



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Grado en Óptica y Optometría

MEMORIA TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO

SEGURIDAD OCULAR DE LA ILUMINACIÓN MEDIANTE LUZ EN EL ESPECTRO VISIBLE E INVISIBLE

Presentado por: Paula Calles Alaguero

Tutelado por: Dr. Miguel J. Maldonado López

Tipo de TFG: **X** Revisión

En Valladolid a, 24 de mayo de 2019

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
2. JUSTIFICACIÓN	2
3. MATERIAL Y MÉTODOS	3
4. RESULTADOS	3
4.1. Radiaciones ópticas y el láser	3
4.1.1. Radiación ultravioleta	5
4.1.2. Radiación visible.....	5
4.1.3. Radiación infrarroja	6
4.1.4. Radiación láser.....	6
4.2 Valores límites de exposición	8
4.2.1. Consideraciones previas	9
4.2.1.1. Expresiones o fórmulas matemáticas.....	9
4.2.1.2. Cálculos integrales	10
4.2.2. VLE para radiación UV	11
4.2.3. VLE para radiación visible e infrarroja	12
4.2.4. VLE para radiación láser	14
CONCLUSIONES.....	15
BIBLIOGRAFÍA	16
ANEXOS	17
Anexo 1	17

Introducción

Existen varias interpretaciones sobre lo que es la luz. Desde el punto de vista físico, la luz es una radiación electromagnética, esto quiere decir que se propaga en forma de ondas también electromagnéticas, las cuales se pueden definir como: “forma de propagarse a través del espacio los campos electromagnéticos producidos por las cargas eléctricas en movimiento y que, según su intervalo de frecuencia recibe denominaciones especiales” (Real Academia Española, 2019). Las radiaciones electromagnéticas se pueden agrupar y formar el llamado espectro electromagnético. Cada radiación comprende una longitud de onda y tiene unas características determinadas, además su utilización ofrece ventajas diferentes a nuestra sociedad, pero llevan asociados unos riesgos que pueden provocar daños irreversibles en las estructuras oculares en los peores de los casos. Nos centraremos en las radiaciones ópticas y en los riesgos que sus exposiciones pueden provocar. Por eso definiremos los valores límites de exposición a los que debemos exponernos para garantizar la protección de nuestro ojo, ya que se trata de uno de los órganos más sensibles a la radiación, ya que es el encargado de absorber todo y cada uno de los tipos. Está expuesto a todos los riesgos y debemos, en la medida de lo posible, protegerlo.

1. Justificación

Hoy en día, todos y cada uno de los seres vivos coexistimos con la radiación y no solo con la creada naturalmente como puede ser la luz solar, sino que también existen fuentes de radiación creadas por el hombre como lo son por ejemplo los teléfonos móviles. Las fuentes de radiación artificiales cada vez están más presentes en nuestro día a día. Este tipo de radiaciones han sido introducidas de forma rápida por las grandes ventajas que nos presentan, por ejemplo, son muy utilizadas en aparatos y sistemas con luz que inciden sobre el ojo para llevar a cabo exploraciones y medidas diagnósticas. El problema aparece cuando no se conocen los riesgos que la exposición a este tipo de radiación puede provocar.

El ojo humano únicamente es consciente de una pequeña fracción del espectro electromagnético ya que es la única que puede ver, pero no exclusivamente existen este tipo de radiaciones, sino que también existen otras con longitudes de onda más cortas y más largas que no son visibles para el ser humano. Cada una de ellas son luz, sin embargo, el ser humano únicamente capta una reducida parte correspondiente al espectro visible.

No por ello el ser humano debe protegerse únicamente de las longitudes de onda que corresponden con el espectro visible, sino que debe tener especial precaución en el resto de radiaciones que no son percibidas por el ojo y puede penetrar hasta las capas más profundas de éste llegando a la retina y provocando daños irreversibles.

Cabe destacar que en los últimos años el uso de dispositivos láser ha aumentado considerablemente debido a los grandes beneficios que nos aportan sus aplicaciones, aumentando por tanto los riesgos potenciales en el ser humano. Una de sus aplicaciones más frecuentes es la corrección del error refractivo mediante cirugía refractiva.

Por lo tanto, es necesario e indispensable conocer cuál es la exposición máxima de luz, tanto de la que forma parte del espectro visible como la que forma parte del invisible, así como del riesgo que ésta provoca, para intentar evitarlos a la vez que disminuirlos para garantizar una buena práctica y seguridad del ser humano.

2. Objetivos

En primer lugar, daremos un repaso al espectro electromagnético centrándonos en las radiaciones ópticas las cuales incluyen las radiaciones ultravioletas, las radiaciones visibles, las radiaciones infrarrojas y, mención aparte, las radiaciones láser. Realizaremos esta clasificación para, a continuación, poder establecer los valores límites de exposición para cada tipo de radiación teniendo en cuenta las características determinadas y los riesgos que estas pueden provocar sobre el ser humano centrándonos especialmente en el ojo.

3. Material y métodos

En el presente trabajo de fin de grado se ha realizado una revisión bibliográfica de la normativa actual, vigente y que se lleva a cabo para establecer los límites de exposición ante las radiaciones ópticas. Además, se ha realizado una búsqueda y clasificación del espectro electromagnético por su longitud de onda. Para realizar las búsquedas me he centrado tanto en términos ingleses como en castellano relacionados con la radiación electromagnética, su clasificación y los riesgos que puede provocar su exposición en el ojo. A continuación, los términos de búsqueda han sido las normativas vigentes de los valores límites de exposición. Los términos de búsqueda más utilizados han sido: “normativa radiaciones ópticas”, “láser”, “seguridad ante radiaciones ópticas”, entre otros. De toda la bibliografía y fuentes consultadas las más relevantes han sido las últimas publicadas ya que el fin de este trabajo de fin de grado es hacer un recopilatorio de los valores límites de exposición más recientes y que válidos en la actualidad. La normativa a tener en cuenta que se ha tenido en este trabajo ha sido extraída de 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. El método de búsqueda más utilizado para el presente trabajo ha sido la búsqueda en Google y Google Académico, por recoger la información más actual y vigente.

