

# Revisión de Parámetros y Técnicas en Iluminación Integrativa Centrada en el Ser Humano

Hector F. Chinchero  
*Dep. de Electrónica*  
*Universidad de Alcalá*  
Madrid, España  
hector.chinchero@uah.es

Jose Luis Lazaro  
*Dep. de Electrónica*  
*Universidad de Alcalá*  
Madrid, España  
josel.lazaro@uah.es

Pablo Quintana-Barcia  
*Dep. Ing. Eléctrica*  
*Universidad de Oviedo*  
Gijón, España  
quintanapablo@uniovi.es

Javier Ribas  
*Dep. Ing. Eléctrica*  
*Universidad de Oviedo*  
Gijón, España  
ribas@uniovi.es

Alvaro de la LLana  
*Dep. Electrónica*  
*Universidad de Alcalá*  
Madrid, España  
alvaro.llana@uah.es

Diego Rodriguez  
*Dep. Ing. Eléctrica*  
*Universidad de Oviedo*  
Gijón, España  
rodriguezdiego@uniovi.es

J. Marcos Alonso  
*Dep. Ing. Eléctrica*  
*Universidad de Oviedo*  
Gijón, España  
marcos@uniovi.es

Angel M. Guevara  
*Master en Inteligencia Artificial*  
*Universidad Internacional de Valencia*  
Valencia, España  
angelmauricio.guevara@alumnos.viu.es

Carlos Cruz  
*Dep. Electronics*  
*Universidad de Alcalá*  
Madrid, España  
carlos.cruzt@uah.es

**Resumen**— La iluminación natural y artificial tienen la capacidad de producir efectos visuales y no visuales en los seres humanos. Existen cuatro fotorreceptores muy conocidos, los conos por un lado y bastones de tipo L, M y S, por otro, los cuales están asociados al sistema de visión y permiten diferenciar el color y el tono de los objetos en función de la luz reflejada. Por otro lado, los efectos no visuales dependen de otro fotorreceptor recientemente descubierto conocido como Células Ganglionares Retinales intrínsecamente fotosensibles (ipRGC), que al excitarse producen principalmente la supresión de la melatonina, hormona que regula los Ritmos Circadianos (RC), y que también puede afectar a los procesos biológicos y psicológicos. Este trabajo presenta un estudio sobre iluminación integrativa, enfocado en los métodos de análisis y parámetros para el cálculo de factores utilizados en el diseño de iluminación, como el Estímulo Circadiano (CS), la Iluminación Melanópica Equivalente (EML), etc. y su combinación con parámetros de diseño de iluminación tradicionales como Índice de Reproducción Cromática (CRI), Temperatura de Color (CCT), coordenadas cromáticas, estándar de color TM-30, entre otros. Por otro lado, se hace énfasis en el uso de la norma CIE-S-026:2018, donde se establecen las curvas de sensibilidad asociadas a los fotorreceptores del sistema de visión humano. Se determina que el parámetro de Iluminación Melanópica (m-EDI) es hasta el momento el factor determinante para evaluar efectos no visuales, por lo que se propone un esquema de parametrización para el diseño de un sistema de Iluminación Integrativa Centrada en el Ser Humano (IICSH).

**Palabras Clave**—Iluminación Integrativa Centrada en el Ser Humano (IICSH), Células Ganglionares Retinales intrínsecamente fotosensibles (ipRGC), Estímulo Circadiano (CS), Iluminación Melanópica Equivalente (EML), Well Building Standard (WBS).

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue financiado por el proyecto Localización y Orientación de Personas en Interiores con Tecnología VLP. Aplicaciones en Actividades Cotidianas y Situaciones de Emergencia (LocVLP) Referencia: SBPLY/23/180225/000138, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. También ha sido financiado en parte por el gobierno nacional de España y el gobierno regional de Asturias bajo la subvención de investigación ENCORELED [MCI-20-PID2019-105568RB-I00].

El ser humano, a lo largo de millones de años durante todo su proceso evolutivo, se ha ido adaptando a la luz natural para regular su actividad biológica, así como para iluminar los entornos de su hábitat y para desarrollar todo tipo de actividades para su supervivencia. Por otro lado, la luz natural también se ha empleado en sistemas de calentamiento de aguas e incluso para comunicar información, tal como las marcaciones de los ciclos anuales de siembra y cosecha observados en estructuras arquitectónicas en civilizaciones ancestrales como la Inca, Azteca, Egipcia, China, etc.

