



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Sebastián Ignacio Rojas Jofré

Riesgos Fotobiológicos de las Fuentes de Luz Artificiales

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 04 de enero de 2019



Riesgos Fotobiológicos de las Fuentes de Luz Artificiales

Sebastián Ignacio Rojas Jofré

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Enrique Piraino Davidson
Profesor Guía

Sr. Ivan Kopaitic Otero
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 04 de enero de 2019

A mi padre Luis por todo el apoyo y consejos entregados durante todo este proceso, mi madre Lorena por siempre sacarme adelante impulsando mis metas y la autosuperación.

Resumen

El presente proyecto de título expone las radiaciones ópticas artificiales incoherentes, entregando información sobre estas y como son clasificadas según su ancho de banda en las diferentes subbandas existentes. Las radiaciones ópticas afectan directamente a los órganos diana que son los ojos y la piel, y en consecuencia se presenta un estudio para los diferentes daños o enfermedades que estos órganos presentan de la exposición a las radiaciones.

En el estudio de los daños percibidos por los órganos diana, se detalla de forma específica cuales son los anchos de banda que afectan para los diferentes daños y cuál es la longitud de onda en específico que los afecta. Identificando como absorbe y transmiten las diferentes longitudes de onda en los ojos y la piel

Se presentan los límites de exposición a radiaciones ópticas según lo establecido por la directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006, respecto a los límites se analiza cada ancho de banda según corresponda para los diferentes órganos y daños presentes. Debido a que las longitudes de onda se absorben y transmiten de forma diferente para los órganos, se establecen las curvas de ponderación, las cuales hacen referencia exacta para los diferentes daños que se mencionan.

Finalizado el estudio, se concluye sobre el impacto que tiene el estudio de los riesgos fotobiológicos identificando ciertas tendencias de clasificación según el método utilizado para realizar el ensayo establecido por la norma UNE-EN 62471. Dado lo anterior, las fuentes de luz LED se deben clasificar como fuentes de uso general, evitando la incertidumbre de qué tipo de ensayo es el apropiado de ejecutar y siendo este el más exigente, por lo general este tipo de fuentes tiende a ser peligrosas en el rango azul del espectro visible dado su composición física para producir luz. No existe un gran peligro en los rangos ultravioleta e infrarrojo, dado una nula o mínima presencia de energía en estas bandas.

Palabras claves: Riesgos Fotobiológicos, Iluminación, Radiaciones ópticas, Fotometría, Daños en la piel, Daño en los ojos.

Abstract

The present project of title exposes the incoherent artificial optical radiations, giving information on these and how they are classified according to their bandwidth in the different existing sub-bands. Optical radiations directly affect the target organs that are the eyes and the skin, and consequently a study is presented for the different damages or diseases that these organs present from the radiation exposure.

In the study of the damages perceived by the target organs, it is specifically detailed which are the bandwidths that affect for the different damages and which is the length of the specific ode that affects them. Identifying how it absorbs and transmits the different wavelengths in the eyes and skin

The limits of exposure to optical radiation are presented, as established by Directive 2006/25 / EC of the European Parliament and of the Council of April 5, 2006, with respect to the limits, each bandwidth is analyzed as appropriate for the different bodies and present damages. Because the wavelengths are absorbed and transmitted differently for the organs, the weighting curves are established, which make exact reference for the different damages mentioned.

After the study, the impact of the study of photobiological risks is identified by identifying certain classification tendencies according to the method used to perform the test established by the UNE-EN 62471 standard. Given the above, the LED light sources must be classify as general use sources, avoiding the uncertainty of which type of test is appropriate to execute and this being the most demanding, usually this type of sources tends to be dangerous in the blue range of the visible spectrum given its physical composition for produce light There is no great danger in the ultraviolet and infrared ranges, given zero or minimal presence of energy in these bands.

Key words: Photobiological Risks, Illumination, Optical Radiation, Photometry, Skin damage, Eye damage.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos	2
1 Radiaciones ópticas	3
1.1 Exposición a radiaciones ópticas.....	3
1.2 Absorción y transmisión de radiación óptica sobre los ojos	6
1.3 Absorción y transmisión de radiación óptica sobre la piel	7
1.4 Criterios de evaluación.....	8
2 Efectos producidos por radiación de fuentes destinadas a la producción de luz visible	11
2.1 Factores de influencia	12
2.2 Daños en los ojos	13
2.3 Daños en la piel.....	17
3 Evaluación de Riesgos Fotobiológicos según la norma UNE-EN 62471.....	20
3.1 Condiciones de medición	20
3.2 Curvas de ponderación	20
3.2.1 Curva de Efectividad Espectral $S(\lambda)$	21
3.2.2 Función de Riesgo por Luz Azul $B(\lambda)$	23
3.2.3 Función de Riesgo Térmico $R(\lambda)$	24
3.3 Límites de exposición	25
3.3.1 Límite de exposición de riesgo UV.....	25
3.3.2 Límite de exposición de riesgo visible e IR.....	27
3.4 Clasificación de lámparas y equipos que usan lámparas	32
3.4.1 Grupo exento RG0	32
3.4.2 Grupo de bajo riesgo RG1	33
3.4.3 Grupo de riesgo moderado RG2.....	33
3.4.4 Grupo de alto riesgo RG3	33
4 Ejemplos prácticos de aplicación	35

4.1 Cálculo de Irradiancia	35
4.1.1 Ejemplo 1.....	35
4.1.2 Ejemplo 2.....	36
4.2 Cálculo de Radiancia	39
4.2.1 Ejemplo 3.....	39
4.3 Clasificación según grupo de riesgo	43
4.3.1 Ejemplo 4.....	44
4.3.2 Ejemplo 5.....	46
Discusión y conclusiones.....	48
Bibliografía	50

Introducción

En nuestra vida diaria, nos encontramos en constante exposición a Radiaciones Ópticas de una amplia variedad de fuentes ya sean de carácter natural o artificial. Existen estudios en los cuales se manifiesta que esta exposición puede producir daños en los órganos diana expuestos a este tipo de radiación; los ojos y la piel. Es debido que este tipo de órganos se encuentran constantemente expuestos a las radiaciones ópticas, a lo anterior existe la necesidad del estudio y determinación de estándares y recomendaciones para prevenir posibles daños, con el objetivo de clasificar las fuentes de luz.

El presente proyecto de título tiene como objetivo el estudio sobre los riesgos fotobiológicos producidos por las fuentes de luz artificiales incoherentes. Cuando se habla de fuentes de luz incoherentes, hace referencia a cualquier fuente de luz que tenga un amplio ancho de banda y no una única longitud de onda, excluyendo todas las fuentes de luz láser e incluyendo las fuentes de luz mediante tecnologías LED.

La radiación óptica está comprendida en el espectro electromagnético y se encuentra en las longitudes de onda que van desde los 100[nm] a los 10.000[nm]. Los órganos diana no están afectados a riesgos en todo el ancho de banda de las radiaciones ópticas y solo reaccionan a longitudes de onda que van desde los 180[nm] a los 3.000[nm], lo anterior se debe a que no existe evidencia científica de riesgos para otras longitudes de onda e incluso la UNE-EN 62471 toma longitudes de onda que van desde los 200[nm] a los 3.000[nm].

Existe una gran cantidad de fuentes de radiación que afectan a nuestros ojos y la piel, la fuente de radiación óptica más antigua de la cual se tiene conocimiento es el sol, principal responsable de la mayor parte de cánceres de piel registrados debido a radiaciones del tipo ultravioleta y que tiene un ancho de banda que abarca todo el espectro a evaluar.

El principal referente para este proyecto es la directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006, en la cual se realiza el estudio de los diferentes daños producidos por las radiaciones ópticas, obteniendo como resultado valores muy específicos de los anchos de banda que reaccionan los órganos diana para las diferentes enfermedades o daños. Debido a el conocimiento específico de cómo reaccionan los ojos y la piel para las diferentes longitudes de onda, se establecen diferentes límites de exposición según el rango de longitudes onda y el daño que puede producir en los diferentes órganos.

El daño de los órganos diana debido a las radiaciones ópticas artificiales, depende de la cantidad de energía que emite la fuente, la distancia de exposición y el tiempo que se está expuesto. Los criterios de evaluación que se utilizan son 3; exposición radiante, irradiancia y radiancia, estos criterios establecen los límites a los cuales un órgano puede estar expuesto para que no se produzca un daño o enfermedad, pero estos límites solo consideran 8 horas de exposición como máximo y no considera la exposición o dosis acumulativa por el paso del tiempo.

Los límites de exposición nacen de la necesidad a evaluar los riesgos a radiaciones que se producen en oficinas, industrias, etc., motivo del cual solo considera 8 horas en la exposición a radiaciones ópticas y no las dosis acumuladas durante el tiempo.

La norma UNE-EN 62471:2006 fue elaborada como norma CIE S 009:2002 por la comisión internacional de iluminación, y se basa en lo publicado por La directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006. El aporte de la norma UNE-EN 62471:2006 es la clasificación de las lámparas y aparatos que utilizan lámparas en base a los límites de exposición, generando 4 grupos de riesgo; grupo exento de riesgo RG0, grupo de bajo riesgo RG1, grupo de riesgo moderado RG2 y grupo de alto riesgo RG3. La clasificación en RG0 hace referencia a que se cumplen todos los límites de exposición, si uno de los límites no se cumple es evaluado en el grupo que le sigue haciendo referencia a los tiempos de exposición. En el caso de que una lámpara o aparato que utiliza lámpara no se clasifique en ninguno de los grupos RG0, RG1 o RG2, este se clasifica en el grupo de alto riesgo RG3 siendo el más peligroso respecto a la emisión de radiaciones ópticas artificiales.

Realizar ensayos o medir estos tipos de riesgo para clasificar las lámparas o aparatos que utilizan lámparas es complicado, se deben tener instrumentos de medida con especificaciones muy puntuales y las condiciones ambientales en las cuales se realizaran los ensayos deben ser controladas en su totalidad para no afectar los resultados de las mediciones.

Objetivos generales

- Identificar y analizar los distintos riesgos fotobiológicos producidos en seres humanos que pueden tener su origen en las fuentes de luz o las luminarias destinadas a producir luz visible.

Objetivos específicos

- Identificar los modos para evaluar el grado de seguridad que presentan las distintas fuentes de luz o luminarias en función de los distintos efectos fotobiológicos que éstas puedan generar en los seres humanos.
- Conocer los diferentes cuerpos normativos internacionales que regulen o clasifiquen los artefactos de iluminación en estos aspectos.
- Establecer los protocolos de ensayo para aplicación de las normas o regulaciones.

1 Radiaciones ópticas

El espectro electromagnético representado en la figura 1-1, tiene tres bandas de lo que se denomina radiación óptica; Los rayos ultravioletas (UV) que abarcan longitudes de onda de 100[nm] a 400[nm]; la luz visible incluye la radiación entre 380[nm] y 780[nm]; y los infrarrojos (IR) consisten en longitudes de onda de 780[nm] a 10.000[nm]. Estas se pueden dividir a su vez en subbandas. La directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006, establece que en el espectro de rayos UV, están los UVC de 100[nm] a 280[nm], UVB de 280[nm] a 315[nm] y UVA de 315[nm] a 400[nm]; el espectro de luz visible normalmente se puede clasificar como longitud de onda corta (azul), media (verde) y larga (rojo); y el espectro de IR contiene IRA de 780[nm] a 1.400[nm], IRB de 1.400[nm] a 3.000[nm] y IRC de 3.000[nm] a 10.000[nm].

Las radiaciones ópticas no poseen suficiente energía para ionizar la materia viva, por lo que están clasificadas como radiaciones no ionizantes. No obstante, la exposición a radiaciones ultravioleta y visible pueden dar lugar a reacciones fotoquímicas, y la absorción de radiación infrarroja origina fundamentalmente calor.

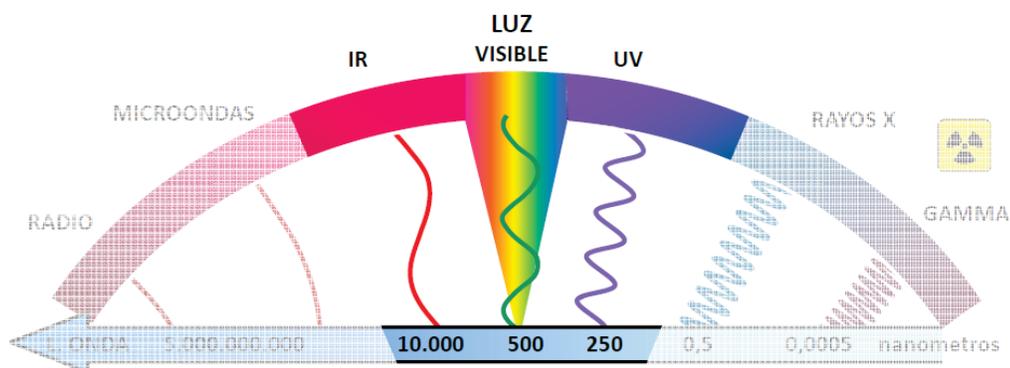


Figura 1-1 Representación de la radiación óptica en el espectro electromagnético [1]

1.1 Exposición a radiaciones ópticas

Las radiaciones ópticas están presentes en muchas actividades, pero no representan un riesgo para la salud en todos los casos. Solamente aquellas fuentes cuya intensidad es elevada, tiene un alto tiempo de exposición y que trabajan con la fuente de emisión sin proteger, pueden presentar un riesgo potencial. Las actividades donde puede existir una exposición más elevada se pueden

englobar en los siguientes grupos: Soldadura de arco eléctrico, lámparas de descarga de baja y alta presión, fuentes incandescentes, fuente solar y fuentes Led.

Soldadura de arco eléctrico

Este tipo de exposición se representa en la figura 1-2 y es característico por su exposición a todo el rango de radiación óptica, El riesgo puede variar en función al tipo de material utilizado para la soldadura y la intensidad de la corriente que produce el arco eléctrico.



Figura 1-2 Soldadura de arco eléctrico [1]

Lámparas de descarga de baja y alta presión

La exposición a radiaciones ópticas depende del tipo de lampara, por ejemplo, las lámparas utilizadas como germicidas representada en la figura 1-3 emiten radiaciones del tipo UVC.



Figura 1-3 Lampara germicida de luz UV [2]

Fuentes incandescentes

Son todas aquellas en las que se alcanza una elevada temperatura exceptuando las lámparas, emitiendo radiación óptica de forma continua en IR y si la temperatura es muy elevada puede

producir radiación UV, un ejemplo de este tipo de radiación es el que se produce en una planta de fundición de metales representado en la figura 1-4.



Figura 1-4 Fuente incandescente, fundición de metales

Fuente Solar

Esta es la fuente más antigua de la que se tiene conocimientos de exposición a radiación óptica, gran parte de la radiación UV es absorbida por la atmosfera. Produce una radiación IR la cual se puede percibir en forma de calor en nuestros cuerpos. En la figura 1-5 se observa cómo es absorbida los diferentes tipos de radiación.