4. Resultados

4.1 Radiaciones óptica y el láser

Frecuentemente clasificamos la radiación electromagnética por su longitud de onda; de esta forma elaboramos el llamado espectro electromagnético. Siguiendo esta clasificación podemos decir que está formado, de mayor a menos longitud de onda, por: ondas de radio, microondas, infrarrojo, región visible (es la que distinguimos como luz), rayos ultravioletas, rayos X y rayos gamma. El espectro electromagnético está formado por longitudes de onda comprendidas entre 10^3 metros hasta 10^{-12} metros. Existe además una relación inversa entre la frecuencia de las radiaciones y su longitud de onda, cuanto más frecuencia menor longitud de onda (ver ilustración 1)

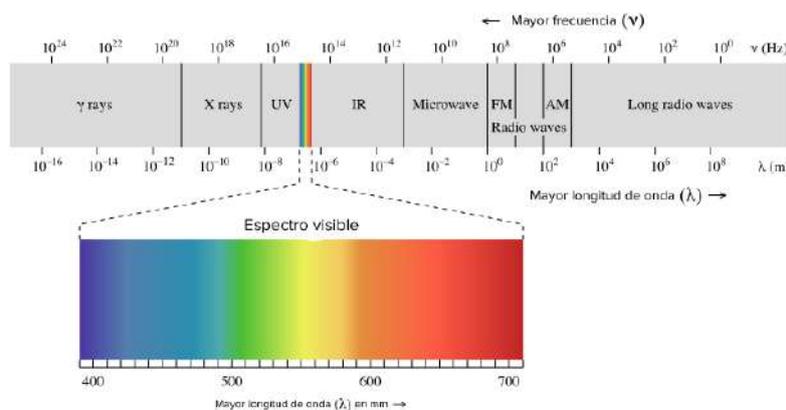


Ilustración 1. Espectro Electromagnético. Fuente (Universidad de California en Davis)

Del espectro electromagnético nos interesan las denominadas radiaciones ópticas. Caso aparte cabe destacar la radiación láser, la cual ha adquirido gran importancia en los últimos años. El láser forma parte de las radiaciones ópticas, pero es un tipo especial de radiación que definiremos más adelante.

La porción del espectro electromagnético comprendida entre 1 milímetro (mm) hasta 100 nanómetros (nm) se denomina radiaciones ópticas y comprende radiación ultravioleta, radiación visible y radiación infrarroja. El paso de una región a otra no es gradual, no hay unos valores determinados de longitud de onda para cada área, sin embargo, se han determinado unos límites por rendimiento. Las radiaciones ópticas son las más utilizadas hoy en día, es difícil encontrar a una persona que no esté en contacto con este tipo de radiaciones. Por lo tanto, son también las radiaciones más utilizadas en aplicaciones optométricas, ópticas y oftalmológicas. También podemos decir que las radiaciones ópticas son radiaciones no ionizantes, esto significa que al incidir sobre la materia no son capaces de arrancar ninguno de sus electrones. Pero, aunque no sean capaces de ionizar la materia sí que pueden llegar a provocar daños en el ser humano. Los efectos que pueden tener depende de la cantidad

de energía recibida, la frecuencia de la emisión, tiempo de exposición y duración de la radiación, por lo que no todas las radiaciones provocan el mismo daño.

El ojo humano no es capaz de distinguir longitudes de onda más largas o más cortas que las que comprende el espectro visible, pero eso no significa que no exista luz en esas regiones. No son percibidas ya que nuestro pigmento retiniano no es capaz de captarlas o porque otras estructuras oculares impiden que lleguen a la retina.

4.1.1 Radiación ultravioleta

Está comprendida entre las longitudes de onda que abarcan desde los 100 nm hasta los 400 nm. A su vez, se puede fraccionar en UVA (radiación ultravioleta A), UVB (radiación ultravioleta B) y UVC (radiación ultravioleta C), de más energético a menos energético respectivamente. Cuanta más cantidad de energía posea la radiación mayor facilidad para producir alteraciones en el ojo.

- UVA: engloba las longitudes de onda desde los 315 nm hasta los 400 nm. Es la radiación que más próxima se encuentra de la radiación visible. Puede llegar a producir deterioros en el cristalino ya que es el encargado de su absorción. Esta radiación provoca alteraciones en las proteínas del cristalino llegando a producir cataratas.
- UVB: incluye las longitudes de onda comprendidas entre 315 nm hasta los 280 nm. Este tipo de radiación es absorbida por el cristalino y córnea. Se introducen en el ojo a través de la córnea llegando a producir daños en las dos estructuras.
- UVC: abarca las longitudes de onda comprendidas entre 280 nm hasta 100 nm. Esta radiación es la más peligrosa de los tres tipos de radiaciones ultravioletas que existen. Afecta en mayor medida a las capas más externas de la córnea ya que son las primeras que entran en contacto con este tipo de radiación.

Aunque la mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por estructuras anteriores a la retina existe una limitada porción que sí que consigue llegar hasta ella.

4.1.2 Radiación visible

Comprende las longitudes de onda de 380 nm hasta 780 nm. Este tipo de radiación produce sensación visual y dependiendo de la longitud de onda que posea, podremos diferenciar los colores. El límite de cada franja de colores no es está determinado estrictamente ya que depende de la sensibilidad o de la percepción que posea cada individuo.

La radiación visible es captada por el globo ocular y es el propio ojo el que pone en práctica las respuestas de aversión ya que somos conscientes de que la estamos viendo. Estas respuestas de protección son de tipo natural y se fundamentan en detectar la radiación incidente para mandar una respuesta de defensa como puede llegar a ser retirar la mirada o el reflejo de parpadeo entre

otros. En el caso de que se traten de radiaciones ultravioletas o infrarroja estas respuestas de defensa natural no será efectivo ya que ese tipo de radiaciones no es detectado por el ojo, con lo cual inciden directamente sobre éste.

En el caso de este tipo de radiación se pueden llegar a producir lesiones térmicas o fotoquímicas en la retina, las cuales pueden producir una pérdida parcial o total de la visión. Dependiendo de las características de la radiación y del tiempo que estemos expuestos a ella, los daños producidos pueden ser reversibles o irreversible.

4.1.3 Radiación infrarroja

Comprende las longitudes de onda desde 780 nm hasta 1 mm y a su vez se puede dividir en tres porciones: IRA (infrarrojo cercano), IRB (infrarrojo medio) y IRC (infrarrojo lejano).