Desde una perspectiva evolutiva como especie, al menos desde los últimos 10.000 años transcurridos desde la última glaciación, el cuerpo humano está acondicionado para adecuarse a ciclos circadianos bien definidos, es decir, el reloj biológico humano está diseñado para sincronizarse con los ciclos naturales de claridad y oscuridad que dependen de la luz natural proporcionada por el sol, aunque a diferentes franjas horarias en las distintas zonas geográficas del planeta [1].

A lo largo de la historia, los seres humanos han buscado innumerables formas y estrategias de iluminar sus espacios personales y su entorno más cercano o comunitario. En las primeras etapas de la civilización, se utilizaban fuegos y antorchas para proporcionar luz artificial. Sin embargo, estos métodos tenían limitaciones en términos de intensidad y duración. La invención de la lámpara de aceite en la antigua Grecia permitió disponer de una fuente de luz más duradera y controlable. El gran avance en la iluminación se produjo con el advenimiento de la electricidad, cuando Thomas Edison entre otros introdujeron en el siglo XIX la bombilla incandescente marcando un hito en la historia de la iluminación. A lo largo del siglo XX, surgieron las lámparas fluorescentes que ofrecían una mayor eficiencia energética y durabilidad.

Posteriormente los diodos emisores de luz (LED), aparecieron como una alternativa en iluminación, empezado una revolución con innumerables posibilidades de soluciones más sostenibles que sus predecesoras [2][3]. En la actualidad, la iluminación LED es ampliamente utilizada en todo tipo de sistemas de alumbrado tanto interior y exterior para el ámbito residencial, edificios de oficinas, recintos de salud, centros

comerciales, alumbrado público, transporte terrestre, aéreo y marítimo, entre otros, debido a su bajo consumo de energía, alta durabilidad, bajo coste y versatilidad [2][3].

Esta evolución en la iluminación eléctrica artificial ha tenido un impacto significativo en el ser humano, mejorando su calidad de vida, seguridad y rendimiento en el trabajo debido a que se han extendido las horas de actividad [2][3] al disponer de espacios mejor iluminados para todo tipo de actividades. Adicionalmente, se estima que el 95% del tiempo las personas desarrollan sus actividades en interiores [2][21], por lo que es de vital importancia disponer de soluciones de iluminación cada vez más eficientes, seguras, sostenibles y saludables. Por otro lado, también se han planteado desafíos por la demanda creciente de energía debido al incremento de la población mundial. Otro aspecto determinante es la contaminación lumínica, que afecta negativamente a la vida silvestre y podría inclusive tener consecuencias para la salud humana [2][21][22].

En el cuerpo humano, la luz en el espectro visible de 380 nm a 780 nm de longitud de onda, es captada por los fotorreceptores ubicados en la fovea de la retina. Luego de un proceso de foto-transducción la luz se convierte en señales eléctricas que atraviesan el nervio óptico hasta el núcleo geniculado lateral (NGL) ubicado en el quiasma óptico, desde el cual se generan las señales que permitirán posteriormente formar la imagen en la zona externa del córtex occipital en el cerebro [4][23][24].

Los foto-receptores que se encargan de la visión son los conos y bastones, mientras que las Células Ganglionares Retinales intrínsecamente fotosensibles (ipRGC) son un tipo de célula retiniana sensible a la luz que se ha descubierto más recientemente y que tiene una función no visual diferente a la de los conos y bastones [4]-[14][23][24]. La Figura 1, muestra un esquema del sistema visual del ser humano.

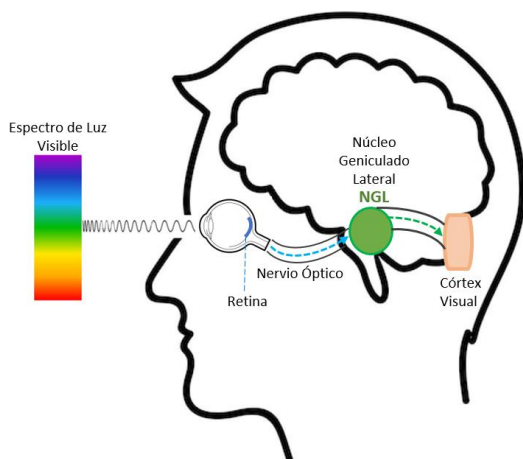


Figura 1. Sistema de Visión del Ser Humano.