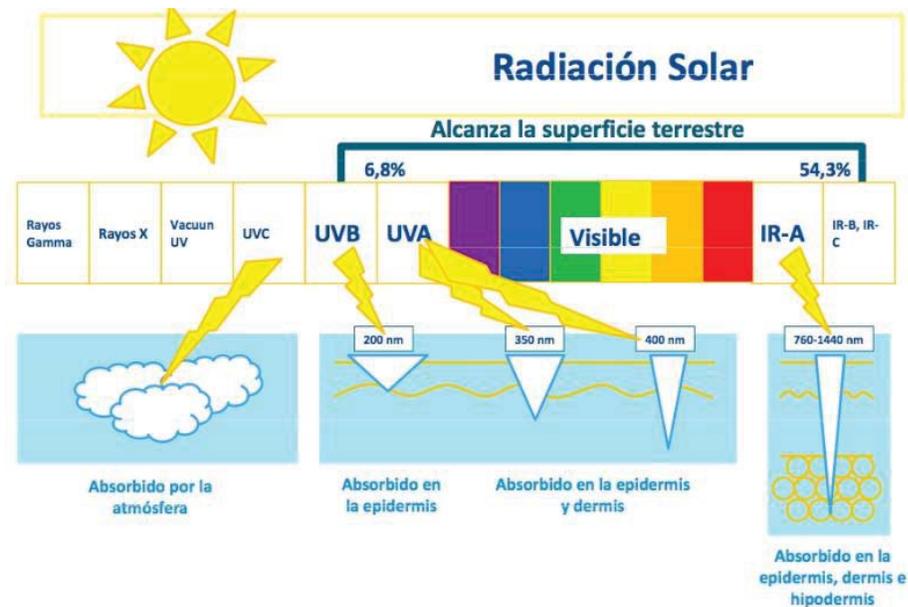


Figura 1-5 Radiación solar que alcanza la superficie terrestre

Fuentes LED

Las fuentes LED representadas en la figura 1-6, son dispositivos emisores de luz basados en semiconductores, debido a su bajo consumo de potencia y eficiencia energética. Durante el año

2017 este tipo de tecnologías tiene una presencia en el mercado de 67% según Anfalum 2018 y tiende al alza.



Figura 1-6 Luminaria con tecnología LED

1.2 Absorción y transmisión de radiación óptica sobre los ojos

La percepción visual se produce cuando la luz incide en la retina, una intrincada estructura de células muy especializadas que forman la capa más interior del globo. Antes de alcanzar la retina, la luz entrante debe penetrar en los medios oculares, los tejidos transparentes y los fluidos que se encuentran entre la parte frontal del ojo y la retina. Los medios oculares, formados por la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo, absorben o transmiten la luz, dependiendo de su longitud de onda.

La mayor parte de los rayos UV (UVC y UVB) son absorbidos por la córnea y el cristalino, originando fotoqueratitis y fotoconjuntivitis. La córnea y el cristalino también bloquean los rayos IR por encima de 980[nm], lo que puede dar origen a cataratas de origen térmico; y el humor vítreo absorbe los rayos IR por encima de los 1.400[nm] que no son absorbidos por el cristalino. El resultado final de la luz filtrada por los medios oculares es que la retina queda expuesta casi exclusivamente a la parte visible del espectro, la cual puede producir lesiones térmicas o fotoquímicas.

En la figura 1-7 se puede observar cómo se comportan los diferentes tipos de radiación, y específicamente como estas son absorbidas por las diferentes partes del ojo humano, en consecuencia, de esto se producen los daños fotobiológicos.

Existe una protección natural del ojo, conocido como mecanismo de aversión, estos son constricción de pupila; movimientos de la cabeza, parpadeo y lagrimeo; interposición de manos. Por ejemplo, cuando se produce un deslumbramiento, se puede apreciar la interposición de manos, movimientos de cabeza y parpadeos. El iris actúa como mecanismo de aversión para la radiación UVB, limitando la penetración de este tipo de radiación en el cristalino.

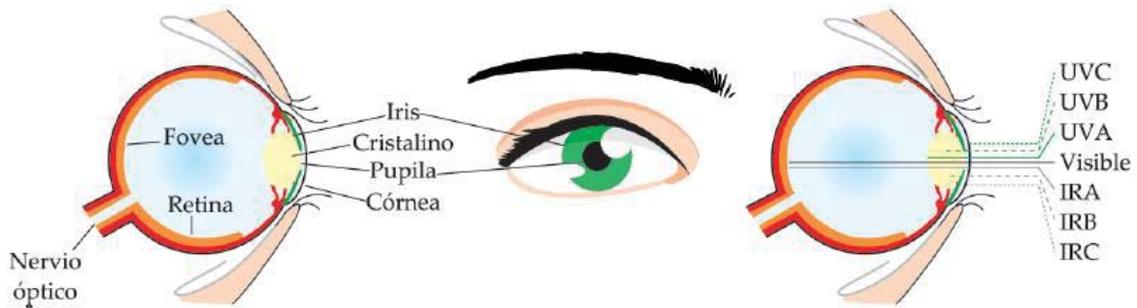


Figura 1-7 Absorción y transmisión de la radiación óptica en los ojos [3]

1.3 Absorción y transmisión de radiación óptica sobre la piel

La radiación UV es uno de los principales factores de riesgo para la mayoría de los cánceres de piel. Esta se encuentra principalmente en la luz solar, aunque las lámparas y cámaras bronceadoras también son fuentes de ella. A una mayor exposición es más alta la probabilidad de producir un cáncer de piel, esto no quiere decir que necesariamente se producirá este tipo de cáncer.

Se estima que la mayor parte de los cánceres de piel son producidos por radiación UVB, ese poder destructivo se le atribuye porque tiene la capacidad de dañar directamente el ADN de las células de nuestra piel y de originar quemaduras de sol.

En la figura 1-8 se observa el comportamiento de los diferentes niveles de radiación absorbidos por la piel, producto de esto, se producen los riesgos fotobiológicos.

Los rayos UVC, no son considerados como causantes de cáncer de piel, esto se debe a que este tipo de radiación no penetra la atmósfera para el caso de la radiación solar representado en la figura 1-5. En el caso que este tipo de radiación sea producido por otro tipo de fuente, esta al entrar en contacto con los átomos de oxígeno, por lo general se transforma en ozono, en el caso más desfavorable desde el punto de vista de la piel, la radiación del tipo UVC es absorbida por el estrato córneo.

La radiación del tipo UVB, penetra el estrato córneo y es absorbida en su totalidad por la epidermis.

Los rayos UVA tienen un papel importante en algunos cánceres de piel, ocasionan el envejecimiento y deterioro de las células de piel y a largo plazo producen las arrugas. Este tipo de radiación penetra el estrato córneo y la epidermis en la piel, finalmente es absorbido en su totalidad en la Dermis.

La radiación visible penetra la piel en el estrato córneo y la epidermis, siendo absorbida en su totalidad en la dermis, a diferencia de la radiación IRA que también penetra sobre la dermis siendo absorbida en su totalidad en la capa subcutánea.

La radiación del tipo IRB e IRC, no tienen la suficiente energía para penetrar en la piel en el estrato córneo, este tipo de radiación es disipada antes de penetrar la piel debido a los diferentes mecanismos de aversión de este órgano. No existe evidencia científica que avale daños en la piel por sobre los 1.400[nm], por seguridad para los casos de estudio se considera hasta los 3.000[nm].

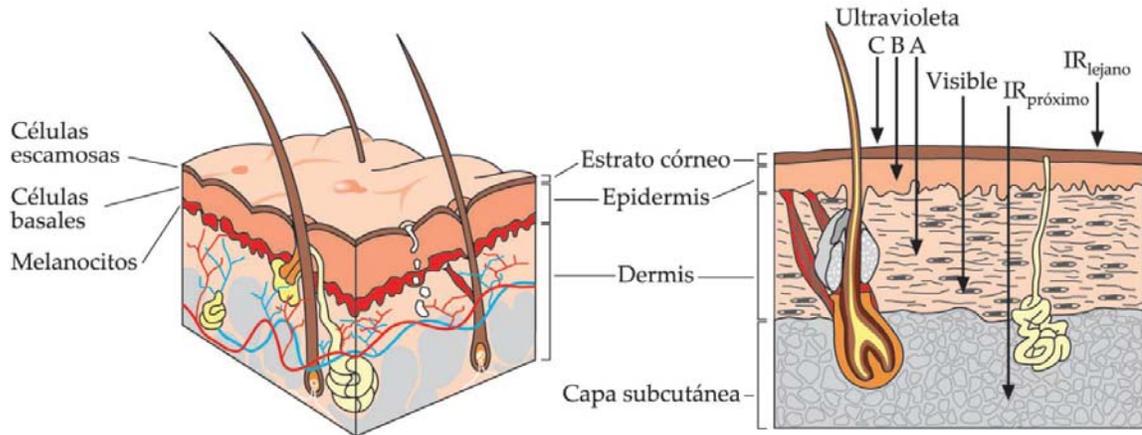


Figura 1-8 Absorción y transmisión de la radiación óptica en la piel [3]

1.4 Criterios de evaluación

Para evaluar los riesgos fotobiológicos, es necesario comparar; niveles, tiempo y distancia de exposición a las radiaciones ópticas. Lo anterior se realiza en conocimiento de la exposición radiante (H), la irradiancia (E) y la radiancia (L) de las diferentes fuentes artificiales incoherentes.

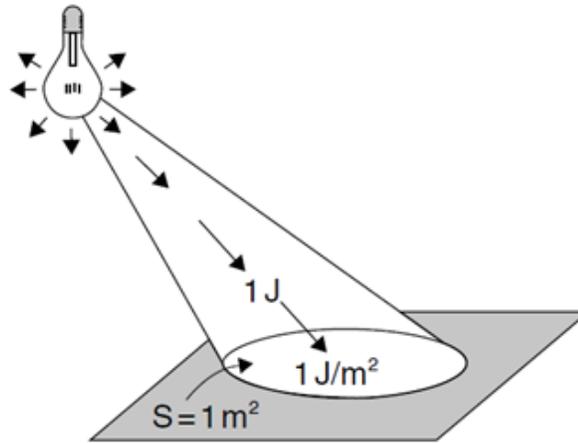
La exposición radiante (H)

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, representado en la figura 1-9. Se calcula como el cociente entre la energía radiante (dQ) que incide sobre un elemento de esa superficie y el área (dA) de ese elemento tal como se representa en la ecuación 1-1.

De forma equivalente, si se trata de una exposición a radiación continua, la exposición radiante se calcula multiplicando la irradiancia E por la duración de la exposición, en segundos. Para exposiciones a fuentes intermitentes, se deberá integrar la irradiancia, E, a lo largo de un intervalo de tiempo determinado (dt) tal como se representa en la ecuación 1-2.

$$H = \frac{dQ}{dA} \quad (1-1) [4]$$

$$H = \int_0^t E \cdot dt \quad (1-2) [4]$$

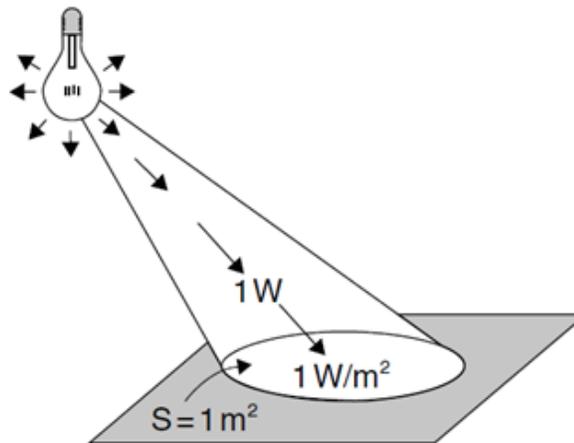
Figura 1-9 Exposición radiante (H), unidad $[J/m^2]$ [4]

La irradiancia o densidad de potencia (E)

Es la potencia radiante que incide, por unidad de área, sobre una superficie, expresada en watts por metro cuadrado (W/m^2), representado en la figura 1-10. Se usa para cuantificar el riesgo potencial por exposición a una fuente de radiación óptica cuya emisión sea continua, generalmente en los rangos del UV e IR y en ciertas condiciones del visible. Se calcula dividiendo el flujo radiante ($d\phi$) incidente en un elemento de superficie (dA), lo anterior se representa en la ecuación 1-3 y 1-4.

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (1-3) [4]$$

$$E = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (1-4) [4]$$

Figura 1-10 Irradiancia (E), unidad $[W/m^2]$ [4]

La radiancia (L)

Indica el grado de concentración de un haz de radiación óptica y se utiliza para evaluar los riesgos del visible e IRA porque determina la cantidad de radiación emitida por una superficie luminosa en la dirección del observador, tal como se representa en la figura 1-11. La radiancia es la magnitud que mejor cuantifica el riesgo en la retina, ya que, debido a que el ángulo sólido de visión del ojo es relativamente pequeño, la cantidad de energía que puede llegar a la retina dependerá en gran medida de la dirección de incidencia. La radiancia se puede calcular como el flujo radiante ($d\phi$) transmitido por un haz que pasa a través de un punto dado y se propaga en un ángulo sólido (dw) que contiene la dirección de observación multiplicado por el área proyectada ($dA \cdot \cos(\theta)$) que corresponde a la proyección del área de la fuente sobre un plano perpendicular a la dirección de observación siendo θ el ángulo plano que forma la dirección de la observación con la normal a la superficie de la fuente, lo anterior se representa en la ecuación 1-5

$$L = \frac{d\phi}{dA \cdot \cos(\theta) \cdot dw} \quad (1-5) [4]$$

$$L = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (1-6) [4]$$

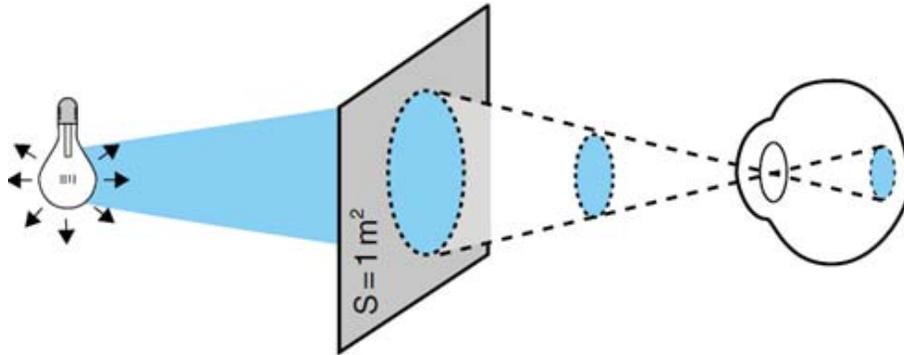


Figura 1-11 Radiancia (L), unidad $[W/sr \cdot m^2]$ [4]

La exposición radiante no considera el tiempo en el que se ha recibido la energía radiante (a diferencia de la irradiancia, que sí implica una limitación temporal de la exposición). Así, la exposición radiante se usa para expresar la dosis y debe ir acompañada del tiempo de exposición. Por ejemplo: una H de $30 [J/m^2]$ para una jornada de 8 horas, permitiría: una $E = 0,002 [W/m^2]$ durante 4 horas o una $E = 0,004 [W/m^2]$ durante 2 horas de dicha jornada laboral.

2 Efectos producidos por radiación de fuentes destinadas a la producción de luz visible

Todos los riesgos evaluados en este capítulo son derivados de fuentes artificiales incoherentes destinadas a la producción de luz visible, los cuales afectan directamente a los órganos diana de las radiaciones ópticas artificiales (los ojos y la piel).

Para los órganos diana existen 2 tipos de efectos directos debido a la radiación óptica, estos son los efectos fotoquímicos y efectos térmicos representados por la tabla 2-1 en la cual se indica en que longitudes de onda este es aplicado.

Tabla 2-1 Efectos presentes debido a radiaciones ópticas [3]

Radiación óptica		Longitud de onda [nm]		Efecto presente	
Banda	Subbanda	Límite inferior	Límite superior	Fotoquímico	Térmico
Ultravioleta	UVC	100	280	X	
	UVB	280	315	X	
	UVA	315	400	X	
Visible	VISIBLE	380	780	X	X
Infrarrojo	IRA	780	1.400		X
	IRB	1.400	3.000		X
	IRC	3.000	10.000		X

Los efectos fotoquímicos se producen cuando la radiación óptica tiene la suficiente energía para inducir una reacción química y esto tiene relación entre el daño y la dosis recibida (exposición radiante). La radiación ultravioleta y la radiación visible, principalmente la luz azul, interaccionan por mecanismos fotoquímicos.