- IRA: va desde los 780 nm hasta los 1400 nm. Este tipo de radiación traspasa la córnea y el cristalino hasta llegar a la retina. Nuestro sistema visual no es capaz de detectar esta radiación por lo que no se produce respuesta natural de protección pudiendo llegar a afectar a la retina.
- IRB: se corresponde con longitudes de onda desde los 1400 nm hasta los 3000 nm. El humor acuoso es capaz de absorber longitudes de onda comprendidas hasta los 1400 nm, si se trata de una longitud de onda superior el encargado de absorberlas es el humor vítreo, por lo tanto, la retina queda protegida. Al producirse una absorción por parte del cristalino se produce también un aumento de la temperatura en esta zona y en las zonas adyacentes por lo que el cristalino se ve afectado en gran medida ya que no posee vasos sanguíneos que controlen su temperatura pudiendo llegar a producirse cataratas.
- IRC: engloba las longitudes de onda desde los 3000 nm hasta 1 mm. Esta radiación es captada por la córnea y debido a su poder térmico puede generar quemaduras es ésta. Una exposición continuada o altas intensidades pueden producir una pérdida de la transparencia lo que conlleva una opacificación de los medios transparentes.

4.1.4 Radiación láser

El láser (light amplification by stimulated emission of radiation: amplificación de la luz por emisión estimulada de la radiación) se puede definir como: “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” (Real Decreto 486/2010, 2010).

La emisión del láser puede poseer cualquier longitud de onda perteneciente a la región de las radiaciones ópticas, pero se trata de un haz monocromático es decir únicamente contiene una longitud de onda, aunque también es cierto, que hay láseres que están formados por un reducido número de longitudes de ondas. Otra de las características que presenta el láser es que

se define como un haz coherente en tiempo y espacio, esto quiere decir que cada fotón que se emite es similar a los anteriores. Gracias a características como éstas y otras derivadas de su emisión, los láseres se pueden aplicar en cirugía oftalmológica para tratar numerosas enfermedades.

Será necesario, por tanto, definir también la radiación láser: “toda aquella radiación electromagnética emitida por un producto láser entre 180 nm y 1mm que se produce como resultado de emisión estimulada” (Real Decreto 486/2010, 2010).

Para poder realizar una distribución de los productos láser es necesario tener en cuenta la irradiación o la exposición radiante que estos poseen. La clase conlleva la información primordial de las propiedades de la emisión láser. A medida que aumentamos la clase aumenta también capacidad para producir daños.

Siguiendo la normativa UNE – EN 60825¹ se puede realizar una clasificación del láser en función de su peligrosidad (ver ilustración 2):

- Clase 1: los láseres de esta clase son seguros durante su utilización, en todas las condiciones normales de su uso, siempre y cuando el funcionamiento de los mismos sea prudente y sensato.
- Clase 1 M: seguro para los ojos cuando no se utiliza ningún tipo de protección siendo su utilización racional y prudente. A diferencia de los productos láser de la clase 1, estos pueden conllevar a una situación comprometida si se mira directamente el haz con instrumentos ópticos.
- Clase 2: la longitud de onda de esta clase de láser es de 400 nm a 700 nm, es decir, forman parte del espectro visible. Al emitir en este espectro nuestros ojos son capaces de captarlos produciendo respuestas de protección naturales denominadas respuestas de aversión. Éstas consisten en parpadear (reflejo de parpadeo) o incluso llegar a desviar los ojos para evitar la incidencia de este haz. Se puede considerar que son seguros en exposiciones de corto tiempo y al usarlos con instrumentos ópticos.
- Clase 2M: al igual que los productos de la clase 2, se pueden considerar seguros sin protección ocular en exposición de corto tiempo. Existe protección natural producida por respuestas de aversión. En este caso no son seguros cuando son utilizados con instrumentos ópticos.
- Clase 3R: fijarse de forma directa en el haz puede resultar peligroso. En la práctica el peligro de daño es parcialmente bajo cuando existe exposiciones de corto plazo. El riesgo es menor que en láseres de la clase 3B.
- Clase 3B: se considera que existe riesgo cuando existe una exposición tanto directa como indirecta a este haz dentro de longitud de seguridad normal de peligro o riesgo para los ojos.

¹ Normativa UNE – EN 60825 disponible en <https://www.une.org/>

Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible

- Clase 4: la exposición a este tipo de láser tanto de forma directa como de forma indirecta es peligrosa llegando a producir daños tanto en los ojos como en la piel.

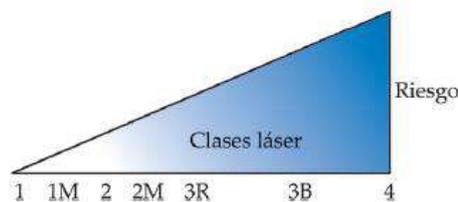


Ilustración 2. Gráfico de peligrosidad en función de la clase de láser. (EN - UNE 60825)

4.2 Valores límites de exposición

Los valores límites de exposición a la radiación óptica tienen en cuenta los efectos comprobados directamente sobre la salud y en consideraciones biológicas.

Antes de comenzar a definir cuáles son los límites de exposición de las radiaciones ópticas es necesario definir una serie de conceptos:

- Energía radiante (Q): es la energía emitida por una fuente de radiación, transferida por una radiación o que incide sobre una superficie en forma de ondas electromagnéticas. Se expresa en julios. (Real Decreto 486/2010, 2010)
- Flujo radiante o potencia radiante (Φ): es la energía radiante emitida, transferida o recibida en la unidad de tiempo, expresada en vatios ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$) (Real Decreto 486/2010, 2010)
- Irradiancia o densidad de potencia (E): es la potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie expresada en vatios por metro cuadrado (W/m^2) (Real Decreto 486/2010, 2010)
- Exposición radiante (H): sirve para cuantificar la exposición en los rangos del UV e IR y representa la energía radiante incidente en una superficie por unidad de superficie receptora. Si se trata de una exposición o radiación continua, la exposición radiante se calcula multiplicando la irradiancia (E) por la duración de la exposición en segundos. (Real Decreto 486/2010, 2010)
- Ángulo subtendido o ángulo visual: los ojos focalizan a través de la pupila y cristalino, hasta un área muy pequeña de la retina. Los haces luminosos penetran, por tanto, con un determinado ángulo llamado ángulo subtendido o ángulo visual, del cual depende la cantidad de radiación que llega hasta el fondo del ojo. EL valor de este ángulo varía en función de la posición del objeto con respecto al ojo del observador. (Real Decreto 486/2010, 2010)

- Radiancia (L): indica el grado de concentración de un haz de radiación óptica. (Real Decreto 486/2010, 2010)

Una vez definidos estos conceptos, pasaremos a determinar los valores límites de exposición (VLE) para cada tipo de radiación óptica, los cuales están basados en la International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)², teniendo en cuenta antes una serie de consideraciones previas. Cabe destacar que la Conferencia estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH)³ ha publicado también VLE similares pero no idénticos.