La visión humana se adapta a diferentes niveles de iluminación a través de la visión fotópica, escotópica y mesópica. En condiciones de alta luminosidad, la visión fotópica aprovecha los conos de la retina, que representan aproximadamente el 5% de los fotorreceptores y son responsables de la visión detallada y en color. En contraste, en condiciones de baja luminosidad, la visión escotópica se basa en los bastones de la retina, que constituyen el 95% restante de los fotorreceptores y son altamente sensibles a la luz, pero no perciben colores y ofrecen una visión menos detallada [4].

En situaciones de iluminación moderada, la visión mesópica aprovecha tanto los conos como los bastones, ofreciendo una visión funcional, aunque con limitaciones en la percepción de detalles y colores. Estos tres tipos de visión permiten la adaptación visual a diversos entornos y condiciones de iluminación [4][23][24].

Respecto a las ipRGCs, éstas intervienen principalmente en la regulación de procesos biológicos como el control del ciclo circadiano y la respuesta pupilar a la luz. Adicionalmente, las ipRGCs contienen un pigmento conocido como melanopsina, el cual se excita en un pico de longitud de onda de 480 nm [4] con un margen en su campana de sensibilidad entre 470 nm y 590 nm. Los espectros de iluminación en esta campana son sensibles a la luz azul, cian y verde, y pueden conseguir una mayor supresión a la producción de melatonina, aumentando el estado de alerta en las personas, lo que produce efectos sobre los ritmos circadianos [5]. Esto repercute finalmente en el ciclo de sueño-vigilia, despertar, estado de alerta, concentración, procesos biológicos y psicológicos, etc., de las personas.

Para el análisis y cálculo de parámetros relacionados a la iluminación se han establecido parámetros relacionados a los efectos visuales, y que son tradicionalmente bastante conocidos, como el índice de reproducción cromática (CRI), temperatura de color (CCT), coordenadas cromáticas x,y; Duv, valores en TM-30 relacionados a la calidad de la iluminación como la fidelidad (Rf), gama (Rg), etc. [4]-[14]. Estos parámetros permiten conocer específicamente las características del color y la tonalidad de la luz reflejada por los objetos, se utilizan ampliamente para especificar las características de las fuentes de iluminación y para estudios básicos de alumbrado tanto en interiores como en exteriores, de reflectividad espectral de materiales y de colorimetría.

Por otro lado, los efectos no visuales de la iluminación se vienen estudiando desde hace pocas décadas y se han desarrollado algunos criterios y parámetros que relacionan a la iluminación con los RC. Así podemos encontrar parámetros como el Estímulo Circadiano (CS), Iluminación Circadiana (CLA), Equivalente Melanópico (EML), Ratio melanópico-fotópico M/P, etc. Los últimos consensos de estandarización se han determinado en la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), donde se ha establecido el estándar CIE-S-026:2018 para determinar los parámetros para el análisis, y el cálculo y estudio de la iluminación asociada a los efectos en cada foto-receptor del ojo humano [14]. De esta manera aparece el concepto de Iluminación Integrativa, que nace como consenso de grupos de trabajo del CIE para proponer el adecuado uso de los términos desarrollados por los grupos de tendencia que venían haciendo investigaciones acerca de la iluminación circadiana, iluminación biológica, iluminación centrada en el ser humano (HCL), entre otros.

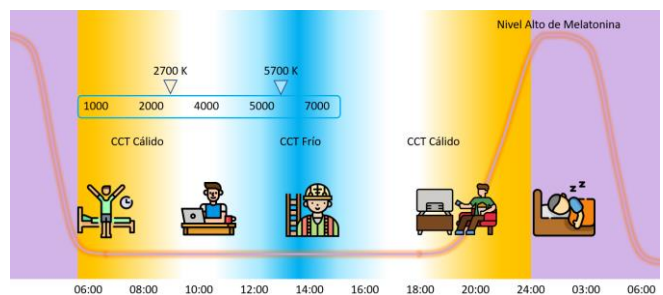


Figura2. Concepto de Iluminación Integrativa

Adicionalmente, para el diseño de iluminación en espacios de trabajo también se está utilizando algunas normativas, estándares y nuevas metodologías de uso obligatorio y complementarias establecidas en certificaciones tales como UNE 12464.1, Well Building Standard (WBS), BREEAM, LEED, GREEN, PASIVEHAUSE, etc. [2][12][14]. Estas certificaciones permiten que diseñadores e integradores de sistemas puedan certificar que sus proyectos cumplan con niveles mínimos de seguridad de las instalaciones y para demostrar que los entornos son sostenibles, ecológicos y eficientes energéticamente.