Los efectos térmicos producen quemaduras por una elevación parcial o total de la temperatura en un órgano expuesto, en otras palabras, es la capacidad del tejido para disipar el calor.

2.1 Factores de influencia

Es conocido que no todas las personas tienen la misma reacción a la exposición de radiaciones ópticas, es por esto por lo que se establecen categorías para agrupar a las personas y establecer el tipo de daño que esta puede estar expuesta. Es debido a este hecho, que el Dr. Thomas B. Fitzpatrick médico dermatólogo y profesor de la Universidad de Harvard en Estados Unidos en el año 1975 definió una escala o tabla para clasificar a las personas y la sensibilidad de esta para diferentes radiaciones según sus aspectos físicos, como color de piel, color de ojos y color de cabello. Esta tabla está representada en la tabla 2-2.

Tabla 2-2 Clasificación de las personas según su fototipo

Fototipo	Piel	Cabello	Ojos	Pecas	Quemadura
I	Muy clara	Pelirrojo/ Rubio	Azules/ Verdes	Numerosas	Siempre
II	Clara	Rubio/ Castaño claro	Azules/ Verdes/ Marrón claro	Numerosas	Muy fácil
III	Ligeramente morena	Castaño	Verdes/ Marrones	Algunas	Fácil
IV	Morena	Castaño oscuro	Marrones	No	Ocasionalmente
V	Muy morena	Moreno/ Negro	Marrones oscuros	No	Raramente
VI	Negra	Negro	Marrones oscuros/ Negros	No	Nunca se quema

La tabla 2-2, es un claro método para identificar las características de las personas en forma física y como estas reaccionaran a la exposición de radiaciones ópticas. Otro factor de importancia en el análisis de los daños producidos por radiaciones ópticas es el tiempo y distancia de exposición, esta variable depende de cada persona que se expone a este tipo de radiaciones y solo puede ser controlado con recomendaciones de tiempos de exposición según la distancia de la fuente y la persona expuesta.

Dado los fototipos, las personas expuestas a las diferentes radiaciones ópticas ya sean artificiales o naturales, pueden prevenir los daños producidas por estas en condiciones más eficientes, ya que tiene conocimiento de cómo se comparten y reaccionaran sus órganos.

En la figura 2-1 se muestra la representación gráfica de los diferentes fototipos, con esta imagen es mas claro visualizar y clasificar a las personas en las diferentes categorías de sensibilidad a las radiaciones ópticas.



Figura 2-1 Representación gráfica de fototipos

2.2 Daños en los ojos

Los ojos detectan y focalizan la luz hasta la retina. Para protegerse frente a fuentes visibles excesivamente brillantes disponen de mecanismos de aversión (constricción de la pupila, parpadeo, lagrimeo, etc.) y el tiempo medio de estas respuestas es de 0,25 segundos.

El daño producido en los ojos depende directamente de tiempos de exposición, distancia y cantidad de energía. En función de la longitud de onda, la radiación óptica se absorbe en los diferentes tejidos del ojo. La córnea y la conjuntiva absorben la mayoría de las longitudes de onda por debajo de los 300nm, el cristalino absorbe IRB, IRC e UVA y la retina el visible y el IRA.

Dado lo anterior, los diferentes daños o enfermedades en los ojos se pueden clasificar según el ancho de banda en que encuentra presente la radiación óptica (UV – Visible – IR) e incluso se puede especificar de forma precisa cual es la longitud de onda en que este órgano es más sensible obteniendo como resultado, importante información para futuros filtros de las diferentes fuentes de luz previniendo enfermedades oculares.

Catarata por ultravioleta

Para este daño en específico, el sitio de los ojos afectado es el lente del cristalino, tiene un rango espectral en el ultravioleta de tipo A (UVA), específicamente de 290nm a 325nm (posiblemente llegue hasta los 400nm) y el peak del espectro de acción se encuentra aproximadamente en los 305nm (Pitts, 1977) para la catarata aguda.

Este daño se produce debido a una reacción fotoquímica, produciendo un enturbiamiento de la visión perceptible del lente tal como se muestra en la figura 2-2, tiene un efecto retardado generalmente en 4 horas o más, tras la exposición.

Las cataratas por ultravioleta se pueden clasificar según se grado de gravedad o penetración tal como se muestra en la figura 2-2. La clasificación va desde un grado normal, el que no tiene daño o presencia alguna de cataratas por ultravioleta, hasta un grado severo cuando esta se posiciona sobre la pupila. Mientras la catarata se mantenga en el iris y no abarque parte de la pupila se considera moderado y no se produce enturbiamiento de la visión.

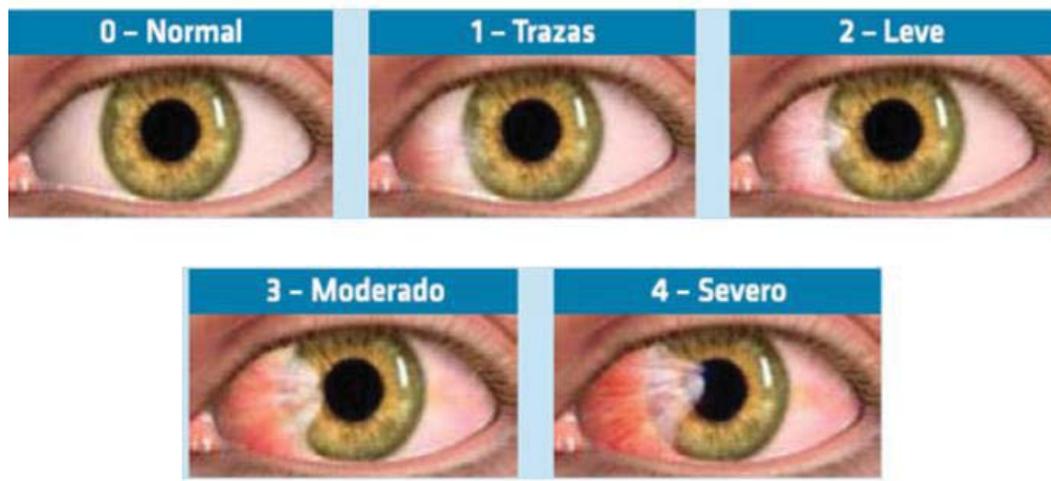


Figura 2-2 Grado de gravedad de cataratas por ultravioleta

Catarata por infrarrojo

El sitio del ojo afectado es el lente del cristalino, tiene un rango espectral en el infrarrojo del tipo A (IRA) en todo su ancho de banda, posiblemente hasta los 3.000nm, pero solo existen estudios, y no evidencia clara de que se produzcan daños. El peak del espectro de acción es desconocido, en algunos textos se establece la posibilidad de que se encuentre entre los 900nm y 1.000nm, pero no existe una convención o demostración clara para un ancho de banda menor.

Generalmente se ha presumido que este daño es de origen térmico, aunque existen evidencias que sugieren una posible reacción fotoquímica cuyos detalles no se comprenden. La lente puede ser calentada por la irradiación directa (Vogt, 1919) o por calentamiento por conducción desde el iris calentado (Goldman, 1983).

Este daño es producido por exposición acumulativa, generalmente tras varios años y consiste en el enturbiamiento perceptible del lente representado en la figura 2-3



Figura 2-3 Catarata por infrarrojo

Fotoqueratitis

El sitio del ojo afectado es la córnea, tiene un rango espectral en la región ultravioleta, específicamente en los 200nm a 320nm. El peak del espectro de acción es aproximadamente en los 270nm (Pitts, 1971), en esta longitud de onda se produce la máxima reacción o sensibilidad a las radiaciones ópticas para este tipo de año.

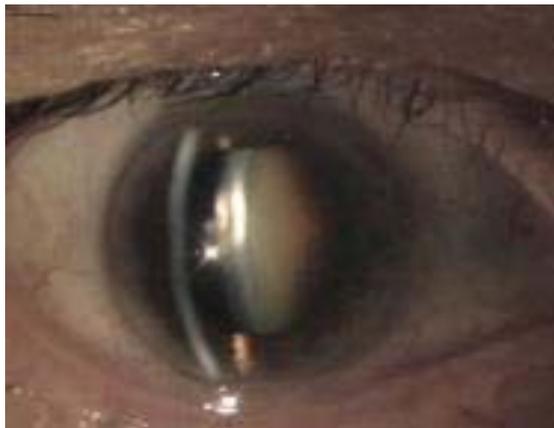


Figura 2-4 Fotoqueratitis

Este daño es producido por una reacción fotoquímica que inicia una cadena de reacciones biológicas, el principal síntoma es sentir arena en el ojo, blefarospasmo (contracción repentina, violenta e involuntaria de los músculos del párpado). Otros síntomas que se producen son: dolor intenso, irritación, fotofobia, y lagrimeo. Generalmente la reacción perceptible retardada se encuentra entre 4 y 12 horas tras la exposición. En la figura 2-4 se representa el aspecto que toma el ojo para este daño, en la cual se muestra una reacción inflamatoria aguda y enrojecimiento del ojo.

Fotorretinitis

También conocido por daño retiniano por la luz azul, el sitio afectado del ojo es directamente la retina en un rango espectral de 400nm a 700nm. Se tiene conocimiento de que para un ojo fájico (lente del cristalino intacta) se tiene una reacción principalmente en el ancho de banda de 400nm a 500nm y para un ojo afático (sin cristalino) se encuentra en un ancho de banda de 310nm a 700nm. El peak de espectro de acción aproximadamente está en los 445nm (Ham, 1976), produciéndose la máxima sensibilidad para esta longitud de onda y en consecuencia el máximo daño.



Figura 2-5 Fotorretinitis o daño por luz azul

Este daño representado por la figura 2-5, es producido por reacción fotoquímica y su síntoma es una mancha ciega, o escotoma donde se forma la imagen del arco brillante en la retina. Se consideran exposiciones prolongadas para tiempos mayores a los 10 segundos, para lo que se tendrá una reacción retardada de 12 horas tras la exposición.

Debido a que este efecto se produce en el rango visible de las radiaciones ópticas y en consecuencia siempre estamos afectados a él, se realizan muchos estudios científicos para prevenir este tipo de daño, principalmente evitar fuentes de luz artificiales con longitudes de onda entre los 440nm y 450nm o en su defecto con un bajo contenido de energía.

Daño térmico retiniano

El sitio del ojo afectado es la retina y coroides en un rango espectral que abarca desde el visible al infrarrojo tipo A (IRA) en las radiaciones ópticas, específicamente de 400nm a 1.400nm con un peak de espectro de acción de 500nm (Ham, 1966), teniendo para esta longitud de onda la mayor sensibilidad para este efecto. Este mecanismo de daño es dominante sobre el daño retiniano fotoquímico en exposiciones cortas (menos de 10 segundos).

Este daño es producido por una reacción termoquímica que desnaturaliza las proteínas y otros componentes de las células con la destrucción del tejido biológico. Su síntoma es una mancha ciega o escotoma donde se formó la imagen de la fuente brillante en la retina.

2.3 Daños en la piel

La penetración de la radiación óptica en la piel depende de la longitud de onda, regidas por los procesos de reflexión, difusión, absorción y transmisión de las radiaciones. Los daños percibidos en este órgano, tiene diferentes dependencias, generalizando se habla de tiempo, distancia de exposición respecto de la fuente y dosis o cantidad de energía entregada por la fuente.

Eritema por ultravioleta

Este es el principal riesgo de este órgano, el cual se encuentra presenta en su mayoría en la banda ultravioleta de las radiaciones ópticas, el cual se encuentra en un rango espectral de 180nm a 420nm específicamente. Este efecto tiene un peak en 295nm (Urbach, 1968; Anders, 1995), siendo la piel más sensible para esta longitud de onda específicamente para este daño. La reacción perceptible retardada generalmente esta entre 4 y 12 horas tras la exposición (trnscurrido este tiempo, el daño es más apreciable a la visión humana). Este daño se produce debido a una reacción fotoquímica que inicia una cadena de reacciones biológicas y su síntoma es el de una quemadura, presentada por enrojecimiento de la piel en los sitios expuestos a la radiación representado por la figura 2-6.



Figura 2-6 Eritema por ultravioleta

Fotocarcinogénesis [<http://sisbib.unmsm.edu.pe/>]

También conocido como cáncer de piel, está relacionada con un efecto acumulativo de la dosis dependiente de las radiaciones ópticas, principalmente de radiaciones ultravioleta en todo su ancho de banda y las condiciones físicas de cada persona (fototipos).

La fotocarcinogénesis es consecuencia de la radiación UVB y UVA que provocan mutaciones del ADN a lo cual se asocia a un defecto de la inmunidad y alteración de los mecanismos de reparación de la piel, en la figura 2-7 se representan los principales factores.

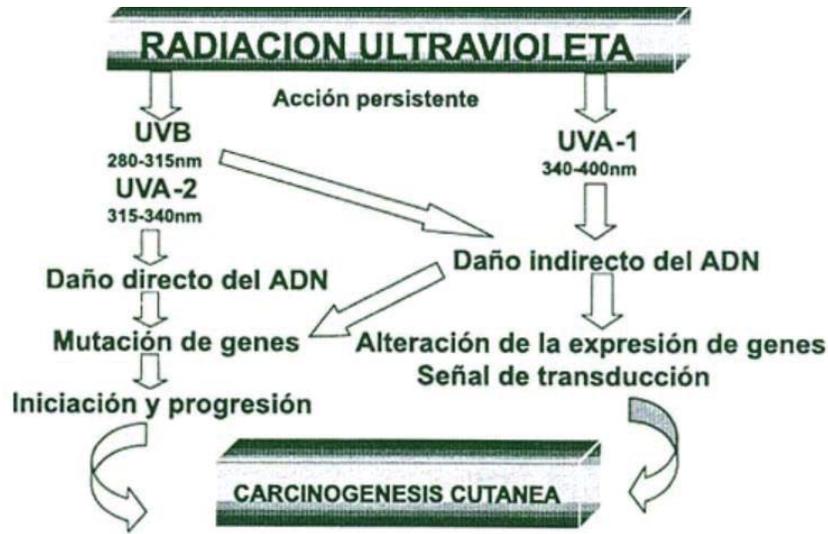


Figura 2-7 Principales factores de la carcinogénesis

El cáncer de piel debido a la exposición a radiaciones ópticas artificiales no tiene un efecto directo tal como se muestra en la figura 2-7 para radiaciones UVA con longitudes de onda de 340nm a 400nm, pero si aumenta la probabilidad de adquirir este tipo de daño o enfermedad.

Fotoenvejecimiento [http://sisbib.unmsm.edu.pe/]

Este término comprende los cambios clínicos y microscópicos de la piel foto expuesta crónicamente. Tiene fenómenos propios, clínicos e histológicos que permiten diferenciarlo del envejecimiento fisiológico. Clínicamente se encuentran arrugas superficiales y profundas, surcos, piel engrosada, manchas pigmentarias, coloración amarillenta o cetrina, laxitud, telangiectasias. Además, en el contexto de una piel muy fotodañada usualmente se agregan lesiones premalignas y malignas.

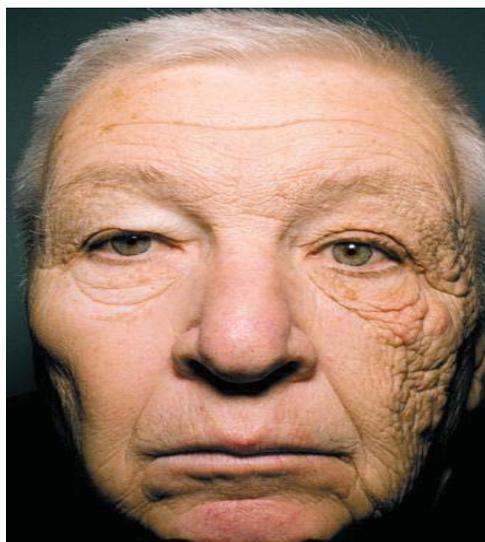


Figura 2-8 Efecto del fotoenvejecimiento

Histológicamente, el sello del fotoenvejecimiento está dado por la elastosis de la dermis debido a un proceso degenerativo de la fibra elástica propio del daño por radiación UV mostrado en la figura 2-8. La ausencia de súper óxido dismutasas de la dermis permite que la radiación UV genere radicales libres que dañan directamente fibras elásticas y colágenas y la matriz extracelular dérmica. La reserva biológica protectora individual frente al sol se pierde con los años.