4.2.1 Consideraciones previas

Para un correcto uso de los VLE será necesario expresar estos en magnitudes radiométricas para así cuantificar la radiación óptica, además, de definir las expresiones matemáticas que interpretan el significado físico para cada VLE y por último conocer las curvas de ponderación biológica que reproducen la respuesta del organismo frente a las distintas longitudes de onda del espectro.

4.2.1.1 Expresiones o fórmulas matemáticas

Es importante saber la distribución espectral de la fuente que emite la radiación ya que existen factores de corrección que depende de la longitud de onda que posea la radiación.

- Curva de ponderación $S(\lambda)$ o de efectividad espectral para radiación UV: se asigna a longitudes de onda entre los 180 nm y 400 nm, se ha conseguido evaluando experimentalmente las secuelas producidas por este tipo de radiación. Dentro de esta función el valor supremo se da a 270 nm con un factor máximo de 1. Para las demás longitudes de onda saber que el factor disminuye gradualmente. En el caso de la radiación UVA este factor disminuye hasta alcanzar un valor igual 0. Los valores determinados para cada longitud de onda se muestran en la tabla 1 del anexo I.

² Directrices publicadas por la International Commission on Non Ionizing Radiation Protection se pueden consultar en www.icnirp.org

³ VLE publicados por la Conferencia estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales se pueden consultar en <https://www.acgih.org/>

Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible

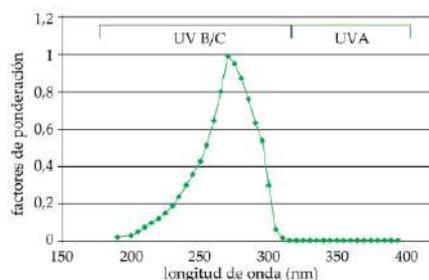


Ilustración 3. Curva de efectividad espectral $S(\lambda)$. Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

- Curva de ponderación $B(\lambda)$ o riesgo fotoquímico para la radiación visible: se aplica en el intervalo de radiación con longitud de onda comprendida entre 300 nm y 700 nm. El factor de ponderación máximo posee valor igual a 1 para las longitudes de onda comprendidas entre los 435 nm y 440 nm, este intervalo pertenece a la llamada luz azul, la más peligrosa para la retina. Los valores determinados para cada longitud de onda quedan recogidos en la tabla 2 del anexo I.

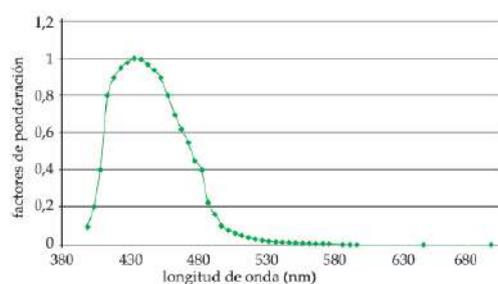


Ilustración 4. Curva $B(\lambda)$ o función de riesgo por luz azul. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

- Curva de ponderación $R(\lambda)$ o de riesgo térmico para visible e IRA: el rango de valores queda recogido entre 380 nm y 1400 nm. La mayoría de factores de ponderación son mayores a 1. Los valores determinados para cada longitud de onda se representan en la tabla 2 del anexo I.

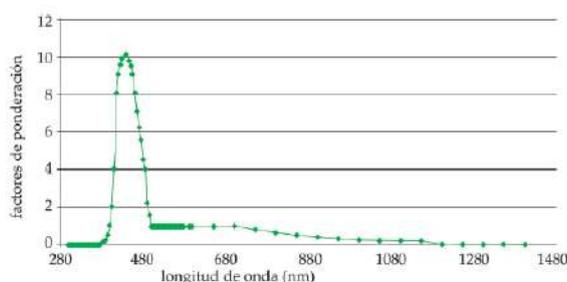


Ilustración 5. Curva $R(\lambda)$ o función de riesgo térmico. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

4.2.1.2 Cálculos integrales

Para poder emplear las curvas de ponderación y determinar las magnitudes radiométricas, es necesario realizar unos cálculos integrales. De forma general, para calcular una magnitud radiométrica total, bastará con sumar los productos parciales resultantes de multiplicar cada componente espectral por el incremento de longitud de onda, tal como se indica en las siguientes fórmulas (Real Decreto 486/2010, 2010) (ver ecuación 1 y 2).

$$E = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

Ecuación 1. Irradiancia o Irradiancia total. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

$$L = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

Ecuación 2. Radiancia o Radiancia total. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

Dónde λ_1 y λ_2 son el intervalo de emisión de la fuente y $\Delta\lambda$ es el incremento de longitudes de onda o ancho de banda.

Si queremos adherir las curvas de ponderación, será necesario agregar los valores de ponderación establecidos para cada longitud de onda (ver ecuación 3, 4 y 5)

$$E_{\text{eff}} = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Ecuación 3. Irradiancia ponderada con la curva $S(\lambda)$, o irradiancia efectiva. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

$$L_B = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Ecuación 4. Radiancia ponderada con la curva $B(\lambda)$. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

$$L_R = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Ecuación 5. Radiancia ponderada con la curva $R(\lambda)$. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible

Los valores $S(\lambda)$, $B(\lambda)$ y $R(\lambda)$ de las ecuaciones anteriores vienen determinados para cada longitud de onda.

4.2.2 VLE para radiación UV

Existen dos niveles de VLE a tener en cuenta, VLE – 1 y VLE – 2, el primero de ellos se utiliza para toda la radiación UV mientras que el segundo queda determinado para la radiación UVA ya que no utilizaremos ningún factor de ponderación porque como hemos mencionado anteriormente, los factores de ponderación en esta zona del espectro son muy similares 0. VLE – 1 calcula la exposición radiante utilizando la ponderación de la curva $S(\lambda)$ (ver ecuación 6 y 7)

$$H_{\text{eff}} = \left(\sum_{180}^{400} E_{\lambda} \cdot S_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \right) \cdot t_{\text{exposición}}$$

Ecuación 6. VLE - 1: Exposición Radiante ponderada con la curva $S(\lambda)$. (Real Decreto 486/2010, 2010)

$$H_{\text{UVA}} = \left(\sum_{315}^{400} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \right) \cdot t_{\text{exposición}}$$

Ecuación 7. VLE - 2: Exposición Radiante, no incluye ponderación. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

Además, podemos determinar el tiempo máximo de exposición permitido y la irradiancia máxima sabiendo que la energía es el resultado de la potencia por el tiempo de exposición (ver ecuación 8 y 9)

$$t_{\text{máx. permitido}} (\text{s}) \leq \frac{30 \text{ J/m}^2}{(E_{\text{eff}})_{\text{max}} \text{ W/m}^2}$$

Ecuación 8. Tiempo de exposición e irradiancia máxima para VLE -1. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

$$t_{\text{máx. permitido}} (\text{s}) \leq \frac{10.000 \text{ J/m}^2}{(E_{\text{UVA}})_{\text{max}} \text{ W/m}^2}$$

Ecuación 9. Tiempo de exposición e irradiancia máxima para VLE - 2. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

4.2.3 VLE para radiación visible e infrarroja

A mayores de las curvas de ponderación debemos tener presente la cantidad de radiación que penetra en nuestro ojo, lo cual depende de la geometría de cada ojo.