Hasta ahora no se han realizado estudios que aborden el ámbito de la Iluminación Integrativa con un concepto global e integrador. Por otro lado, tampoco se han desarrollado aplicaciones de sistemas de iluminación que incluyan todos los parámetros involucrados y que deben ser analizados de manera integral para evaluar tanto la calidad de la iluminación, características de sostenibilidad, y efectos visuales y no visuales específicos para casos de estudio.

Este trabajo presenta un estudio acerca de los Sistemas de Iluminación Integrativa, haciendo énfasis en los efectos visuales y no visuales que tiene la iluminación sobre el ser humano, se abordan los conceptos, parámetros involucrados en los efectos circadianos de la iluminación LED, se estudian las estrategias de control desarrolladas y las metodologías de aplicación de estándares y normas de sostenibilidad.

## II. ILUMINACIÓN INTEGRATIVA CENTRADA EN EL SER HUMANO (IICSH)

### A. Iluminación y Visión del Ojo Humano

El ojo humano es el órgano capaz de percibir la luz gracias a una serie de células sensibles al espectro electromagnético visible llamadas fotorreceptores, que se encuentran en la retina. Los dos tipos principales de fotorreceptores relacionados con los efectos visuales son los conos y los bastones, que se encuentran ubicados específicamente en una región del ojo humano llamada fovea, la región central de la retina responsable de la visión [4]-[6]. La Figura 3, muestra un esquema de la forma de los fotorreceptores del ojo humano y su relación con los efectos visuales y no visuales.

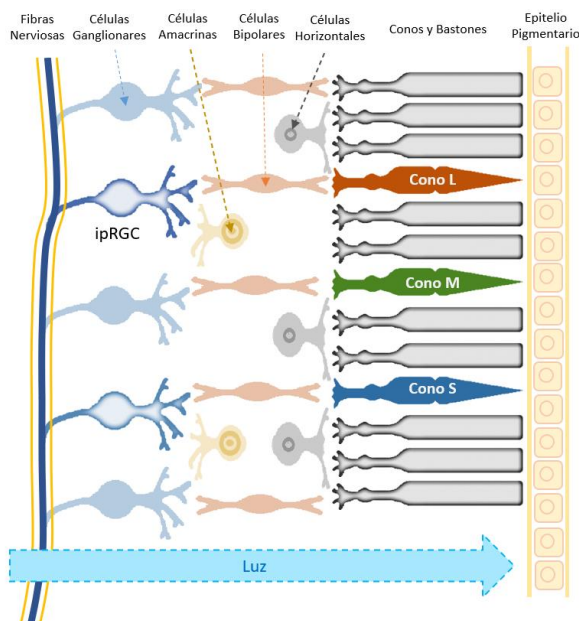


Figura 3. Fotorreceptores del ojo humano.

Los conos son sensibles a la luz visible y son responsables de la percepción del color y la visión detallada. Existen tres tipos de conos, cada uno sensible a diferentes longitudes de onda de luz. Están especializados en detectar longitudes de onda cortas, medias y largas del espectro electromagnético. Los conos sensibles a la luz corta (conos-S) son sensibles a las longitudes de onda de la luz azul, los conos sensibles a la luz media (conos-M) son sensibles a las longitudes de onda de la luz verde y los conos sensibles a la luz larga (conos-L) son sensibles a las longitudes de onda de la luz roja. Los conos tienen una alta densidad en la fovea, alrededor de 6-7 millones de conos. La distribución de los conos varía en función de la persona, pero en promedio, los conos azules representan aproximadamente el 5-10% de los conos en la retina, los conos verdes aproximadamente el 32-36% y los conos rojos aproximadamente el 56-58%. [4]-[6][23][24].

Por otro lado, los bastones son responsables de la visión en condiciones de baja iluminación, estos son sensibles a la luz visible y también a la luz infrarroja y ultravioleta. Adicionalmente, los bastones son más sensibles a la luz que los conos, pero no pueden percibir el color o los detalles finos. La densidad de los bastones en la periferia de la retina es de alrededor de 120-140 millones. Además, los bastones son más sensibles a las longitudes de onda de luz que son más largas que las que los conos pueden detectar, siendo más sensibles a la luz blanca o grisácea [4]-[6][23][24].