3 Evaluación de Riesgos Fotobiológicos según la norma UNE-EN 62471

La UNE-EN 62471 es la norma española idéntica a la norma internacional IEC 62471 sobre seguridad fotobiológica de lámparas y aparatos que utilizan lámparas, indicando métodos de medición y clasificación según grupos de riesgo a radiaciones ópticas artificiales.

Define dos criterios diferentes para determinar la distancia de visualización o medición, las fuentes de luz utilizadas en la iluminación en general deben ser evaluadas a la distancia correspondiente a una iluminancia de 500 lx y otros tipos de fuentes de luz deberían evaluarse a una distancia fija de 200mm. Para los componentes LED no existe ninguna ambigüedad en la distancia, la UNE-EN 62471 requiere que se utilice una distancia de 200mm. La aplicación de la técnica de medición de la UNE-EN 62471 a 200 mm conduce a la clasificación RG2 (riesgo moderado) para algunos LED azules de alta potencia y los LED blancos fríos.

El concepto distancia de seguridad será lo más lógico al comunicar a instaladores, usuarios, y público en general. La distancia de seguridad de un producto SSL sería la distancia mínima en la que el grupo de riesgo por luz azul no supera el RG1.

3.1 Condiciones de medición

3.2 Curvas de ponderación

Las curvas de ponderación biológica, llamadas también curvas de ponderación espectral son curvas experimentales que permiten reproducir la respuesta humana a cada efecto adverso, lo anterior en consecuencia de la absorción y transmisión de las diferentes longitudes de onda en las radiaciones ópticas, ya que no todas penetran de forma uniforme.

Para poder aplicar cualquier curva de ponderación biológica, es imprescindible conocer la distribución espectral de la fuente radiante, ya que los factores de corrección (pesos ponderados) dependen de la longitud de onda.

3.2.1 Curva de Efectividad Espectral $S(\lambda)$

La curva $S(\lambda)$ o de efectividad espectral se aplica para radiaciones ópticas en la banda del ultravioleta, específicamente en longitudes que van de 180nm a 400nm (para el caso específico de la UNE-ES 62471, se evalúa desde los 200nm a los 400nm), se ha obtenido como resultado del estudio experimental de los efectos agudos y crónicos (fotoqueratitis y eritema) sobre los ojos y la piel. En la tabla 3-1, se indica el grado de penetración para las diferentes longitudes de onda y en la figura 3-1 su gráfico equivalente.

Dentro de la banda de la radiación UV, la máxima efectividad espectral tiene lugar en una longitud de onda de 270 nm, con un factor igual a 1; para el resto de las longitudes de onda los factores de ponderación disminuyen progresivamente, alcanzando valores próximos a cero en el UVA. Dicho de otra manera: las longitudes de onda críticas para producir daños en la piel y los ojos corresponden a las regiones UVC y UVB (180 - 315 nm), siendo nula la efectividad de la banda UVA.

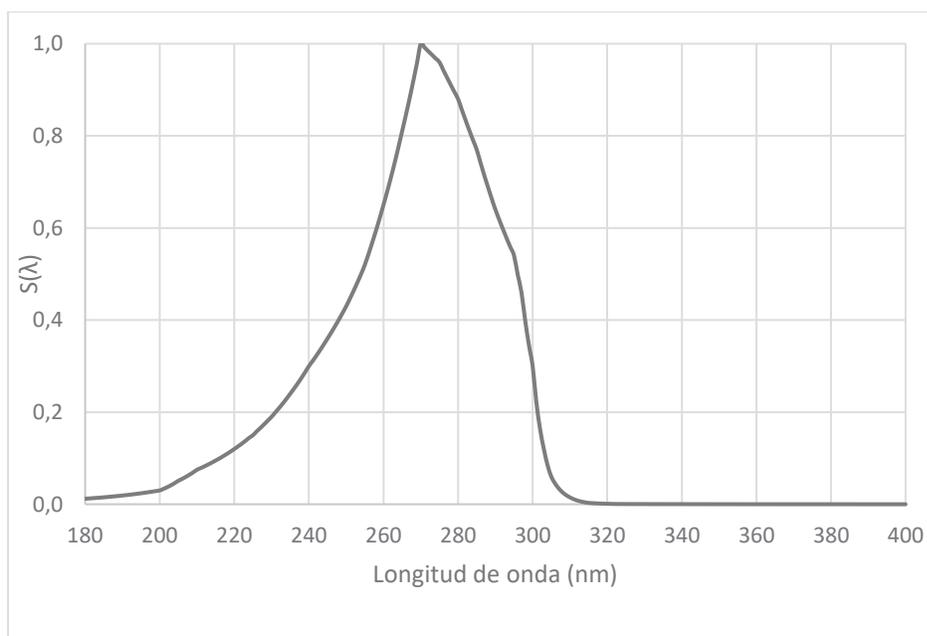


Figura 3-1 Curva de efectividad espectral $S(\lambda)$

La curva de efectividad espectral $S(\lambda)$, es aplicada para evaluar específicamente los riesgos actínicos ultravioleta de la piel y los ojos. De la figura 3-1 se puede observar que ya desde longitudes de onda mayores a 320[nm], el daño o penetración de las radiaciones ópticas es casi nulo para este tipo de evaluaciones, pero por seguridad y en consideración de que la ponderación no es nula, igual se deben evaluar para todo el ancho de banda.

Tabla 3-1 Valores de efectividad espectral $S(\lambda)$ [3]

λ [nm]	$S(\lambda)$										
180	0,0120	217	0,1043	254	0,5000	291	0,618600	328	0,000440	365	0,000110
181	0,0126	218	0,1093	255	0,5200	292	0,598000	329	0,000425	366	0,000106
182	0,0132	219	0,1145	256	0,5437	293	0,578000	330	0,000410	367	0,000103
183	0,0138	220	0,1200	257	0,5685	294	0,558700	331	0,000396	368	0,000099
184	0,0144	221	0,1257	258	0,5945	295	0,540000	332	0,000383	369	0,000096
185	0,0151	222	0,1316	259	0,6216	296	0,498400	333	0,000370	370	0,000093
186	0,0158	223	0,1378	260	0,6500	297	0,460000	334	0,000355	371	0,000090
187	0,0166	224	0,1444	261	0,6792	298	0,398900	335	0,000340	372	0,000086
188	0,0173	225	0,1500	262	0,7098	299	0,345900	336	0,000327	373	0,000083
189	0,0181	226	0,1583	263	0,7417	300	0,300000	337	0,000315	374	0,000080
190	0,0190	227	0,1658	264	0,7751	301	0,221000	338	0,000303	375	0,000077
191	0,0199	228	0,1737	265	0,8100	302	0,162900	339	0,000291	376	0,000074
192	0,0208	229	0,1819	266	0,8449	303	0,120000	340	0,000280	377	0,000072
193	0,0218	230	0,1900	267	0,8812	304	0,084900	341	0,000271	378	0,000069
194	0,0228	231	0,1995	268	0,9192	305	0,060000	342	0,000263	379	0,000066
195	0,0239	232	0,2089	269	0,9587	306	0,045400	343	0,000255	380	0,000064
196	0,0250	233	0,2188	270	1,0000	307	0,034400	344	0,000248	381	0,000062
197	0,0262	234	0,2292	271	0,9919	308	0,026000	345	0,000240	382	0,000059
198	0,0274	235	0,2400	272	0,9838	309	0,019700	346	0,000231	383	0,000057
199	0,0287	236	0,2510	273	0,9758	310	0,015000	347	0,000223	384	0,000055
200	0,0300	237	0,2624	274	0,9679	311	0,011100	348	0,000215	385	0,000053
201	0,0334	238	0,2744	275	0,9600	312	0,008100	349	0,000207	386	0,000051
202	0,0371	239	0,2869	276	0,9434	313	0,006000	350	0,000200	387	0,000049
203	0,0412	240	0,3000	277	0,9272	314	0,004200	351	0,000191	388	0,000047
204	0,0459	241	0,3111	278	0,9112	315	0,003000	352	0,000183	389	0,000046
205	0,0510	242	0,3227	279	0,8954	316	0,002400	353	0,000175	390	0,000044
206	0,0551	243	0,3347	280	0,8800	317	0,002000	354	0,000167	391	0,000042
207	0,0595	244	0,3471	281	0,8568	318	0,001600	355	0,000160	392	0,000041
208	0,0643	245	0,3600	282	0,8342	319	0,001200	356	0,000153	393	0,000039
209	0,0694	246	0,3730	283	0,8122	320	0,001000	357	0,000147	394	0,000037
210	0,0750	247	0,3865	284	0,7908	321	0,000819	358	0,000141	395	0,000036
211	0,0786	248	0,4005	285	0,7700	322	0,000670	359	0,000136	396	0,000035
212	0,0824	249	0,4150	286	0,7420	323	0,000540	360	0,000130	397	0,000033
213	0,0864	250	0,4300	287	0,7151	324	0,000520	361	0,000126	398	0,000032
214	0,0906	251	0,4465	288	0,6891	325	0,000500	362	0,000122	399	0,000031
215	0,0950	252	0,4637	289	0,6641	326	0,000479	363	0,000118	400	0,000030
216	0,0995	253	0,4815	290	0,6400	327	0,000459	364	0,000114		

3.2.2 Función de Riesgo por Luz Azul $B(\lambda)$

La curva $B(\lambda)$ o de riesgo fotoquímico para la radiación visible se evalúa en longitudes de onda que van desde los 300[nm] a los 700[nm] y tiene su máximo efecto o penetración en los órganos diana a los 440[nm]. Esta curva es utilizada para evaluar los riesgos por luz en todo el espectro visible.

Tabla 3-2 Valores de riesgos por luz azul $B(\lambda)$ [3]

$\lambda(\text{nm})$	$B(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$B(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$B(\lambda)$	$\lambda(\text{nm})$	$B(\lambda)$
300	0,010	435	1,00	495	0,160	555	0,008
380	0,010	440	1,00	500	0,100	560	0,006
385	0,013	445	0,97	505	0,079	565	0,005
390	0,025	450	0,94	510	0,063	570	0,004
395	0,050	455	0,90	515	0,050	575	0,003
400	0,100	460	0,80	520	0,040	580	0,003
405	0,200	465	0,70	525	0,032	585	0,002
410	0,400	470	0,62	530	0,025	590	0,002
415	0,800	475	0,55	535	0,020	595	0,001
420	0,900	480	0,45	540	0,016	600	0,001
425	0,950	485	0,32	545	0,013	700	0,001
430	0,980	490	0,22	550	0,010		

El intervalo de radiación de la luz azul (435 - 445 nm) es el más perjudicial para la retina, por su alto contenido de energía y máxima penetración, por eso esta curva de ponderación es conocida como “función de riesgo por luz azul”. Los factores de ponderación de la curva $B(\lambda)$ se recogen en la tabla 3-2 y de forma gráfica en la figura 3-2 en la cual se observa que para longitudes de onda desde los 300[nm] a los 380[nm] y 550[nm] a 700[nm] la efectividad de las radiaciones es casi nula.

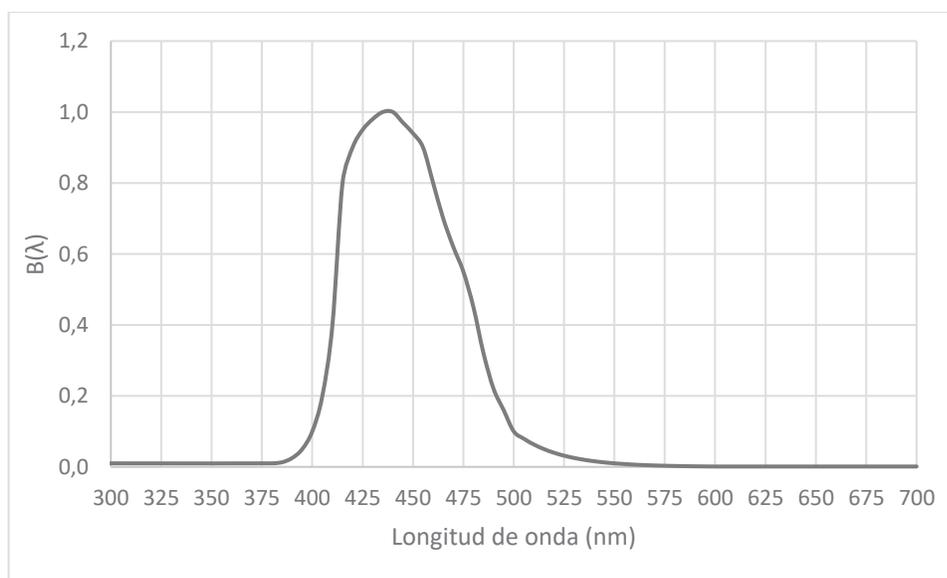


Figura 3-2 Función de riesgo por luz azul $B(\lambda)$

3.2.3 Función de Riesgo Térmico $R(\lambda)$

La curva $R(\lambda)$ o de riesgo térmico para la radiación visible e IRA que van desde longitudes de onda de los 380[nm] a los 1.400[nm], recoge los valores de la efectividad espectral para las quemaduras en la retina. A diferencia de las curvas de ponderación anteriores vistas en la sección 3.2.1 y 3.2.2, la mayoría de los factores de ponderación de $R(\lambda)$ son superiores a la unidad. Sus valores riesgos se muestran en la tabla 3-3 y se grafican en la figura 3-3.

Tabla 3-3 Valores de riesgo térmico $R(\lambda)$ [3]

λ (nm)	$R(\lambda)$								
380	0,10	490	2,2000	795	0,6457	905	0,3890	1.015	0,2344
385	0,13	495	1,6000	800	0,6310	910	0,3802	1.020	0,2291
390	0,25	500	1,0000	805	0,6166	915	0,3715	1.025	0,2239
395	0,50	700	1,0000	810	0,6026	920	0,3631	1.030	0,2188
400	1,00	705	0,9772	815	0,5888	925	0,3548	1.035	0,2138
405	2,00	710	0,9550	820	0,5754	930	0,3467	1.040	0,2089
410	4,00	715	0,9333	825	0,5623	935	0,3388	1.045	0,2042
415	8,00	720	0,9120	830	0,5495	940	0,3311	1.050	0,1995
420	9,00	725	0,8913	835	0,5370	945	0,3236	1.150	0,2000
425	9,50	730	0,8710	840	0,5248	950	0,3162	1.155	0,1589
430	9,80	735	0,8511	845	0,5129	955	0,3090	1.160	0,1262
435	10,00	740	0,8318	850	0,5012	960	0,3020	1.165	0,1002
440	10,00	745	0,8128	855	0,4898	965	0,2951	1.170	0,0796
445	9,70	750	0,7943	860	0,4786	970	0,2884	1.175	0,0632
450	9,40	755	0,7762	865	0,4677	975	0,2818	1.180	0,0502
455	9,00	760	0,7586	870	0,4571	980	0,2754	1.185	0,0399
460	8,00	765	0,7413	875	0,4467	985	0,2692	1.190	0,0317
465	7,00	770	0,7244	880	0,4365	990	0,2630	1.195	0,0252
470	6,20	775	0,7079	885	0,4266	995	0,2570	1.200	0,0200
475	5,50	780	0,6918	890	0,4169	1.000	0,2512	1.400	0,0200
480	4,50	785	0,6761	895	0,4074	1.005	0,2455		
485	3,20	790	0,6607	900	0,3981	1.010	0,2399		

La máxima reacción de la función de riesgo térmico está en las longitudes de onda de 435[nm] y 440[nm] llegando a un factor de 10. Observando la figura 3-3 es claro que para un ancho de banda desde los 400[nm] a los 500[nm] la reacción es considerable con respecto a las otras longitudes de onda evaluadas, ya para longitudes de onda superiores a los 700[nm] la función de riesgo térmico es inferior a la unidad y para longitudes de onda superiores a los 1.170[nm] el efecto es casi nulo.