En función del nivel de dificultad determinaremos cuales son los VLE para cada agrupación de longitud de onda.

- VLE – 7: Determinada para longitudes de onda entre 300 nm y 3000 nm, estos niveles límites de exposición están determinados para garantizar la protección ante las quemaduras que se producen por la radiación visible e infrarroja con esta determinada longitud de onda en la piel. El cálculo no depende de ninguna curva de ponderación (ver ecuación 10)

$$H_{\text{piel}} = \left(\sum_{380}^{3000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \right) \cdot t_{\text{exposición}}$$

Ecuación 10. Cálculo de H_{piel} no incluye ninguna curva de ponderación. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

- VLE – 6: está determinada para longitudes de onda que comprenden entre los 780 nm y 3000 nm. Está pensada para evitar que los posibles riesgos que se puedan generar tras una exposición a esta radiación no afecten ni a cristalino ni a córnea. Para calcular los valores límites de exposición en este caso únicamente se tiene en cuenta el tiempo que dure la exposición a esta radiación. No se ponderan y se reflejan en modo de irradiancia total. El VLE para tiempos inferiores a 1.000 segundos tiene el exponente negativo, tal y como aparece en las recomendaciones de ICNIRP que, como se ha mencionado en la introducción de este apéndice, han servido de base para el establecimiento de los valores límite de exposición (Real Decreto 486/2010, 2010)
- VLE – 5 y VLE - 4: establecido para longitudes de onda que comprenden entre los 780 y 1400 nm y entre los 380 nm y 1400 nm respectivamente. Estos límites se aplican a la vez, ya que ambos preservan la protección ante daños similares como es el caso de las quemaduras en la retina. Usaremos el VLE – 5 (ver ecuación 11) únicamente cuando estemos ante una radiación IRA, en cambio utilizaremos los VLE – 4 (ver ecuación 12) cuando se trata de una radiación con estímulo visual. No existe una única forma de calcular estos límites de exposición, pero sí que es posible sintetizarlos en una sola fórmula para cada VLE. Para realizar esta simplificación se debe tener en cuenta tanto los tiempos de exposición como el ángulo subtendido. En los casos que el tiempo de exposición sea mayor a 10 segundos se aplicará VLE – 5, además para aplicar estos límites tiene que cumplir el requisito de que el ángulo subtendido esté comprendido entre 11 mrad y 100 mrad. Por otro lado, en los casos en los que el tiempo de exposición esté entre 10 segundos y 10 μs se aplicará VLE –4, además el ángulo subtendido tiene que estar comprendido ente 1,7 mrad y 100 mrad.

$$L_R = \sum_{780}^{1400} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Ecuación 11. Cálculo de la radiancia para VLE -5. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

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

Ecuación 12. Cálculo de la radiancia para VLE-4. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

- VLE – 3a y VLE 3b: las longitudes que comprenden estos límites comprenden desde 300 nm hasta 700 nm. Estos límites son los que se utilizan para prevenir a la retina de daños producidos por la luz azul. El valor del límite de exposición depende tanto del ángulo subtendido como del tiempo de exposición (ecuación 13 y 14)

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

Ecuación 13. Radiancia ponderada con $B(\lambda)$. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

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

Ecuación 14. Irradiancia ponderada con $B(\lambda)$. Fuente: (Real Decreto 486/2010, 2010)

4.2.4 VLE para radiación láser

Podemos distinguir dos tipos de láser, aquellos que son continuos y los que son pulsados. Un láser continuo se califica por la potencia media de salida que posee, su límite vendrá definido como E (W/m^2), mientras que en un láser pulsado el cual viene determinado por la energía que tiene el pulso, expresaremos el valor de sus límites de exposición en H (J/m^2). En la radiación láser influyen muchas variables por lo que es complicado determinar un valor de VLE.

La clasificación establecida en la UNE – EN 60825 – 1⁴ implica que no se sobrepasarán los Límites de Emisión Accesibles (LEA) designados para cada clase. Los LEA son valores de potencia, irradiancia, energía radiante o energía establecidos según longitud de onda y el tiempo de emisión. Se deducen a partir

⁴ Norma UNE – EN 60825 – 1 se puede consultar en <https://www.une.org/>

de los valores límite de exposición bajo unas condiciones de medición fijadas en la norma (Real Decreto 486/2010, 2010).

Los valores límite de irradiancia (E) o exposición radiante (H) para la radiación láser están definidos en las tablas 3 y 4 del anexo I. Para encontrar el valor límite de exposición tenemos que en primer lugar elegir la tabla correcta y a continuación cruzaremos los valores de λ y el tiempo de exposición. En este caso la elección de los VLE no será tan fácil ya que depende de numerosas variables. Para determinar los valores de E y H necesitaremos conocer el valor que tienen asignados los coeficientes (ver tablas 5,6 y 7)

5. CONCLUSIONES

Como hemos podido observar, es importante conocer cuáles son los valores límites de exposición para cada tipo de radiación, ya que los riesgos que éstos provocan depende de la longitud que posea la radiación emitida. Estos valores tienen en cuenta los efectos comprobados directamente sobre la salud.

Se calcula a partir de ecuaciones y cálculo integral en las que se tiene en cuenta la λ con la que se emite la radiación y las curvas de ponderación biológicas que reproducen la respuesta del organismo frente a distintas λ del espectro. Estas curvas de ponderación también tienen unos valores determinados para cada λ y se puede clasificar en 3 diferentes: la curva de ponderación S (λ) utilizada para la radiación ultravioleta, la curva de ponderación B (λ) para la radiación visible y la curva de ponderación R (λ) para radiación visible e infrarroja. Una vez calculadas los límites sabremos cuál es la exposición máxima sabiendo que sobrepasando estos valores las posibilidades de producirse algún daño sobre el ojo aumentan. Podemos ver un resumen en la tabla 8 del anexo I.