Las ipRGCs contienen un pigmento fotosensible llamado melanopsina, que es especialmente sensible a la luz azul de corta longitud de onda establecida en los 480 nm [6]. Cuando la luz azul entra en el ojo y estimula la melanopsina, las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles envían señales al núcleo supraquiasmático (NSQ), suprimiendo la producción de hormonas como la melatonina, que ayuda a regular el sueño y la vigilia [4]-[6]. Los ipRGCs también desempeñan un papel en la regulación de la presión intraocular y la retina, lo que sugiere su importancia en la salud ocular. La sensibilidad de los ipRGCs se mide en unidades de lux (lx) y puede ser afectada por factores como la edad y las enfermedades oculares.

La sensibilidad espectral relativa del sistema óptico está establecido por la curva de sensibilidad de los fotorreceptores y recientemente se ha actualizado en el estándar CIE-S-026:2018 [7][14][23][24] incluyendo las ipRGCs. La Figura 4 muestra la sensibilidad espectral relativa del ojo humano.

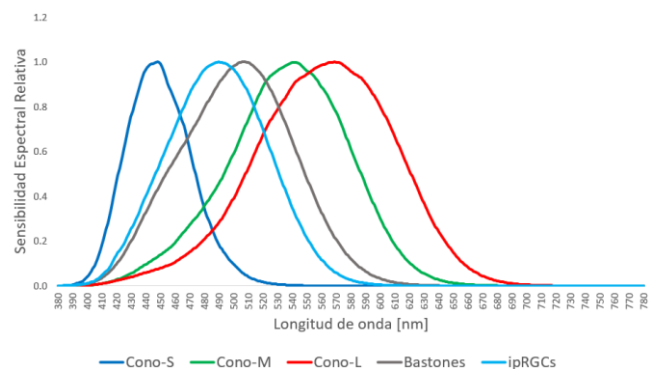


Figura 4. Curvas de sensibilidad de los fotorreceptores del ojo humano.

### B. Iluminación y Ritmos Circadianos

Los ritmos circadianos (RC) son procesos biológicos que siguen un ciclo de aproximadamente 24 horas y están presentes en la mayoría de los seres vivos, incluidos los

humanos [4][5]. Estos ritmos influyen en diversas funciones fisiológicas y comportamentales, como la regulación del sueño, la temperatura corporal, la liberación de hormonas y el rendimiento cognitivo [5]. El sistema de sincronización circadiana que se encuentra en el hipotálamo del cerebro se encarga de ajustar los RC internos del cuerpo de acuerdo a la variación de factores externos tales como las señales ambientales relacionadas a la luz y la oscuridad [5][6]. Otro de los sistemas relacionados a los RC es el sistema endocrino, así los RC también regulan la producción de hormonas, como la melatonina, la cual es producida por la glándula pineal y ayuda a regular el sueño y en la liberación de cortisol, una hormona que ayuda a controlar el estrés y la vitalidad del cuerpo [4]-[6]. Adicionalmente los RC pueden afectar al sistema cardiovascular, la temperatura corporal, la digestión, el sistema inmunológico, la liberación de hormonas secundarias, la función cognitiva, la memoria, la coordinación motora, estados de ánimo, procesos psicológicos, entre otros.

La iluminación es uno de los factores más importantes que influyen en los RC del cuerpo humano debido fundamentalmente a que el reloj biológico humano está acondicionado originalmente para sincronizarse con el ciclo natural de la luz y la oscuridad, que se produce a lo largo del día [4]. La exposición a la luz intensa y azulada durante la mañana y el día puede tener efectos beneficiosos puesto que ayuda a suprimir la melatonina, la hormona responsable de inducir la somnolencia, y estimula la producción de cortisol, una hormona que promueve la alerta y la vigilia en las personas [4]-[6].

Por otro lado, la exposición prolongada a la luz artificial en horas inapropiadas puede confundir el reloj biológico, sobre todo cuando la fuente de luz tiene una alta densidad espectral azul en la noche, lo que suprime la producción de melatonina, afectando la calidad del sueño y alterando el ritmo circadiano [6]. Esto puede llevar a trastornos del sueño y problemas de salud a largo plazo, como trastornos metabólicos, trastornos del estado de ánimo y problemas cognitivos. Por lo tanto, es importante limitar la exposición a la luz artificial durante la noche y asegurarse de tener una exposición adecuada a la luz natural durante el día para mantener un ritmo circadiano saludable y equilibrado.