La función de riesgo térmico es utilizada para evaluar el riesgo térmico retiniano, incluso para estímulos débiles para longitudes de onda que van desde los 780[nm] a los 1.400[nm].

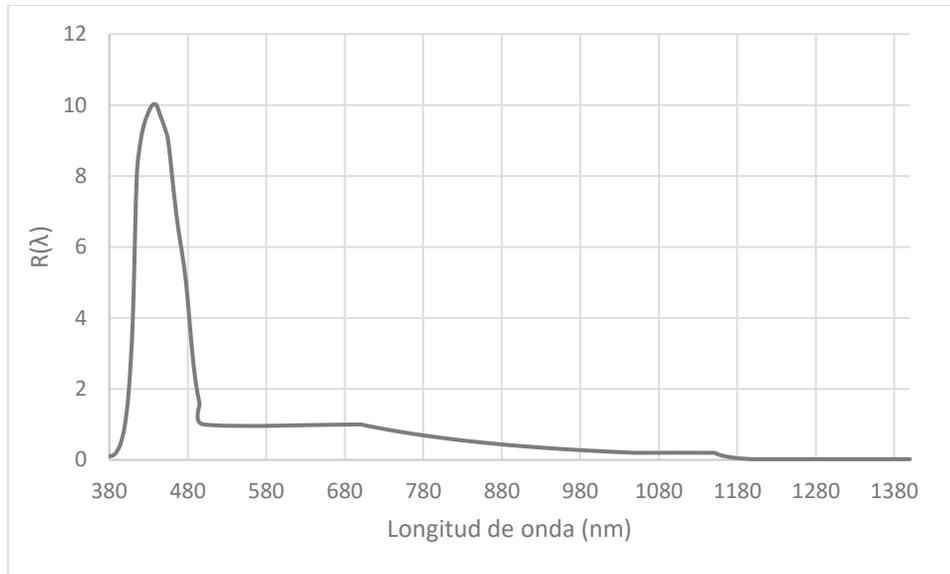


Figura 3-3 Función de riesgo térmico R(λ)

3.3 Límites de exposición

El aspecto más novedoso de las radiaciones ópticas artificiales es el establecimiento de los límites de la exposición, basados directamente en los efectos sobre la salud comprobados y en consideraciones biológicas. El cumplimiento de estos límites garantizará que las personas expuestas a fuentes artificiales de radiación óptica estén protegidos contra todos los efectos adversos para la salud que se conocen. Para evaluar los riesgos y establecer los límites de exposición, se utilizará un ancho de banda que va desde los 180[nm] a los 3.000[nm] en base a lo que se establece en la directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 debido a que no existe evidencia de riesgos para los órganos diana en otras longitudes de onda. En el caso de la norma UNE-EN 62471 utiliza un ancho de banda que va desde los 200[nm] a los 3.000[nm].

3.3.1 Límite de exposición de riesgo UV

Se proponen dos valores límite de exposición, uno para la banda de la radiación del UV con longitudes de onda que van desde los 180[nm] a los 400[nm], el cual es calculado utilizando la ecuación 3-1 y tiene como objetivo evaluar la exposición radiante efectiva (H_s) y llevando como nombre “riesgo actínico de UV en piel y ojos”. El otro valor para evaluar es únicamente para la región UVA (desde los 315[nm] a los 400[nm]) representado por la ecuación 3-4 y se evalúa la irradiancia total (H_{UVA}), su nombre es “riesgo por UVA para los ojos”. Ambos están definidos en términos de exposición radiante $H[J/m^2]$ y referidos a 8 horas.

$$H_s = \int_0^t \int_{180}^{400} E_\lambda(\lambda, t) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt = 30[J/m^2] \quad (3-1) [5]$$

Para el caso de la exposición radiante efectiva (H_s), afecta los ojos en la córnea, conjuntiva y cristalino, obteniéndose como daños la fotoqueratitis, conjuntivitis y cataratas. En la piel se producen daños de eritemas, elastosis y cáncer de piel.

La ecuación 3-1 puede sustituirse por la ecuación 3-2 en conjunto a la ecuación 3-3, con el uso de valores discretos.

$$H_s = E_s \cdot \Delta t \tag{3-2} [5]$$

$$E_s = \sum_{180}^{400} E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta \lambda \tag{3-3} [5]$$

Al aplicar la ponderación $S(\lambda)$, la parte de la emisión que corresponde a la región del UVA queda anulada, porque los factores de ponderación por encima de 315 nm están muy próximos a cero.

Por consiguiente, a pesar de que la exposición radiante efectiva está definida en todo el intervalo UV, en la práctica bastaría con aplicarlo sólo entre 180 - 315 nm. Debido a esta razón, se define la evaluación de la irradiancia total (H_{UVA}), exclusivo para el UVA, que no incluye ponderación espectral. Es importante destacar que, para ambos casos, el tipo de riesgo a evaluar es independiente.

$$H_{UVA} = \int_0^t \int_{315}^{400} E_\lambda(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt = 10^4 [J/m^2] \tag{3-4} [5]$$

Para el caso de la irradiancia total por radiación ultravioleta del tipo A (H_{UVA}), el órgano afectado son los ojos específicamente en el cristalino, produciéndose como daño cataractogénesis.

Tabla 3-4 Tiempos e irradiancia máximos para H_s

Tiempo máximo exposición (s)	$E_s (W/m^2)$
28.800	0,001
14.400	0,002
7.200	0,004
3.600	0,008
1.800	0,017
900	0,033
600	0,050
300	0,100
60	0,500
30	1,000
10	3,000
1	30,000
0,5	60,000
0,1	300,000

La ecuación 3-4, en las mismas condiciones que la ecuación 3-1 puede sustituirse por la ecuación 3-5 en conjunto a la ecuación 3-6, con el uso de valores discretos.

$$H_{UVA} = E_{UVA} \cdot \Delta t \quad (3-5) [5]$$

$$E_{UVA} = \sum_{315}^{400} E_{\lambda} \cdot \Delta \lambda \quad (3-6) [5]$$

Teniendo en cuenta que la energía es el producto de la potencia por el tiempo de exposición, es posible calcular desde la exposición radiante efectiva (ecuación 3-1) representado en la tabla 3-4 y la irradiancia total (ecuación 3-4) representado en la tabla 3-5, los tiempos de exposición máximos a partir de las ecuaciones 3-7 y 3-8 respectivamente.

$$t_{max} \leq \frac{30[J/m^2]}{E_{s,max}[W/m^2]} \quad (3-7) [3]$$

$$t_{max} = \frac{10.000[J/m^2]}{E_{UVA,max}[W/m^2]} \quad (3-8) [3]$$

Al igual que ocurre con otros valores límite expresados en forma de dosis diarias (ruido, vibraciones o agentes químicos), a medida que disminuye el tiempo de exposición, el valor de la irradiancia máxima permitida aumenta.

Tabla 3-5 Tiempo e irradiancia máximo para H_{UVA}

Tiempo máximo exposición (s)	$E_{UVA}(W/m^2)$
28800	0,35
14400	0,69
7200	1,39
3600	2,78
1800	5,56
900	11,11
600	16,67
300	33,33
60	166,67
30	333,00
10	1.000,00
1	10.000,00
0,5	20.000,00
0,1	100.000,00

3.3.2 Límite de exposición de riesgo visible e IR

La aplicación de estos límites de exposición es bastante más compleja, ya que, además de las curvas de ponderación, entra en juego la geometría de visión que determina la cantidad de radiación que llega a la retina.

La exposición radiante (H_{piel}) es calculada con la ecuación 3-7 entre las longitudes de onda que van desde los 380[nm] a los 3.000[nm] y tiene como nombre “riesgo térmico para la piel”. Este límite está destinado a proteger frente a las quemaduras que la radiación visible e infrarroja provocada en la piel.

$$H_{piel} = \int_0^t \int_{380}^{3.000} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot d\lambda \cdot dt = 20.000 \cdot t^{0,25} \quad t < 10[s] \quad (3-9) [5]$$

La aplicación práctica de los límites de exposición radiante es muy poco probable ya que el valor establecido es tan elevado que no es habitual encontrar fuentes de exposición a radiaciones ópticas con irradiancias tan alta y está definido para tiempos de exposición muy pequeños. En el caso de que la exposición supere los 10 segundos, la comisión internacional de protección de radiación no ionizante (ICNIRP) recomienda considerar el riesgo de estrés térmico. El órgano que es afectado por este tipo de riesgo es la piel, y el daño que se produce es quemadura.

La ecuación 3-9 puede sustituirse por la ecuación 3-10 en conjunto a la ecuación 3-11, con el uso de valores discretos.

$$H_{piel} = E_{piel} \cdot \Delta t \quad (3-10) [5]$$

$$E_{piel} = \sum_{380}^{3.000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (3-11) [5]$$

Otro límite para evaluar es la irradiancia total (E_{IR}) o también conocida por su nombre “riesgo IR para los ojos” representado por la ecuación 3-12 que se encuentra en longitudes de onda que van desde los 780[nm] a los 3.000[nm] correspondientes a IRA e IRB. Ya que este límite está definido como irradiancia, la unidad de evaluación será $E[W/m^2]$.

$$E_{IR} = \int_{780}^{3.000} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3-12) [5]$$

Este tipo de daño, establece sus límites de exposición en referencia al tiempo de exposición;

$$E_{IR} = 18.000 \cdot t^{0,75} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad t \leq 1.000[s] [5]$$

$$E_{IR} = 100 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad t > 1.000[s] [5]$$

Establecer límites para evaluar la irradiancia total por IRA e IRB, tiene como objetivo proteger al cristalino y a la córnea de lesiones térmicas derivadas de la exposición a las radiaciones ópticas, dado lo anterior, los daños producidos cataratas y quemadura de la córnea.

Los valores límite dependen únicamente de la duración de la exposición. Se expresan en forma de irradiancias totales (sin ponderar) para la banda del IR. 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, han servido de base para el establecimiento de los valores límite de exposición.

La ecuación 3-12 puede sustituirse por la ecuación 3-13, con el uso de valores discretos.

$$E_{IR} = \sum_{780}^{3.000} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda \quad (3-13) [5]$$

La evaluación de la radiancia efectiva por luz azul (L_B) correspondiente a la ecuación 3-14 tiene como nombre “riesgo por luz azul” y la irradiancia efectiva por luz azul (E_B) tiene como nombre “riesgo de luz azul por fuente pequeña” correspondiente a la ecuación 3-15 para un ancho de banda que va desde los 300[nm] a los 700[nm], se explican de forma conjunta porque protegen frente al mismo riesgo: las quemaduras en la retina.

Cuando hay estímulo visual, el ojo está protegido por las respuestas naturales de aversión (constricción de la pupila) y el ángulo subtendido disminuye.

$$L_B = \int_{300}^{700} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3-14) [5]$$

Para el caso de la radiancia efectiva por luz azul (L_B), se utilizan 2 criterios de evaluación que tienen relación con el tiempo;

$$L_B = \frac{10^6}{t} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad t \leq 10.000[s] [5]$$

$$L_B = 100 \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad t > 10.000[s] [5]$$

La irradiancia efectiva por luz azul (E_B), se utiliza cuando el ángulo de apertura del observador con respecto la fuente es pequeño ($\alpha < 0,0011$ [rad]).

$$E_B = \int_{300}^{700} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3-15) [5]$$

Bajo la misma línea considerada para la L_B , en E_B se utilizan 2 criterios de evaluación que tienen relación con el tiempo;

$$E_B = \frac{100}{t} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad t \leq 10.000[s] [5]$$

$$E_B = 0,01 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad t > 10.000[s] [5]$$

Tanto para la irradiancia y radiancia efectiva por luz azul, tienen un efecto directo en la retina de los ojos, produciendo como daño la fotorretinitis.

La ecuación 3-14 y 3-15 pueden sustituirse por la ecuación 3-16 y 3-17 respectivamente, con el uso de valores discretos.

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (3-16) [5]$$

$$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (3-17) [5]$$

Los límites de exposición para radiancias efectivas con ancho de banda que van desde los 380[nm] a los 1.400[nm] se le entrega el nombre de “riesgo térmico retiniano” el cual es evaluado por la ecuación 3-18.

$$L_R = \int_{380}^{1.400} L_\lambda(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3-18) [5]$$

El riesgo térmico retiniano (L_R) es ponderado por la curva de función de riesgo térmico $R(\lambda)$, a diferencia de todos los otros riesgos, la curva $R(\lambda)$ tiene valores sobre la unidad, aumentando la radiancia efectiva con respecto a la radiancia evaluada. Para este tipo de daño, se consideran 2 condiciones para la evaluación, el tiempo de exposición y el ángulo del campo de visión;

$$L_R = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad t > 10[s] [5]$$

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad 10[\mu s] < t < 10[s] [5]$$

$$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad t < 10[\mu s] [5]$$

$$C_\alpha = 1,7[mrad] \quad \alpha < 1,7[mrad] [5]$$

$$C_\alpha = \alpha [mrad] \quad 1,7[mrad] < \alpha < 100[mrad] [5]$$

$$C_\alpha = 100[mrad] \quad \alpha > 100[mrad] [5]$$

Para el caso específico de que el estímulo visual sea débil, el daño térmico retiniano se evalúa para longitudes de onda que van desde los 780[nm] a los 1.400[nm], en la ecuación 3-19 se representa la radiancia la exposición radiante para un estímulo débil (L_{IR}).

$$L_{IR} = \int_{780}^{1.400} L_\lambda(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3-19) [5]$$

$$L_{IR} = \frac{6 \cdot 10^6}{C_\alpha} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad t > 10[s] [5]$$

$$L_R = \frac{5 \cdot 10^7}{C_\alpha \cdot t^{0,25}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad 10[\mu s] < t < 10[s] [5]$$

$$L_R = \frac{8,89 \cdot 10^8}{C_\alpha} \left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right] \quad t < 10[\mu s] [5]$$

$$C_\alpha = 11[mrad] \quad \alpha < 11[mrad] [5]$$

$$C_\alpha = \alpha [mrad] \quad 11[mrad] < \alpha < 100[mrad] [5]$$

$$C_\alpha = 100[mrad] \quad \alpha > 100[mrad] [5]$$

El daño producido por este tipo de exposición radiante es directamente en la retina del ojo, produciendo quemaduras en ella.

La ecuación 3-18 y 3-19 pueden sustituirse por la ecuación 3-20 respectivamente dependiendo del ancho de banda, con el uso de valores discretos.

$$L_R = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda \tag{3-20} [5]$$

Todos los valores límites presentados, corresponden a lo establecido por la directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006, los cuales toman longitudes de onda desde los 180[nm] a los 3.000[nm] y la norma UNE-EN 62471 se basa en estos valores pero para longitudes de onda que van desde los 200[nm] a los 3.000[nm].