Las radiaciones láser también tienen sus valores límites de exposición definidos como podemos ver en las tablas 3 y 4 del anexo I. En este caso se basan en los LEA (límites de Emisión Accesibles) que están descritos para cada clase de láser.

BIBLIOGRAFÍA

1. Real Academia Española. (2019). Recuperado de <http://www.rae.es> (3 de febrero 2019)
2. Boletín Oficial del Estado. BOE.es - Documento consolidado BOE-A-2010-6485. Recuperado 13 mayo, 2019, de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2010-6485>
3. Real Decreto 486/2010. (24 de 04 de 2010). 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. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2010-6485> (15 de febrero 2019)
4. Universidad de California en Davis. *ChemWiki*. Obtenido de <http://chemwiki.wikidot.com/> (3 de febrero 2019)
5. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, Gobierno de España. Recuperado de <http://www.insht.es> (15 de febrero 2019)
6. Normalización Española (UNE). Recuperado de <https://www.une.org/> (1 de marzo 2019)
7. Guidelines on limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths Between 180 nm and 40 nm (Incoherent Optical Radiation). *Health Physics* 87(2): 171 -186; 2004
8. NTP 654: Láseres: nueva clasificación del riesgo (UNE EN 60825-1 /A2: 2002). Recuperado http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_654.pdf (5 de marzo 2019)
9. Seguridad de los productos láser. Parte 1: Clasificación de los equipos y requisitos (UNE – EN 60825 – 1:2015). Recuperado de <https://www.une.org/> (5 de marzo 2019)
10. Arieli R, La "Aventura del Láser". Versión en español por A. Requena, C. Cruz, A. Bastida y J.Zúñiga. Universidad de Murcia (Spain). Recuperado de <https://www.um.es/leq/laser/index.htm> (5 de marzo 2019)
11. Penny J. Smalley RN, CMLSO (2011) Laser safety: Risks, Hazards, and control measures 2011; 20(2): 95–106. Doi: [10.5978/islm.20.95](https://doi.org/10.5978/islm.20.95) (10 de marzo 2019)
12. Oregon State University. Environmental Health and Safety, Laser Biological Hazards – Eyes <https://ehs.oregonstate.edu/laser/training/laser-biological-hazards-eyes>
13. International Commission on non – ionizing radiation protection (ICNIRP). Recuperado de <https://www.icnirp.org/> (22 de marzo 2019)
14. Conferencia Estadounidense de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH). Recuperado de <https://www.acgih.org/> (22 de marzo 2019)
15. Normas ISO (ISOTools). Recuperado de <https://www.isotools.org> (9 de mayo 2019)

ANEXO I

Tabla 1. Valores de $S(\lambda)$ determinados para cada longitud de onda. Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

λ en nm	$S(\lambda)$								
180	0,0120	228	0,1737	276	0,9434	324	0,000520	372	0,000086
181	0,0126	229	0,1819	277	0,9272	325	0,000500	373	0,000083
182	0,0132	230	0,1900	278	0,9112	326	0,000479	374	0,000080
183	0,0138	231	0,1995	279	0,8954	327	0,000459	375	0,000077
184	0,0144	232	0,2089	280	0,8800	328	0,000440	376	0,000074
185	0,0151	233	0,2188	281	0,8568	329	0,000425	377	0,000072
186	0,0158	234	0,2292	282	0,8342	330	0,000410	378	0,000069
187	0,0166	235	0,2400	283	0,8122	331	0,000396	379	0,000066
188	0,0173	236	0,2510	284	0,7908	332	0,000383	380	0,000064
189	0,0181	237	0,2624	285	0,7700	333	0,000370	381	0,000062
190	0,0190	238	0,2744	286	0,7420	334	0,000355	382	0,000059
191	0,0199	239	0,2869	287	0,7151	335	0,000340	383	0,000057
192	0,0208	240	0,3000	288	0,6891	336	0,000327	384	0,000055
193	0,0218	241	0,3111	289	0,6641	337	0,000315	385	0,000053
194	0,0228	242	0,3227	290	0,6400	338	0,000303	386	0,000051
195	0,0239	243	0,3347	291	0,6186	339	0,000291	387	0,000049
196	0,0250	244	0,3471	292	0,5980	340	0,000280	388	0,000047
197	0,0262	245	0,3600	293	0,5780	341	0,000271	389	0,000046
198	0,0274	246	0,3730	294	0,5587	342	0,000263	390	0,000044
199	0,0287	247	0,3865	295	0,5400	343	0,000255	391	0,000042
200	0,0300	248	0,4005	296	0,4984	344	0,000248	392	0,000041
201	0,0334	249	0,4150	297	0,4600	345	0,000240	393	0,000039
202	0,0371	250	0,4300	298	0,3989	346	0,000231	394	0,000037
203	0,0412	251	0,4465	299	0,3459	347	0,000223	395	0,000036
204	0,0459	252	0,4637	300	0,3000	348	0,000215	396	0,000035
205	0,0510	253	0,4815	301	0,2210	349	0,000207	397	0,000033
206	0,0551	254	0,5000	302	0,1629	350	0,000200	398	0,000032
207	0,0595	255	0,5200	303	0,1200	351	0,000191	399	0,000031
208	0,0643	256	0,5437	304	0,0849	352	0,000183	400	0,000030
209	0,0694	257	0,5685	305	0,0600	353	0,000175		
210	0,0750	258	0,5945	306	0,0454	354	0,000167		
211	0,0786	259	0,6216	307	0,0344	355	0,000160		
212	0,0824	260	0,6500	308	0,0260	356	0,000153		
213	0,0864	261	0,6792	309	0,0197	357	0,000147		
214	0,0906	262	0,7098	310	0,0150	358	0,000141		
215	0,0950	263	0,7417	311	0,0111	359	0,000136		
216	0,0995	264	0,7751	312	0,0081	360	0,000130		
217	0,1043	265	0,8100	313	0,0060	361	0,000126		
218	0,1093	266	0,8449	314	0,0042	362	0,000122		
219	0,1145	267	0,8812	315	0,0030	363	0,000118		
220	0,1200	268	0,9192	316	0,0024	364	0,000114		
221	0,1257	269	0,9587	317	0,0020	365	0,000110		
222	0,1316	270	1,0000	318	0,0016	366	0,000106		
223	0,1378	271	0,9919	319	0,0012	367	0,000103		
224	0,1444	272	0,9838	320	0,0010	368	0,000099		
225	0,1500	273	0,9758	321	0,000819	369	0,000096		
226	0,1583	274	0,9679	322	0,000670	370	0,000093		
227	0,1658	275	0,9600	323	0,000540	371	0,000090		

Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible

Tabla 2. Valores de $B(\lambda)$ y $R(\lambda)$ establecidos para cada longitud de onda. Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

Longitud de onda (nm)	$B(\lambda)$	$R(\lambda)$
$300 \leq \lambda < 380$	0,01	-----
380	0,01	0,10
385	0,013	0,13
390	0,025	0,25
395	0,05	0,50
400	0,10	1,0
405	0,20	2,0
410	0,40	4,0
415	0,80	8,0
420	0,90	9,0
425	0,95	9,5
430	0,98	9,8
435	1,0	10,0
440	1,0	10,0
445	0,97	9,7
450	0,94	9,4
455	0,90	9,0
460	0,80	8,0
465	0,70	7,0
470	0,62	6,2
475	0,55	5,5
480	0,45	4,5
485	0,32	3,2
490	0,22	2,2
495	0,16	1,6
500	0,10	1,0
$500 < \lambda \leq 600$	0,05	1,0
$600 < \lambda \leq 700$	$10^{0,02 \cdot (450 - \lambda)}$	1,000
$700 < \lambda \leq 1050$	-----	$10^{0,002 \cdot (700 - \lambda)}$
$1050 < \lambda \leq 1150$	-----	0,2
$1150 < \lambda \leq 1200$	-----	$0,2 \cdot 10^{0,02 \cdot (1150 - \lambda)}$
$1200 < \lambda \leq 1400$	-----	0,02

Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible

Tabla 3. Valores límite de exposición de los ojos al láser (Tiempo Exposición ≥ 10 s) Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

Longitud de onda λ (nm)	(1)	Apertura	VALOR Límite			Efecto
			$10^1 \dots 10^2$	Duración $10^2 \dots 10^4$	$10^4 \dots 3 \cdot 10^4$	
UVC	180-280	3,5 mm	H=30 (J/m^2)			Lesiones fotoquímicas y térmicas
UVB	280-302	3,5 mm	H=30 (J/m^2)			Lesiones fotoquímicas y térmicas
	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	315-400	3,5 mm	H=1·10 ⁴ (J/m^2)			Lesiones fotoquímicas y térmicas
Visible (2)	400-600	7mm	H=100·C _B (J/m^2) $\gamma = 11$ mrad (3)	E=1·C _B (W/m^2) $\gamma = 1,1 \cdot t^{0,5}$ mrad (3)	E=1·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 (W/m^2) Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t \leq T_1$ Entonces H=18·C _E ·t ^{0,25} (J/m^2) Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t > T_1$ Entonces E=18·C _E ·T ₁ ^{0,25} (W/m^2)	Lesiones de la retina (térmica)		
IRA	700-1400	7 mm	Si $\alpha \leq 1,5$ mrad Entonces E=10·C _A ·C _C (W/m^2) Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t \leq T_1$ Entonces H=18·C _A ·C _C ·C _E ·t ^{0,25} (J/m^2) Si $\alpha > 1,5$ mrad y $t > T_1$ Entonces E=18·C _A ·C _C ·C _E ·T ₁ ^{0,25} (W/m^2)	Lesiones térmicas		
IRB e IRC	1400- 10 ⁶	Véase(4)	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 600 nm) 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 $G=10^4 \cdot C_B$ ($J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) para $10 < t \leq 10.000$ s y $L=100 \cdot C_B$ para $t > 10.000$ s. Para medir G y L, γ_{av} 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 ($J \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)).

(3) γ : Ángulo del cono límite del campo visual de medición expresado en miliradianes (mrad); γ_{av} : campo visual de medición (mrad). Si $\alpha > \gamma$, entonces $\gamma_a = \alpha$ (si se emplea un campo visual de medición mayor, el riesgo resulta sobrevalorado.) Si $\alpha \leq \gamma$, γ_a 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 miliradianes (mrad). Apertura 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 3,5 mm. Para λ entre 10^3 a 10^6 el diámetro de apertura es 11 mm

Tabla 4. VLE de los ojos al láser (tiempo exposición < 10 s). Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

Longitud de onda λ (nm) (1)	Apertura	Duración						Efecto		
		10 ⁻²¹ ..10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹ ..10 ⁻⁸	10 ⁻⁶ ..10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ ..1,8·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴ ..5·10 ⁻³	5·10 ⁻³ ..10 ⁰		5·10 ³ ..10	
UVC	180-280	1 mm para t<0,3s 1,5·t ^{0,75} para 0,3<t<10s	E=3·10 ¹⁰ (W/m ²) (Véase nota 2)	H= 30 (Jm ²)						Lesiones fotoquímicas y térmicas
UVB	280-302			H= 30 (Jm ²)						Lesiones fotoquímicas y térmicas.
	303			H= 40 (Jm ²) Si t < 2,6·10 ⁻⁹ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	304			H= 60 (Jm ²) Si t < 1,3·10 ⁻⁸ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	305			H=100 (Jm ²) Si t < 1,0·10 ⁻⁷ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	306			H=160 (Jm ²) Si t < 6,7·10 ⁻⁷ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	307			H= 250 (Jm ²) Si t < 4,0·10 ⁻⁶ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	308			H= 400 (Jm ²) Si t < 2,6·10 ⁻⁵ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	309			H= 630 (Jm ²) Si t < 1,6·10 ⁻⁴ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	310			H=1·10 ³ (Jm ²) Si t < 1,0·10 ⁻³ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	311			H=1,6·10 ³ (Jm ²) Si t < 6,7·10 ⁻³ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
	312			H=2,5·10 ³ (Jm ²) Si t < 4,0·10 ⁻² entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)						
313	H=4,0·10 ³ (Jm ²) Si t < 2,6·10 ⁻¹ entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)									
314	H=6,3·10 ³ (Jm ²) Si t < 1,6 entonces H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (3)									
UVA	315-400			H= 5,6·10 ³ ·t ^{0,25} (Jm ²)						Lesiones fotoquímicas y térmicas
Visible e IRA	400-700			H=1,5·10 ⁻⁴ ·C _E (Jm ²)	H=2,7·10 ⁻⁴ ·t ^{0,75} ·C _E (Jm ²)	H=5·10 ⁻³ ·C _E (Jm ²)	H= 18·t ^{0,75} ·C _E (Jm ²)			Lesiones térmicas
	700-1050	H=1,5·10 ⁻⁴ ·C _A ·C _E (Jm ²)	H=2,7·10 ⁻⁴ ·t ^{0,75} ·C _A ·C _E (Jm ²)	H=5·10 ⁻³ ·C _A ·C _E (Jm ²)	H= 18·t ^{0,75} ·C _A ·C _E (Jm ²)					
	1050-1400	H=1,5·10 ⁻³ ·C _C ·C _E (Jm ²)	H=2,7·10 ⁻³ ·t ^{0,75} ·C _C ·C _E (Jm ²)	H=5·10 ⁻² ·C _C ·C _E (Jm ²)	H= 90·t ^{0,75} ·C _C ·C _E (Jm ²)					
IRB e IRC	1400-1500	E=1·10 ¹² (W/m ²) (2)		H=1·10 ¹ (Jm ²)			H= 5,6·10 ¹ ·t ^{0,25} (Jm ²)	Lesiones térmicas		
	1500-1800	E=1·10 ¹¹ (W/m ²) (2)		H=1·10 ⁰ (Jm ²)						
	1800-2600	E=1·10 ¹² (W/m ²) (2)		H=1·10 ⁰ (Jm ²)			H= 5,6·10 ¹ ·t ^{0,25} (Jm ²)			
	2600-10 ⁶	E=1·10 ¹¹ (W/m ²) (2)		H=100 (Jm ²)	H= 5,6·10 ⁰ ·t ^{0,25} (Jm 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 1ns establecidos por la ICNIRP
 (3) En caso de múltiples pulsos, las duraciones del pulso láser de los pulsos producidos en un intervalo T_{int} (Tabla B.7) deberán ser sumado y el valor del tiempo resultante sustituirse por t en 5,6·10³·t^{0,25}
 (4) Cuando 1400 ≤ λ < 10⁶ el diámetro de apertura es 1mm para t ≤ 0,3 y 1,5·t^{0,75} para 0,3 < t < 10. Cuando 10⁶ ≤ λ < 10⁹ el diámetro de apertura es 11mm.

