10)		Ámbito espectral: 0,25 μ m – 10,6 μ m, abertura 16 mm, Irradiancia máxima 6 kW/cm ² , sensibilidad 1 mW		

* $\lambda = 946$ nm duplicado en frecuencia

** Flujo promedio depende de la tasa de repetición

Tabla 9 Especificaciones de láseres y medidores de flujo óptico

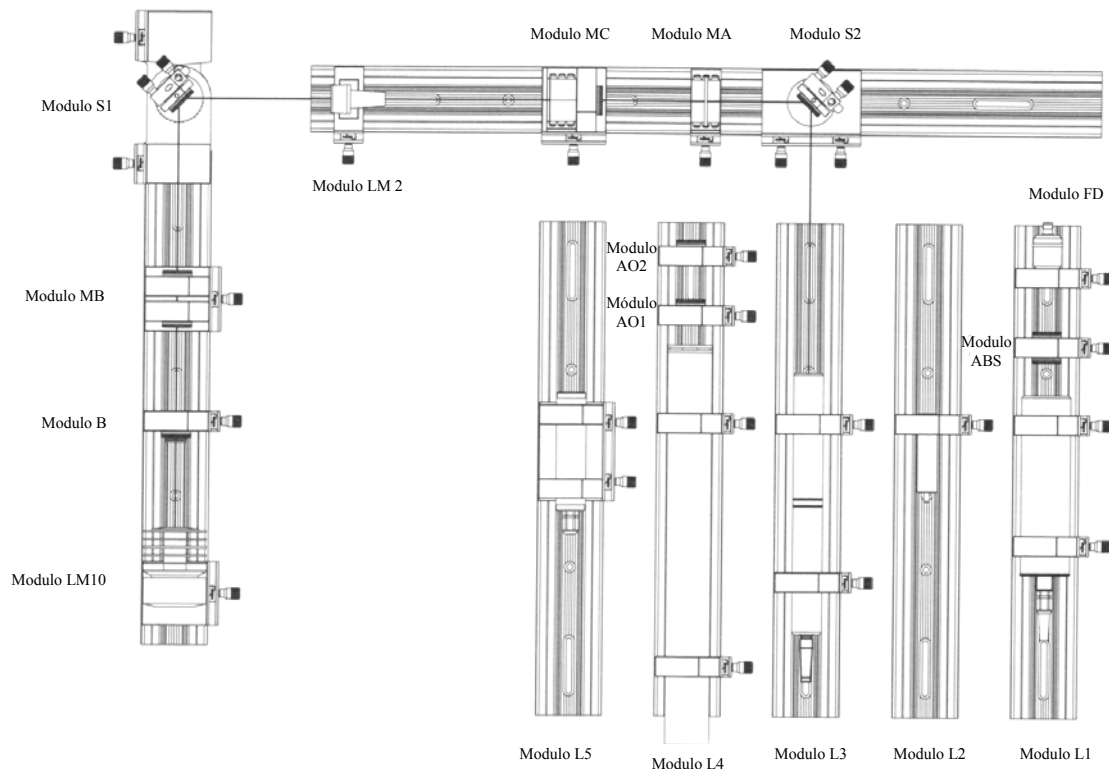


Figura 9 Arreglo para el montaje de las prácticas experimentales



En la figura 9 se muestra el arreglo experimental y sus módulos: módulo S1 es un espejo deflector y punto de esparcimiento, módulo S2 es un espejo deflector, módulo MA es un portador de componentes, módulo MB es un telescopio, módulo MC es un simulador del ojo humano, módulo B es un diafragma variable, módulos AO1 y AO2 son expansores de haz, módulo ABS es un atenuador, módulo FD es un fotodiodo rápido.