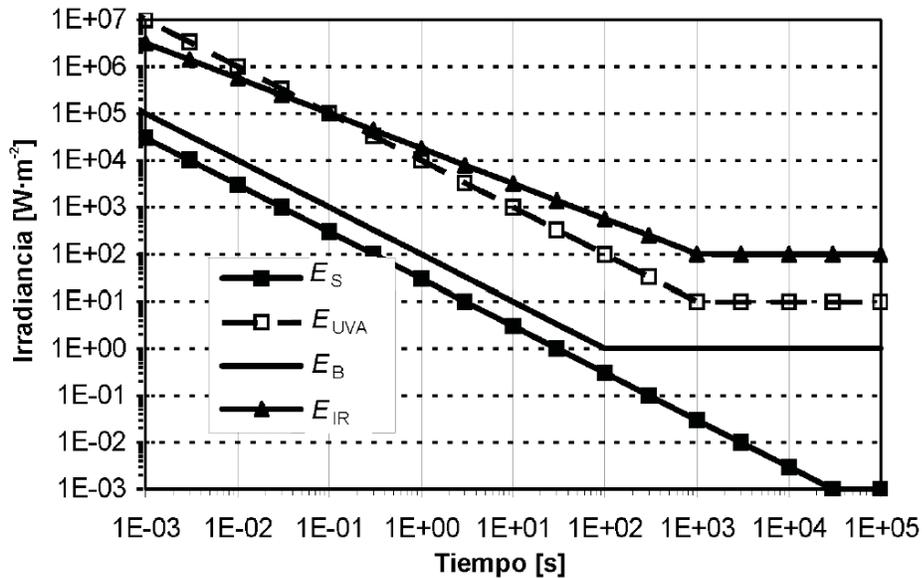


Figura 3-4 Curvas de irradiancia para los diferentes riesgos, valores logarítmicos [6]

En la figura 3-4 se muestra una gráfica de los valores logarítmicos de los diferentes riesgos para la exposición a irradiancias de las radiaciones ópticas. Para los diferentes casos de irradiancias, estas son independientes del tiempo cuando alcanzan ciertos valores, por ejemplo, para el caso de E_S , es independiente del tiempo de exposición para valores superiores a los 30.000 con una irradiancia máxima de $E_S = 0,001[W/m^2]$.

Para la figura 3-5 se gráfica los valores logarítmicos de la radiancia correspondiente a los riesgos evaluados a consecuencia de exposiciones a radiaciones ópticas. Estas cumplen las mismas condiciones de la irradiancia y pasan a ser independientes del tiempo para cierto valor, por ejemplo, para $L_B = 100[W/m^2 \cdot sr]$ es independiente del tiempo para valores superiores a los 1.000[s], es importante destacar que estos valores se obtienen de los valores logarítmicos tanto de irradiancia como de radiancia.

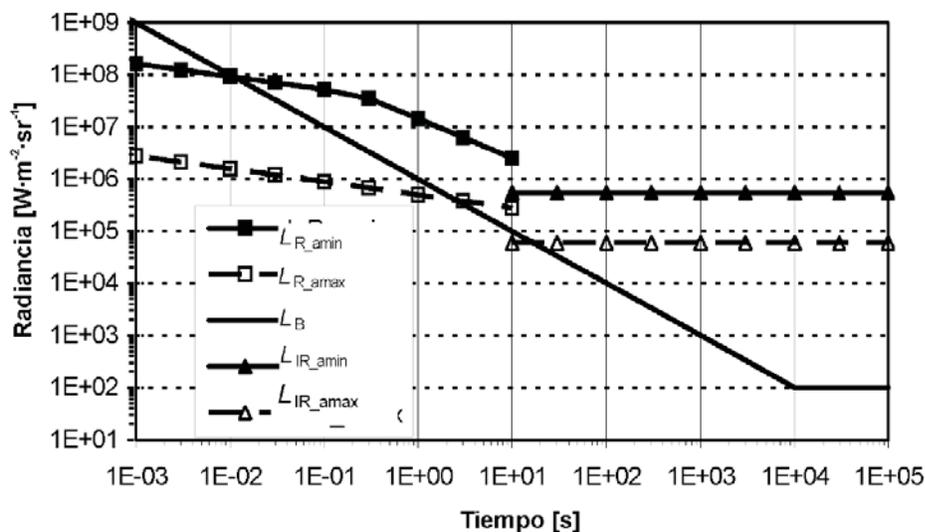


Figura 3-5 Curva de radiancia para los diferentes riesgos, valores logarítmicos [6]

3.4 Clasificación de lámparas y equipos que usan lámparas

La norma UNE-EN 62471 sobre la seguridad fotobiológica de lámparas y los aparatos que las utilizan, especifica un sistema de clasificación de las fuentes de luz en diferentes grupos de riesgo. La norma incluye todos los riesgos fotobiológicos que puedan afectar la piel y los ojos (riesgos térmicos y fotoquímicos) de las longitudes de onda ultravioletas hasta las infrarrojas. Se definen cuatro grupos de riesgos.

3.4.1 Grupo exento RG0

Son lámparas que no representan ningún riesgo fotobiológico y estas deben coincidir con las siguientes restricciones:

- Un riesgo actínido ultravioleta en 30.000 s de exposición
- Un riesgo por UV próximo en 1000 s
- Un riesgo retiniano por luz azul en 10.000 s
- Un riesgo térmico retiniano en 10s
- Un riesgo para el ojo por radiación infrarroja en 1000s

Todos los niveles mencionados se deben cumplir en su totalidad, basta con que una de estas condiciones no se cumpla, para que la clasificación de la lámpara o equipo que utilizan lámparas pase al grupo de clasificación superior.

3.4.2 Grupo de bajo riesgo RG1

Son lámparas que no representan un riesgo debido a las limitaciones normales de funcionamiento en la exposición y se encuentran afectadas a las siguientes restricciones:

- Un riesgo actínido ultravioleta en 10.000 s de exposición
- Un riesgo por UV próximo en 300 s
- Un riesgo retiniano por luz azul en 100 s
- Un riesgo térmico retiniano en 10s
- Un riesgo para el ojo por radiación infrarroja en 100s

Todos los niveles mencionados se deben cumplir en su totalidad, basta con que una de estas condiciones no se cumpla, para que la clasificación de la lámpara o equipo que utilizan lámparas pase al grupo de clasificación superior.

3.4.3 Grupo de riesgo moderado RG2

Son lámparas que no representan un peligro por la respuesta de aversión (Reacción instintiva de un órgano para protegerse de un estímulo muy intenso) a las fuentes brillantes de luz o malestar térmico y cumplen las siguientes restricciones:

- Un riesgo actínido ultravioleta inferior a 10.000 s de exposición
- Un riesgo por UV próximo en 100 s
- Un riesgo retiniano por luz azul en 0.25s
- Un riesgo térmico retiniano en 0.25s
- Un riesgo para el ojo por radiación infrarroja en 10s

Todos los niveles mencionados se deben cumplir en su totalidad, basta con que una de estas condiciones no se cumpla, para que la clasificación de la lámpara o equipo que utilizan lámparas pase al grupo de clasificación superior.

3.4.4 Grupo de alto riesgo RG3

Son lámparas que representan un peligro incluso en una exposición breve o momentánea, las lámparas que exceden los límites del grupo 2 de riesgo están en el grupo 3. Cuanta más radiación emita en las longitudes de onda entre 400 – 500 nm mayor será el riesgo en el azul.

Solo las lámparas y los sistemas de lámparas clasificadas como grupo exento de riesgo para daños en la piel (evaluados a la distancia que produce 500 lux) deberían usarse en aplicaciones de iluminación general.

La clasificación de los riesgos fotobiológicos en los diferentes grupos se realiza en base a estudios para 8 horas de exposición y distancias relativamente cercanas, para el caso.

En la figura 3-6, se muestra un resumen realizado por la norma UNE-EN 62471 de los límites de emisión para los diferentes grupos de riesgos.

Tabla 3-6 Límites de emisión para los diferentes grupos de riesgos

Riesgo	Símbolo	Límite de emisión			Unidades
		RG0	RG1	RG2	
Actínico UV	E_S	0,001	0,003	0,030	W/m^2
UV cercano	E_{UVA}	10,000	33,000	100,000	W/m^2
Luz azul	L_B	100,000	10000,000	4000000,000	$W/m^2 \cdot sr$
Luz azul, fuente pequeña	E_B	1,000	1,000	400,000	W/m^2
Térmico retiniano	L_R	28000/a	28000/a	71000/a	$W/m^2 \cdot sr$
Térmico retiniano, estímulo débil	L_{IR}	6000/a	6000/a	6000/a	$W/m^2 \cdot sr$
Radiación, IR	E_{IR}	100,000	570,000	3200,000	W/m^2

4 Ejemplos prácticos de aplicación

Para aplicar los criterios y límites de exposición descritos en el capítulo 3 de este proyecto de título, es necesario manejar con claridad cuáles son los métodos de cálculo de los diferentes criterios de evaluación, como son aplicados en casos prácticos de medición y finalmente la clasificación de estos.

4.1 Cálculo de Irradiancia

4.1.1 Ejemplo 1

Para este ejemplo, se considera que el espectro de una fuente continua tiene un rango comprendido entre 265[nm] y 280[nm] tal como se muestra en la figura 4-1. Para su análisis, la emisión se descompone en cuatro longitudes de onda. Los datos se pueden obtener del fabricante o a partir de una medición.

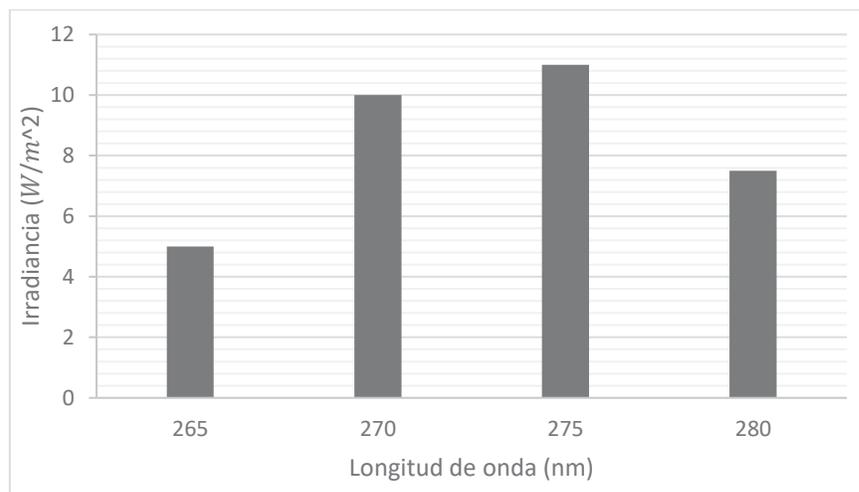


Figura 4-1 Espectro de emisión de irradiancia para una fuente de luz artificial, ejemplo 1

Utilizando la ecuación 1-4, se puede reconocer los siguientes términos $\Delta\lambda = 5[nm]$; $\lambda_1 = 265[nm]$; $\lambda_2 = 280[nm]$. Reemplazando se obtiene como resultado:

$$E = \sum_{265}^{280} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda = (5 + 10 + 11 + 7,5) \cdot (5) = 167,5[W/m^2]$$

Para el caso descrito anterior, ahora se realiza un cálculo de la ponderación espectral utilizando la curva de efectividad espectral $S(\lambda)$ obteniendo la exposición radiante efectiva (H_s) que corresponde al riesgo actínico de UV en piel y ojos. Se obtienen los valores de $S(\lambda)$ para cada longitud de onda desde la tabla 3-1, de lo que se obtiene:

$$S(265) = 0,81$$

$$S(270) = 1$$

$$S(275) = 0,96$$

$$S(280) = 0,88$$

Utilizando la ecuación 3-3 para un tiempo de exposición continuo y reemplazando:

$$E_s = \sum_{265}^{280} E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda = \{(5 \cdot 0,81) + (10 \cdot 1) + (11 \cdot 0,96) + (7,5 \cdot 0,88)\} \cdot (5) = 156,05[W/m^2]$$

Es importante notar que la irradiancia ponderada para el riesgo actínico UV en piel y ojos, siempre es menor a la irradiancia sin ponderar. El gráfico correspondiente al espectro de emisión ponderado se observa en la figura 4-2.

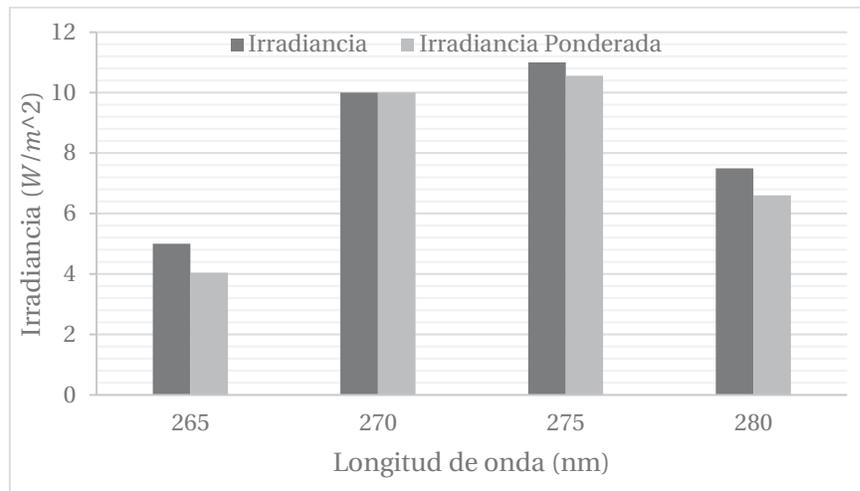


Figura 4-2 Espectro de emisión de irradiancia para una fuente de luz artificial ponderado por $S(\lambda)$, ejemplo 1

4.1.2 Ejemplo 2

Para este ejemplo, se utilizará el espectro de una fuente correspondiente a la figura 4-3. El ancho de banda de emisión se encuentra desde los 265[nm] a los 325[nm] y el tiempo de exposición es de 2 horas.

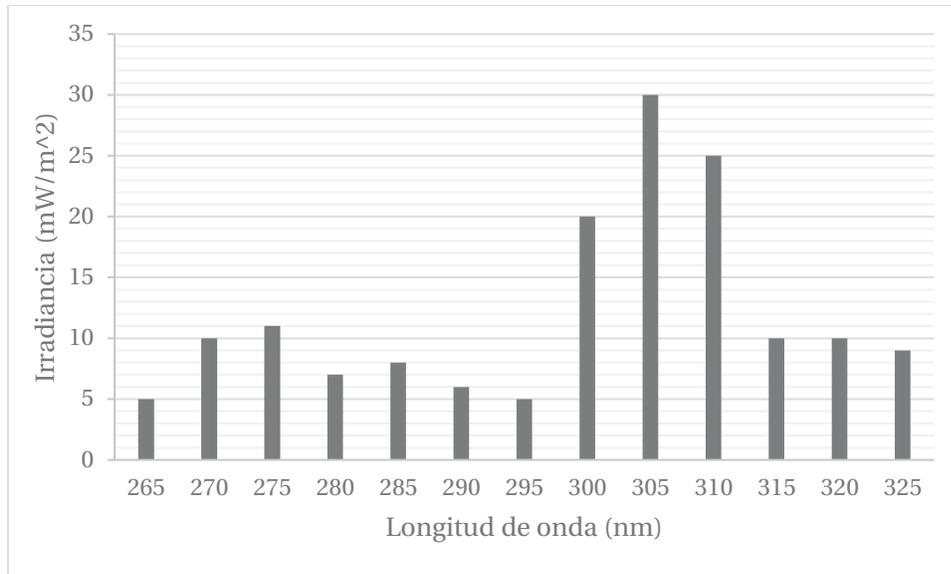


Figura 4-3 Espectro de emisión de irradiancia para una fuente de luz artificial, ejemplo 2

En la tabla 4-1 se muestran los diferentes datos para el cálculo de la irradiancia total, según la ecuación 1-4.

Tabla 4-1 Tabla resumen para el cálculo de la irradiancia de las diferentes longitudes de onda, ejemplo 2

$\lambda(\text{nm})$	E_{λ}	$\Delta\lambda$	$E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$
265	5	5	25
270	10	5	50
275	11	5	55
280	7	5	35
285	8	5	40
290	6	5	30
295	5	5	25
300	20	5	100
305	30	5	150
310	25	5	125
315	10	5	50
320	10	5	50
325	9	5	45

Realizando el cálculo de la irradiancia se obtiene como resultado:

$$E = \sum_{265}^{325} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda = 780 [\text{mW}/\text{m}^2]$$

Para continuar con el estudio, se debe realizar el cálculo de la irradiancia ponderada, en la tabla 4-2 se muestra sus valores y en la figura 4-4 se puede comparar la irradiancia original de la fuente con la irradiancia ponderada.