Tabla 5. Determinación del cálculo del C_A, C_B, C_C Y T₁. Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

Factor	Longitud de onda λ (nm)	Valor
C _A	λ < 700	C _A = 1,0
	700 --- 1050	C _A = 10 ^{0,002(λ-700)}
	1050 --- 1400	C _A = 5,0
C _B	400 --- 450	C _B = 1,0
	450 --- 700	C _B = 10 ^{0,02(λ-450)}
C _C	700 --- 1150	C _C = 1,0
	1150 --- 1200	C _C = 10 ^{0,018(λ-1150)}
	1200 --- 1400	C _C = 8,0
T ₁	λ < 450	T ₁ = 10 (s)
	450 --- 500	T ₁ = 10·10 ^{0,02(λ-450)} (s)
	λ > 500	T ₁ = 100 (s)

Tabla 6. Determinación del cálculo γ. Fuente. (Real Decreto 486/2010, 2010)

Factor	Intervalo de t _{expo} (s)	Valor
γ	t ≤ 100	γ = 11 (mrad)
	100 < t < 10 ⁴	γ = 1,1·t ^{0,3} (mrad)
	t > 10 ⁴	γ = 110 (mrad)

Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible

Tabla 7. Determinación del cálculo de C_E . Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

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 8. VLE para las radiaciones ópticas y sus efectos sobre la salud. Fuente (Real Decreto 486/2010, 2010)

Nº orden	Longitud de onda λ (nm)	Valor límite (unidades)	Parte del cuerpo/Riesgo
1	180-400 (UV A-B-C)	$H_{\text{ent}} = 30$ (J/m^2) <i>valor referido a 8 horas</i>	Ojos: Córnea----fotoqueratitis Onjuntiva----conjuntivitis Cristalino---cataratas Piel: Eritema, elastosis, cáncer de piel
2	315-400 (UVA)	$H_{\text{UVA}} = 10^4$ (J/m^2) <i>valor referido a 8 horas</i>	Ojos: Cristalino-----cataractogénesis
3 a	$(\alpha \geq 11$ mrad) 300-700 (luz azul) ⁽¹⁾	Para $t \leq 10.000$ s $L_R = 10^6/t$ ($W/m^2 \cdot sr$)	Ojos: Retina----fotoretinitis
		Para $t > 10.000$ s $L_R = 100$ ($W/m^2 \cdot sr$)	
3 b	$(\alpha < 11$ mrad) ⁽²⁾ 300-700 (luz azul) ⁽¹⁾	Para $t \leq 10.000$ s $E_B = 100/t$ (W/m^2)	
		Para $t > 10.000$ s $E_B = 0,01$ (W/m^2)	
4	380 – 1400 (visible e IRA)	Para $t > 10$ s $L_R = (2,8 \cdot 10^{17}) / C_a$ ($W/m^2 \cdot sr$)	Para: $\alpha \leq 1,7$ mrad $C_a = 1,7$ $1,7 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C_a = \alpha$ $\alpha > 100$ mrad $C_a = 100$
		Para $10 \mu s \leq t \leq 10$ s $L_R = (5 \cdot 10^{17}) / (C_a \cdot t^{0,25})$ ($W/m^2 \cdot sr$)	
		Para $t < 10 \mu s$ $L_R = (8,89 \cdot 10^{18}) / C_a$ ($W/m^2 \cdot sr$)	
5	780 – 1400 (IRA)	Para $t > 10$ s $L_R = (6 \cdot 10^{16}) / C_a$ ($W/m^2 \cdot sr$)	Para: $\alpha \leq 11$ mrad $C_a = 11$ $11 \leq \alpha \leq 100$ mrad $C_a = \alpha$ $\alpha > 100$ mrad $C_a = 100$
		Para $10 \mu s \leq t \leq 10$ s $L_R = (5 \cdot 10^{17}) / (C_a \cdot t^{0,25})$ ($W/m^2 \cdot sr$)	
		Para $t < 10 \mu s$ $L_R = (8,89 \cdot 10^{18}) / C_a$ ($W/m^2 \cdot sr$)	
6	780-3000 (IRA e IRB)	Para $t \leq 1.000$ s $E_{\text{IR}} = 18.000 \cdot t^{0,75}$ (W/m^2)	Ojos: Córnea----Quemaduras Cristalino---cataratas
		Para $t > 1.000$ s $E_{\text{IR}} = 100$ (W/m^2)	
7	380-3000 (visible, IRA e IRB)	Para $t < 10$ s $H_{\text{piel}} = 20.000 \cdot t^{0,25}$ (J/m^2)	Piel: ---Quemaduras

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 $\alpha < 11$ mrad, L_R 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: $t_{\text{max}} = 100/E_B$, este valor debido a los movimientos oculares no es superior a 100s.