La iluminación artificial que más afecta a los ritmos circadianos es la luz azul, que se encuentra en la mayoría de las lámparas basadas en luces LED y en las pantallas de dispositivos electrónicos, como teléfonos móviles, tabletas y computadoras. La luz azul es un componente natural y necesario de la luz visible dentro del espectro electromagnético y su longitud de onda se encuentra entre los 460 nm y 485 nm aproximadamente [3]. La iluminación conseguida en estos valores de longitud de onda es entonces similar a la luz diurna natural, y por lo tanto, puede confundir el reloj biológico del cuerpo de acuerdo al nivel de iluminación y su tiempo de exposición, aun cuando el estado ario natural sea el ciclo de luz o de oscuridad [4]-[6].

### III. PARÁMETROS DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN INTEGRATIVA CENTRADA EN EL SER HUMANO

La iluminación ha sido estudiada ampliamente y se han establecido parámetros que tradicionalmente se usan para analizar las fuentes de luz y en colorimetría de materiales, tales como CCT, CRI, coordenadas cromáticas x,y, Duv, valores TM-30 Rf, Rg, etc [4]-[8]. Estos parámetros son usados específicamente para conocer las características de

calidad del color y tonalidad, lo que se relaciona directamente con los efectos visuales. Por otro lado, los efectos no visuales de la iluminación se han empezado a estudiar desde hace pocas décadas desde el descubrimiento de las ipRGCs, así como por los estudios realizados de los efectos y peligros producidos por la luz azul [8][16].

Una de las metodologías ampliamente utilizada está basada en el Estímulo Circadiano (CS), desarrollado por el Dr. George C. Brainard y el Dr. Steven W. Lockley [8]. El CS es una medida que permite cuantificar la capacidad de la luz para afectar el ritmo circadiano de una persona. Este estímulo mide la capacidad de la luz para suprimir la producción de melatonina, la hormona que ayuda a regular los RCs.

La metodología desarrollada en [8]-[11] establece un CS de al menos 0.3 durante el período diurno para promover la alerta y la concentración en un entorno de trabajo, debido a la cantidad de luz azul que reciben los ojos durante el día. Sin embargo, en áreas donde se busca una mayor estimulación, se pueden alcanzar valores más altos de CS, entre 0.4 y 0.5, llegando incluso a valores superiores de 0.7 [8]-[11] para una mayor concentración cognitiva. Esto se puede lograr mediante una iluminación que emita una cantidad suficiente de luz azul en el rango de longitud de onda de 460-480 nm. También se consiguen altos valores de CS cuando se dispone de una mayor proporción de espectro de luz azul-verde entre 500-550 nm de longitud de onda. Es importante destacar que estos valores son solo guías generales y pueden variar según las necesidades y preferencias individuales. Adicionalmente, es esencial considerar otros factores como las características del entorno, el color de los materiales, la arquitectura, la distribución de la iluminación y la integración de luz natural para lograr un ambiente de trabajo óptimo.

Por otro lado, el Estándar Well Building 2.0 utiliza el parámetro EML que mide la iluminación melanópica equivalente, y que es una métrica alternativa a la iluminación fotópica medida en función de los conos. EML se pondera según las ipRGCs pero la curva de sensibilidad melanópica tiene su máximo en 490 nm, por lo que WBS hace una equivalencia adicional para comparar EML con m-EDI [12]-[14]. Valores de 275 EML de 09h00 a 13h00 permiten conseguir una máxima puntuación en WBS y están asociados a niveles recomendados para horarios de trabajo, aunque se puede hacer una combinación de criterios para alcanzar puntuaciones altas aun disponiendo valores bajos desde 120 EML, cuando se combina en el proyecto el uso de iluminación natural, mediante control del sistema de iluminación, control de deslumbramiento, entre otros.

Hasta ahora el estándar más completo lo ha establecido la CIE mediante CIE-S-026:2018 [15][16], en el cual se definen cantidades y métricas de sensibilidad espectral que permiten describir la capacidad de radiación óptica para estimular cada uno de los cinco tipos de fotorreceptores del ojo humano. Dentro del CIE-S-026:2018, el parámetro más destacado para analizar los efectos no visuales de una fuente de iluminación es el m-EDI (melanopic EDI) o Iluminación Melanópica [15]-[16] que representa la iluminancia diurna equivalente D65 de las ipRGCs, medida de manera vertical a la altura visual de las personas en el entorno de trabajo.