Tabla 4-2 Tabla resumen para el cálculo de la irradiancia ponderada para las diferentes longitudes de onda ponderado, ejemplo 2

$S(\lambda)$	$E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda$
0,8100	20,00
1,0000	50,00
0,9600	53,00
0,8800	31,00
0,7700	31,00
0,6400	19,00
0,5400	14,00
0,3000	30,00
0,0600	9,00
0,0150	1,88
0,0030	0,15
0,0010	0,50
0,0005	0,02

Realizando el cálculo de la irradiancia ponderada con la ecuación 3-3 se obtiene como resultado:

$$E_s = \sum_{265}^{325} E_\lambda \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 259,55[mW/m^2]$$

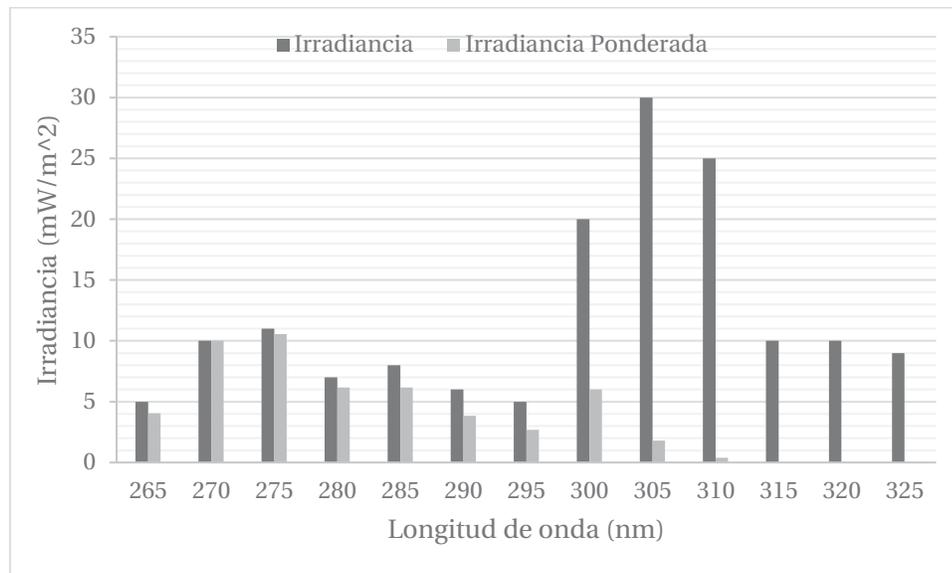


Figura 4-4 Espectro de emisión de irradiancia para una fuente de luz artificial ponderado por $S(\lambda)$ de la fuente, ejemplo 2

Ya conocido el valor de E_s , se puede realizar el cálculo de H_s con la ecuación 3-2 para incluir el tiempo de exposición. El tiempo de exposición es de 2 horas (7.200 segundos).

$$H_s = E_s \cdot \Delta t = 258[mW/m^2] \cdot 7.200[s] = 1,86 \cdot 10^3 [J/m^2]$$

El valor de H_s es mucho mayor a los límites establecidos en el capítulo 3 que para el caso estudiado es de $H_{s,max} = 30 [J/m^2]$. Otro método que se puede utilizar es el índice de riesgo para el H_s calculado.

$$I_{riesgo} = \frac{H_s}{H_{s,max}} = \frac{1,86 \cdot 10^3}{30} > 1$$

En consecuencia, de superar el valor de 1 en el índice de riesgo, la lampara no cumple con el valor límite de exposición para el riesgo actínico de UV para el ojo y piel.

Si se realiza el cálculo de la H_{UVA} para determinar si cumple con los valores límites para este riesgo. En primer lugar, se calcula el E_{UVA} con la ecuación 3-6 de lo que se obtiene:

$$E_{UVA} = \sum_{315}^{325} E_{\lambda} \cdot \Delta\lambda = 145 [mW/m^2]$$

Ya con el E_{UVA} se puede obtener el H_{UVA} utilizando la ecuación 3-5:

$$H_{UVA} = E_{UVA} \cdot \Delta t = 145 [mW/m^2] \cdot 7.200 [s] = 1,044 \cdot 10^3 [J/m^2]$$

El valor de H_{UVA} es menor a los límites establecidos en el capítulo 3 que para el caso estudiado es de $H_{UVA,max} = 10.000 [J/m^2]$. Otro método que se puede utilizar es el índice de riesgo para el H_{UVA} calculado.

$$I_{riesgo} = \frac{H_{UVA}}{H_{UVA,max}} = \frac{1,04 \cdot 10^3}{10.000} < 1$$

Debido a que el índice de riesgo es inferior a 1, se cumple que la exposición radiante se encuentra dentro los límites de exposición.

4.2 Cálculo de Radiancia

4.2.1 Ejemplo 3

Para este ejemplo, se utilizará el espectro de una fuente correspondiente a la figura 4-5. El ancho de banda de emisión se encuentra desde los 390[nm] a los 450[nm], el tiempo de exposición es de 2 horas equivalente a 7.200 segundos y el ángulo subtendido de visión es de 17[mrad] equivalente a 0,97° aproximadamente.

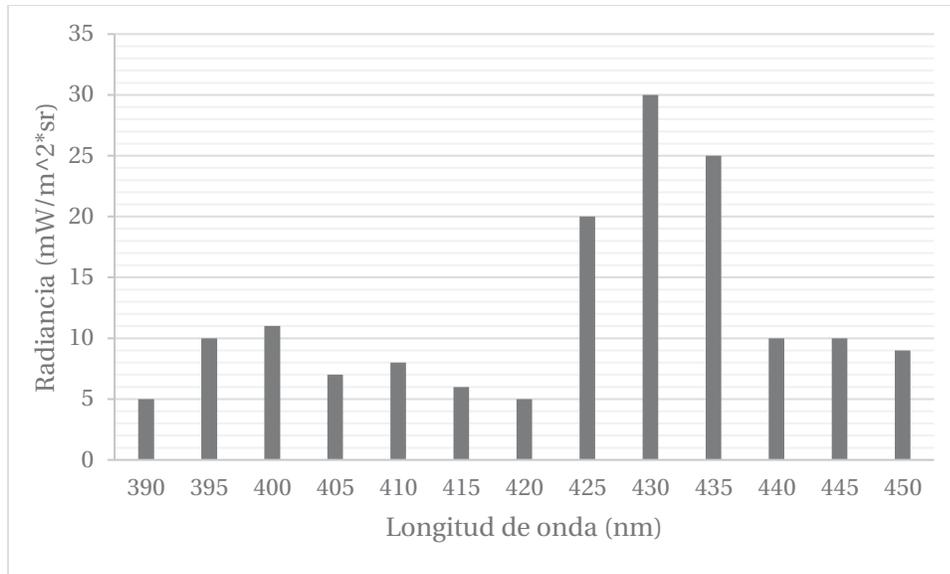


Figura 4-5 Espectro de emisión radiancia para una fuente de luz artificial, ejemplo 3

En la tabla 4-3 se muestran los diferentes datos para el cálculo de la radiancia total (L), según la ecuación 1-6.

Tabla 4-3 Tabla resumen para el cálculo de radiancia para las diferentes longitudes de onda, ejemplo 3

λ (nm)	L_λ	$\Delta\lambda$	$L_\lambda \cdot \Delta\lambda$
390	5	5	25
395	10	5	50
400	11	5	55
405	7	5	35
410	8	5	40
415	6	5	30
420	5	5	25
425	20	5	100
430	30	5	150
435	25	5	125
440	10	5	50
445	10	5	50
450	9	5	45

Realizando el cálculo de la radiancia se obtiene como resultado:

$$L = \sum_{390}^{450} L_\lambda \cdot \Delta\lambda = 780[mW/m^2 \cdot sr]$$

Para continuar con el estudio se debe calcular la L_B , primero debe realizar el cálculo de la radiancia ponderada por $B(\lambda)$, estos valores son mostrados en la tabla 4-4 y en la figura 4-6 se puede comparar la radiancia original de la fuente con la radiancia ponderada por $B(\lambda)$.

Tabla 4-4 Tabla resumen para el cálculo de la radiancia ponderada por $B(\lambda)$ para las diferentes longitudes de onda ponderado, ejemplo 3

$B(\lambda)$	$L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda$
0,025	0,63
0,05	3
0,10	5,5
0,20	7
0,40	16
0,80	24
0,90	23
0,95	95
0,98	147
1,00	125
1,00	50
0,97	49
0,94	42

Realizando el cálculo de la radiancia ponderada por $B(\lambda)$ con la ecuación 3-16 se obtiene como resultado:

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 587,13 [mW/m^2 \cdot sr]$$

Ya conocido el valor de L_B y teniendo presente que el tiempo de exposición es menor a 10.000 segundos (7.200 segundos), se puede realizar el cálculo del límite de exposición:

$$L_{B,max} = \frac{10^6}{t} = \frac{10^6}{7.200} = 138,89 [W/m^2 \cdot sr]$$

El valor de L_B es menor al límite de exposición calculado, $L_{B,max} = 138,89 [W/m^2 \cdot sr]$. Otro método que se puede utilizar es el índice de riesgo para el L_B calculado.

$$I_{riesgo} = \frac{L_B}{L_{B,max}} = \frac{5,8713 \cdot 10^{-3}}{138,89} < 1$$

Debido a que el índice de riesgo es inferior a 1, se cumple que la radiancia se encuentra dentro los límites de exposición.

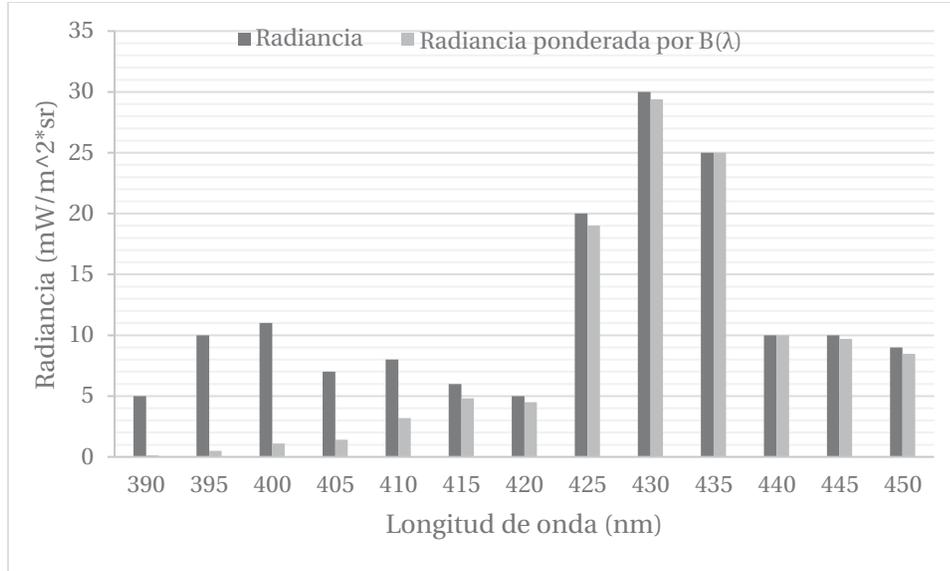


Figura 4-6 Espectro de emisión de radiancia para una fuente de luz artificial ponderado por $B(\lambda)$ de la fuente, ejemplo 3

Finalmente, y continuando con el estudio se debe calcular la L_R , primero debe realizar el cálculo de la radiancia ponderada por $R(\lambda)$, estos valores son mostrados en la tabla 4-5 y en la figura 4-7 se puede comparar la radiancia original de la fuente con la radiancia ponderada por $R(\lambda)$.

Tabla 4-5 Tabla resumen para el cálculo de la radiancia ponderada por $R(\lambda)$ para las diferentes longitudes de onda ponderado, ejemplo 3

$R(\lambda)$	$L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda$
0,25	6,3
0,50	25
1,00	55
2,00	70
4,00	160
8,00	240
9,00	225
9,50	950
9,80	1470
10,00	1250
10,00	500
9,70	485
9,40	423

Realizando el cálculo de la radiancia ponderada por $B(\lambda)$ con la ecuación 3-20 se obtiene como resultado:

$$L_R = \sum_{390}^{450} L_\lambda \cdot R(\lambda) \cdot \Delta\lambda = 5.859,3 [\text{mW}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$$

Ya conocido el valor de L_R y teniendo presente que el tiempo de exposición es mayor a 10 segundos (7.200 segundos), se puede realizar el cálculo del límite de exposición:

$$L_{R,max} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{C_\alpha} = \frac{2,8 \cdot 10^7}{17 \cdot 10^{-3}} = 1,647 \cdot 10^6 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$$

El valor de L_R es menor al límite de exposición calculado, $L_{R,max} = 1,647 \cdot 10^6 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}]$. Otro método que se puede utilizar es el índice de riesgo para el L_B calculado.

$$I_{riesgo} = \frac{L_R}{L_{R,max}} = \frac{5.859,3}{1,647 \cdot 10^6} < 1$$

Debido a que el índice de riesgo es inferior a 1, se cumple que la radiancia se encuentra dentro los límites de exposición.

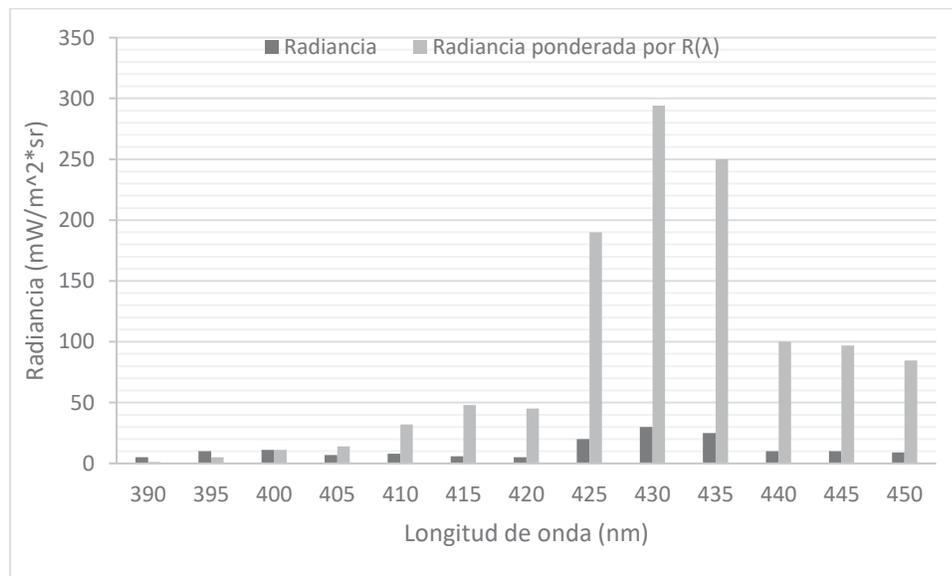


Figura 4-7 Espectro de emisión de irradiancia para una fuente de luz artificial ponderado por $R(\lambda)$ de la fuente, ejemplo 2

4.3 Clasificación según grupo de riesgo

Es importante tener el conocimiento de cómo clasificar las diferentes lámparas y equipos que utilizan lámparas, para eso se utilizan datos entregados por el fabricante o ensayos realizados por laboratorios acreditados y que cuenten con UNE-EN 62471 ya que no cualquier laboratorio puede realizar estos ensayos debido a los instrumentos que se deben utilizar.