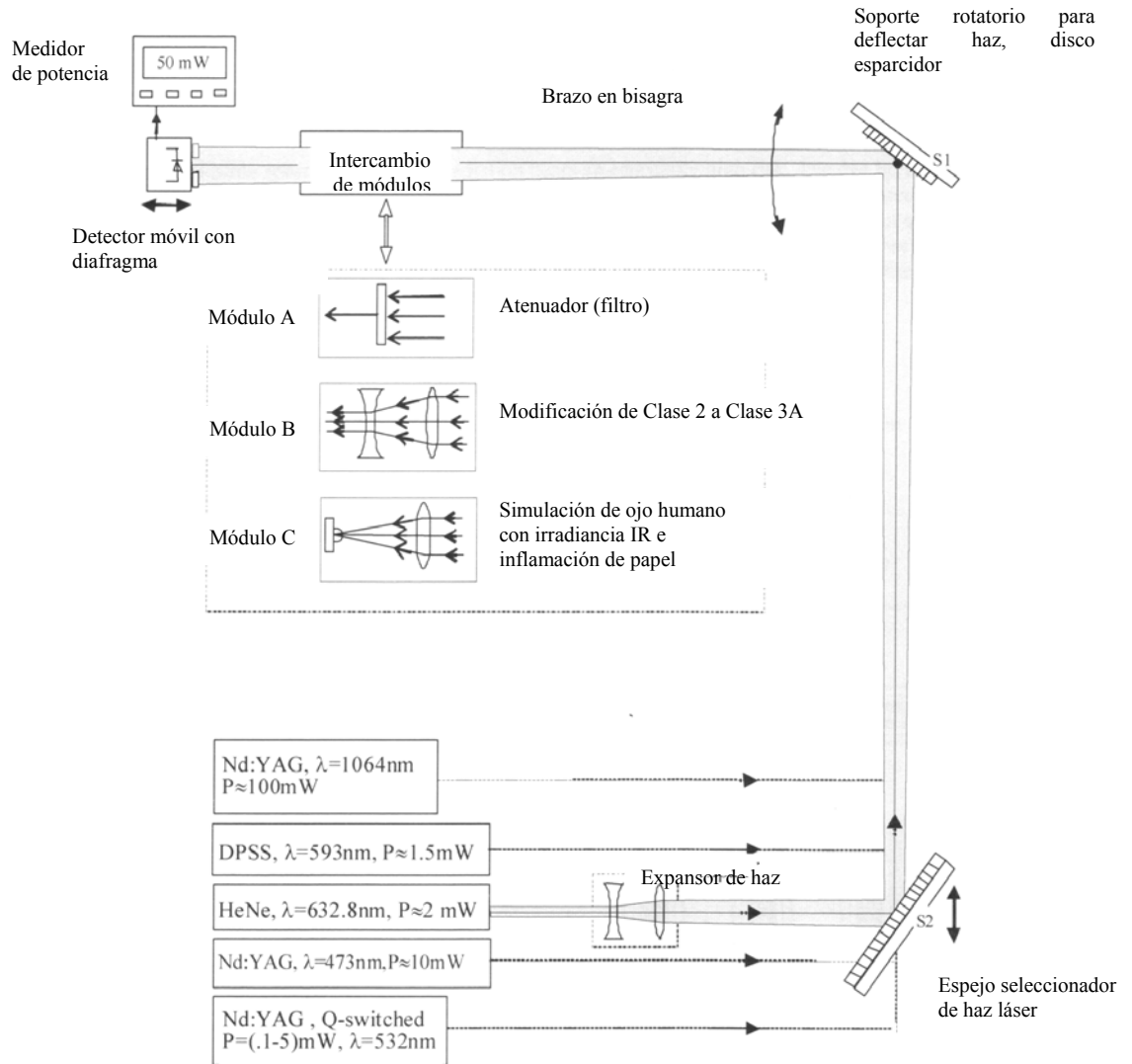


Figura 10 Diferentes componentes para seis prácticas experimentales



Prácticas experimentales (los detalles de cada práctica se en el laboratorio):

1. Demostración de peligro para el ojo humano. Un haz láser invisible (IR) es altamente riesgoso, y el reflejo de parpadeo no es suficiente protección. Una radiación IR que se enfoca en la retina y no se percibe, causando daño. Se demuestra cualitativamente este efecto. Se utiliza un láser Nd:YAG de 100 mW con un simulador de ojo humano (con lente convexa de longitud focal corta y un absorbedor, como un papel ple negro que se quema fácilmente, con una alta densidad de flujo).
2. Clasificación de filtro para seguridad con láser. Para evitar daños, se debe siempre tomar medidas de protección, como gafas para seguridad con láser. Para alineamiento de un láser visible, puede requerirse una gafa parcialmente transmisora. Al utilizar haces invisibles o de alta potencia, se debe usar gafas totalmente absorbedoras. En esta práctica experimental se investiga la atenuación de un filtro y la clase protectora.
3. Valor MPE para un haz láser pulsante. Un láser Q-switched Nd:YAG emite a 532 nm. El valor MPE a ser usado se determina para una observación directa dentro del haz. Se mide la frecuencia de repetición y ancho de pulso con un osciloscopio. Para evitar saturación en el fotodiodo, se atenúa y se expande el haz.
4. Distancia segura para radicación difusa. Un láser Nd:YAG duplicado en frecuencia, que emite a 473 nm con un flujo radiante de 10 mW, irradia un objeto esparcidor difuso. Se determina la distancia segura para el ojo, así como la dependencia del ángulo de observación. Se ajusta el medidor de potencia con el fotodiodo a la longitud de onda del láser. Se mide el ángulo de emisión por rotación del brazo.
5. Influencia de instrumentos ópticos en el valor de MPE. La irradiancia de un haz láser se incrementa al insertar lentes en la trayectoria del haz, lo que varía la clase del láser. El sistema láser consta de un láser y un telescopio. Se mide el flujo radiante, y se considera la sección transversal del haz sobre el detector.
6. Distancia segura para irradiancia sobre la piel humana. Al utilizar láseres, los peligros a la piel no son despreciables, aunque son menores que los del ojo humano, Tabla 6. Para esta práctica experimental, se calcula la distancia segura desde un láser Nd:YAG (473 nm), para una exposición directa y una continua más extensa.

Bibliografía utilizada:

- MEOS. (2011). *Exp 20 Laser safety*.
- ANSI Z136.1. (2007). *American national standard for safe use of lasers*. Orlando, FL: ANSI.