4.3.1 Ejemplo 4

Para este caso en específico, se utilizarán los datos obtenidos de un ensayo de seguridad fotobiológica realizado en el laboratorio “AIDO Instituto tecnológico de óptica, color e imagen, Valencia”. La figura 4-8 es parte del informe de ensayo N°: F110173-1, corresponde a la identificación y descripción de la muestra a ensayar.

Descripción:

Lámpara de LEDs casquillo E40.
Dimensiones externas aproximadas: 12 cm diámetro x
25 cm de alto.
Referencia de la luminaria: S-105-B



Muestra identificada en el laboratorio como F110173-1: lámpara formada por 48 LEDs distribuidos en 8 tiras de 6 LEDs cada una y con electrónica integrada.

Figura 4-8 Identificación de muestra, informe de ensayo N° F110173-1

Para realizar el ensayo de seguridad fotobiológica es necesario buscar el centro óptico de la muestra el cual se puede identificar en la figura 4-9.

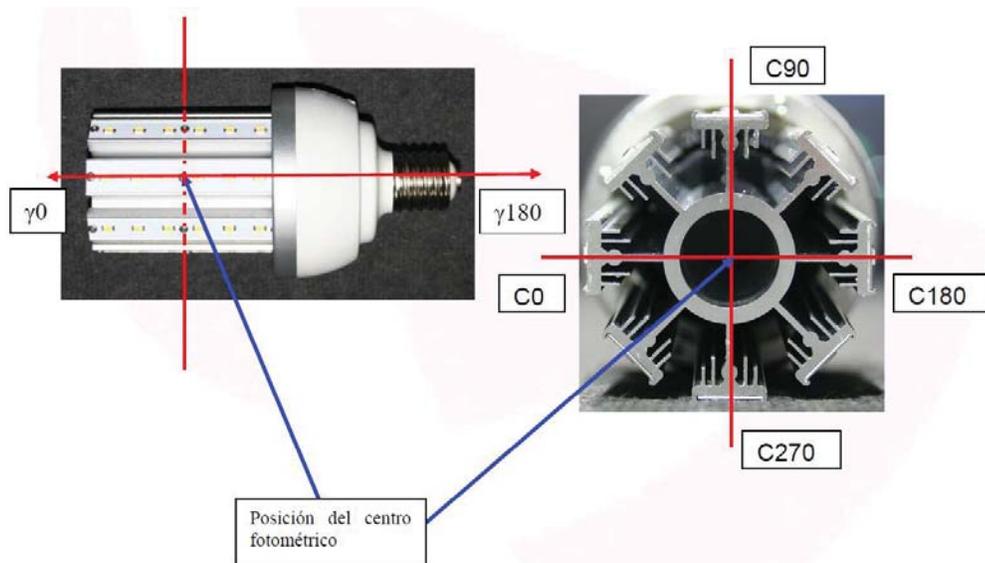


Figura 4-9 Identificación del centro óptico de la muestra, informe de ensayo N° F110173-1

Ya definida las características ópticas de la fuente de luz artificial, se identifican los ensayos a realizar, mostrado en la figura 4-10.

CARACTERIZACIÓN FOTOMÉTRICA DE UNA LÁMPARA:

Distribución angular de intensidad luminosa en cd / Klm (UNE-EN 13032-1:2006)
 Flujo luminoso emitido (UNE-EN 13032-1:2006)
 Consumo y eficacia.
 Curvas isolux (UNE-EN 13032-1:2006)

ENSAYO ESPECTRAL LUMINARIA DE LEDS

Clasificación luminaria según norma UNE-EN 62471:2009: Seguridad fotobiológica de lámparas y de los aparatos que utilizan lámparas.

Se realizan medidas en semiplanos C con un intervalo de 15° (C0, C15, C30, C45, C60, C75, C90, C105, C120, C135, C150, C165, C180, C195, C210, C225, C240, C255, C270, C285, C300, C315, C330, C345).

Se realizan medidas en gamma con un intervalo de 1°, gamma ∈ [0°-180°]

Figura 4-10 Descripción del ensayo a realizar, informe de ensayo N° F110173-1

El ensayo es realizado según norma UNE-EN 62471:2009 (Medidas de iluminancia). Los valores límites de la exposición vienen dados por la Directiva de Radiación Óptica Artificial (2006/25/CE). Las medidas de irradiancia se realizan en la dirección de máxima emisión del módulo de LEDs utilizando un espectralradiómetro International Light RPS900-R (IFE 0005). La distancia a la cual se toman las medidas de irradiancia es aquella en la que el módulo de LEDs proporciona 500[lux] (0.92 ± 0.01). La máxima emisión de la luminaria es C30° y Gamma 85°.

Longitud de onda (nm)	Valores límite de exposición directiva	Valores medidos	Grado de cumplimiento
180 – 400 nm	$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	$H_{\text{eff}} = 0.0016 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	Cumple para todos los tiempos
315 - 400 nm	$H_{\text{UVA}} = 10000 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	$H_{\text{UVA}} = 14.8 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	Cumple para todos los tiempos
300 - 700 nm	$L_B = 100 \text{ W/m}^2\text{sr} \text{ (>10000 s)}$	$L_B = 20.2 \text{ W/m}^2\text{sr}$	Cumple para todos los tiempos
380 - 1400 nm	$L_R = 317922 \text{ W/m}^2\text{sr} \text{ (10 s)}$	$L_R = 255.3 \text{ W/m}^2\text{sr}$	Cumple para todos los tiempos
780 - 1400 nm	$L_R = 68126 \text{ W/m}^2\text{sr} \text{ (100 s)}$	$L_R = 0.52 \text{ W/m}^2\text{sr}$	Cumple para todos los tiempos
780 - 3000 nm	$E_{\text{IR}} = 569 \text{ W/m}^2 \text{ (100 s)}$	$E_{\text{IR}} = 0.01 \text{ W/m}^2 \text{ (100 s)}$	Cumple para todos los tiempos
380 - 3000 nm	$H_{\text{piel}} = 35566 \text{ J/m}^2 \text{ (10s)}$	$H_{\text{piel}} = 5.19 \text{ J/m}^2 \text{ (10s)}$	Cumple para todos los tiempos

Figura 4-11 Resultados del informe de ensayo N° F110173-1

En la figura 4-11 se puede apreciar una tabla con los resultados del ensayo realizado, estos valores cumplen todos los requisitos para la clasificación en el grupo exento de riesgos fotobiológicos, en consecuencia pertenece a un grupo RG0.

4.3.2 Ejemplo 5

Para este caso en específico, se medirá la emisión un LED y se utilizarán los datos obtenidos de un ensayo de seguridad fotobiológica realizado en el laboratorio “AIDO Instituto tecnológico de óptica, color e imagen, Valencia”. La figura 4-12 es parte del informe de ensayo N°: F120083, corresponde a la identificación y descripción de la muestra a ensayar.

Descripción:

Módulo de 2 LEDs.

Dimensiones externas aproximadas: 6 cm de largo x 1.5 cm de ancho x 10 cm de alto.

Referencia solicitante: XL. W2B1



Las partes de la luminaria quedan identificadas de la siguiente forma:

- Módulo de LEDs ,identificado en el laboratorio como F120083-1:
- Equipo electrónico de alimentación, identificado en el laboratorio como F120083-2 “MEAN WELL APV-12-24 S/N: HB17909637”

Figura 4-12 Identificación de muestra, informe de ensayo N° F120083

Para realizar el ensayo de seguridad fotobiológica, solo se debe medir la emisión de uno de los LEDs, debido a lo anterior todos los otros LEDs de la fuente se deben tapar tal como se muestra en la figura 4-13.

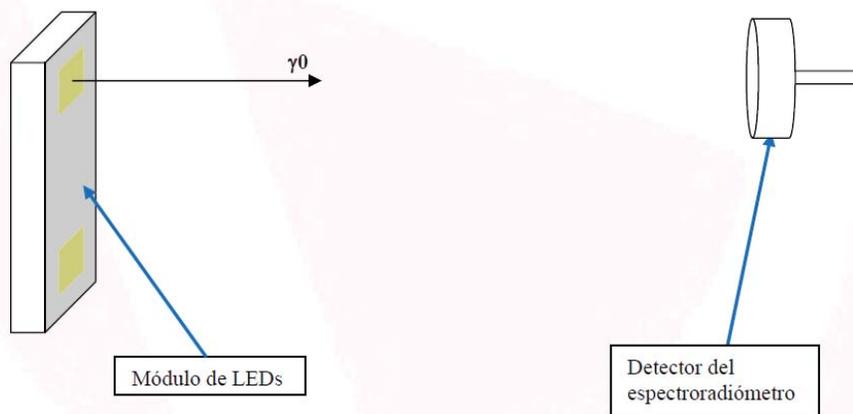


Figura 4-13 Identificación del centro óptico de la muestra, informe de ensayo N° F120083

El detector se sitúa a una distancia de 200[mm] den centro fotométrico del LEDy en dirección Gama 0.

Longitud de onda (nm)	Valores límite de exposición directa	Valores medidos	Grado de cumplimiento
180 - 400 nm	$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	$H_{\text{eff}} = 0.0003 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	Cumple para todos los tiempos
315 - 400 nm	$H_{\text{UVA}} = 10000 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	$H_{\text{UVA}} = 3.85 \text{ J/m}^2 \text{ (8 h)}$	Cumple para todos los tiempos
300 - 700 nm	$L_B = 10^6/t \text{ W/m}^2\text{sr}$ ($t \leq 10000 \text{ s}$)	$L_B = 578 \text{ W/m}^2\text{sr}$	Cumple para todos los tiempos inferiores a 1730 s
380 - 1400 nm	$L_R = 1400000 \text{ W/m}^2\text{sr}$ (10 s)	$L_R = 6575 \text{ W/m}^2\text{sr}$	Cumple para todos los tiempos
780 - 1400 nm	$L_R = 300000 \text{ W/m}^2\text{sr}$ (10 s)	$L_R = 0.5 \text{ W/m}^2\text{sr}$	Cumple para todos los tiempos
780 - 3000 nm	$E_{\text{IR}} = 569 \text{ W/m}^2$ (100 s)	$E_{\text{IR}} = 0.001 \text{ W/m}^2$ (100 s)	Cumple para todos los tiempos
380 - 3000 nm	$H_{\text{piel}} = 35566 \text{ J/m}^2$ (10s)	$H_{\text{piel}} = 5.1 \text{ J/m}^2$ (10s)	Cumple para todos los tiempos

Figura 4-14 Resultados del informe de ensayo N° F120083

En la figura 4-14 se puede apreciar una tabla con los resultados del ensayo realizado, se puede observar que el riesgo por luz azul L_B tiene una limitación con respecto al tiempo, dado lo anterior no cumple 1 de los requisitos para ser clasificado en un grupo RG0, pero si estos valores cumplen todos los requisitos para la clasificación en el grupo de bajo riesgos fotobiológicos, en consecuencia, pertenece a un grupo RG1.

Discusión y conclusiones

El estudio de los riesgos producidos por la radiación óptica artificial de las fuentes destinadas a producir luz visible ha tomado gran importancia debido al gran uso que se le entrega a estos tipos de fuentes. Los seres humanos necesitamos de luz para vivir y poder desarrollar nuestras actividades fácilmente, con el paso del tiempo hemos encontrado nuevos métodos para iluminar nuestra vida diaria, razón de la cual la luz es fundamental.

La norma UNE-EN 62471 establece 4 grupos de clasificación en base a los límites de exposición mencionados por la directiva 2006/25/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 que hace referencia a las radiaciones ópticas que pueden producir daños en los órganos diana. En base al estudio realizado, esta norma debe ser actualizada y considerar las actuales fuentes de radiaciones ópticas destinadas a producir luz visible, ya que en ese momento las fuentes de luz LED no se utilizaban para iluminar grandes espacios, es decir no se clasificaban como fuentes de luz para uso general. En consecuencia, las fuentes de luz led se miden a 200[mm] de distancia entre uno de los LEDs y el sensor, obteniendo una tendencia de clasificación a un grupo RG1 o RG2.

Si nos concentramos en la tendencia mundial de utilizar fuentes de luz con tecnología LED, este tipo de fuentes tiene un ancho de banda muy controlado en el rango visible desde los 380[nm] a los 780[nm] con el objetivo de aprovechar al máximo la energía que se consume y la luz que emite. Lo anterior no quiere decir que las fuentes de tecnología LED no emitan radiación en el rango ultravioleta o infrarrojo, estos tipos de fuentes si emiten radiación para estos rangos, pero es despreciable y en algunos casos es nula. Dado lo anterior las fuentes de luz LED casi no producen daños en los rangos ultravioleta e infrarrojo, pero si es necesario evaluarlas a lo menos en el rango ultravioleta e infrarrojo de tipo A por seguridad.

Las fuentes de luz LED, son por lo general de luz azul recubiertas por placas de fosforo para percibir una luz blanca. Tomando en cuenta la alta presencia de luz azul en los LED, el daño que más se verá presente es por exposición de luz azul evaluado por la radiancia de la fuente. Muchas empresas, en la actualidad se encuentran en la búsqueda de filtros para este tipo luz con el objetivo de limitar la exposición a las longitudes de onda más perjudiciales para nuestros órganos que corresponde a los 445[nm]. Pero se debe tener cuidado con algunos filtros que buscan eliminar o disminuir todo el ancho de banda de luz azul, ya que existen longitudes de onda del

espectro azul necesario para el buen funcionamiento de nuestro cuerpo, como es el ciclo circadiano.

Si bien en los efectos fisiológicos se aprecia un interés en el estudio, estos quedan fuera del proyecto de título debido a no contar con las herramientas necesarias para su investigación.

Es evidente que los daños mencionados no afectan de igual forma a todas las personas expuestas a las radiaciones, esto se debe que no tienen mismas reacciones debido a diferentes condiciones biológicas. La presentación de los fototipos de las personas es fundamental para una correcta evaluación de los diferentes riesgos y las medidas correctas de prevención.

La norma UNE-EN 62471 se puede aplicar para luminarias destinadas a iluminación pública del tipo vial o proyectores, pero no está destinado para ello, ya que el objetivo de esta norma es el estudio de riesgos a corta distancia, por lo general para el uso de luminarias en industrias y oficinas. Una correcta aplicación de la norma para luminarias públicas sería evaluarlas a distancias de 8 metros o 10 metros de distancia buscando su máximo de emisión, dependiendo de las potencias a evaluar, estos valores de medición son más razonables y se aplican en la realidad. Cabe destacar que los tiempos de exposición son de corta duración y las distancias son grandes, en consecuencia, a mayor distancia de la fuente de luz y menor tiempo de exposición menor son los efectos o daños producidos. Lo anterior queda propuesto para otro trabajo de título, ya que no fue el objetivo del actual.

Bibliografía

- [1] B. Diego Segura, «Evaluación del riesgo Real Decreto 486/2010,» de *IV Jornada AMMTS sobre radiaciones no ionizantes*, Madrid, 2011 .
- [2] IDEARA, Radiaciones ópticas artificiales. Factores relacionados con la fuente y medidas de control, Madrid: IDEARA, 2013.
- [3] I. N. S. H. T. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Guía técnica para la evaluación de los riesgos relacionados con las radiaciones ópticas artificiales, Madrid: INSHT, 2015.
- [4] M. Ruperéz Calvo y D. S. B. Segura, «Radiaciones ópticas artificiales: Criterios de evaluación NTP908,» INSHT, Madrid, 2011.
- [5] «Sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a riesgos derivados de los agentes físicos (radiaciones ópticas artificiales),» DIRECTIVA 2006/25/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2006, 2008.
- [6] UNE-62471, «Seguridad fotobiológica de lámparas y aparatos que usan lámparas,» AENOR, Madrid, 2009.
- [7] I. American Cancer Society, «Prevención y detección temprana del cancer de piel,» 19 abril 2017. [En línea]. Available: <https://www.cancer.org/es/>.
- [8] I. Essilor of America, «Las lentes Essilor Crizal Prevencia,» 2013.