Actualmente, los umbrales de exposición a la luz azul utilizados en la mayoría de publicaciones recientes sobre iluminación integrativa hacen mención a los niveles alcanzados mediante consenso por varios de los científicos

que habitualmente colaboran con CIE para el desarrollo de estándares de iluminación y que fue publicado en 2019 [16]. En este consenso se indica que el umbral de m-EDI para horas de trabajo diurno debe ser de 250 lux y para horas de descanso por la tarde de 10 lux. Para el caso de iluminación en horas de la noche para reposo y sueño, el máximo permitido de m-EDI es de 1 lux. Es decir, que los sistemas de iluminación deberán ajustarse para proporcionar una adecuada iluminación en el entorno para no sobrepasar estos umbrales en horas de descanso y sueño, así como para tampoco estar por debajo de los mismos cuando se realizan actividades de trabajo.

Respecto a los efectos visuales, para determinar la calidad de los sistemas de iluminación se utiliza el CRI, que evalúa la capacidad que tiene la fuente para reproducir con precisión el color de los objetos en comparación con una fuente de luz de referencia. El CRI se expresa en una escala de 0 a 100, siendo 100 el CRI máximo, que representa la capacidad de una fuente de luz para reproducir los colores de manera precisa y natural [8]. Es importante tener en cuenta que el CRI no es la única medida importante en la calidad de la luz, puesto que existen otras características como CCT, la uniformidad de la luz, la reproducción del color en la gama completa del espectro, etc .

Otra metodología para la evaluación de la calidad de la luz en la iluminación de interiores es la norma internacional de iluminación CIE 13.3-1995. Esta metodología utiliza un conjunto de ocho índices de rendimiento cromático, que incluyen el índice general de rendimiento cromático Ra y siete índices adicionales, incluyendo el parámetro R9 [8]. Ra mide la capacidad de una fuente de luz para reproducir el color de los objetos en comparación con una fuente de luz de referencia con una temperatura de color similar. R9 es el índice de rendimiento cromático de color rojo, mide la capacidad de una fuente de luz para reproducir con precisión el color rojo intenso. Cada índice se calcula midiendo la capacidad de una fuente de luz para reproducir una serie de colores de prueba estandarizados y comparando los resultados con los obtenidos utilizando una fuente de luz de referencia. Los resultados se expresan como un valor numérico entre 0 y 100, donde 100 indica una capacidad perfecta de reproducción del color. Es importante tener en cuenta que aunque la norma CIE 13.3-1995 es una metodología ampliamente utilizada para evaluar la calidad de la luz, se han desarrollado otras metodologías más recientes, como TM-30, que utilizan un enfoque más completo para evaluar la calidad de la luz puesto que considera 99 muestras en comparación con las ocho en CRI.

En TM-30, Rf y Rs son dos índices de reproducción del color que se utilizan en la iluminación para evaluar la capacidad de una fuente de luz para reproducir con precisión los colores de los objetos [8]. Rf se expresa en una escala del 0 al 100, donde 100 representa la capacidad de la fuente de luz para reproducir con precisión todos los colores. Rs se basa en la capacidad de la fuente de luz para reproducir con precisión los colores saturados. Se utiliza en aplicaciones donde la precisión de los colores saturados es importante, como en la moda y la industria del entretenimiento. Rs se expresa en una escala del 0 al 100, donde 100 representa la capacidad de la fuente de luz para reproducir con precisión todos los colores saturados.

La Tabla I muestra los parámetros más destacados que se deberían utilizar para analizar los sistemas de iluminación integrativa, con los márgenes máximos y mínimos para conseguir objetivos de calidad de color y atendiendo los

umbrales relacionados a los efectos no visuales como la iluminación melanópica o los estímulos circadianos.

TABLA I. PARÁMETROS DE ILUMINACIÓN INTEGRATIVA

Nombre	Sigla	Valor
Estímulo Circadiano	CS	0.3 a 0.7
Melanopic EDI	m-EDI	>250 Trabajo < 10 Descanso < 1 Sueño
Luz Melanópica Equiv.	EML	275 WBS
Índice Reprod. Cromática	CRI, Ra	> 90
Temperatura de color	CCT	2000 - 6500°K
x, y; Duv	x,y; Duv	Color
TM-30 Rf	Rf	>90
TM-30 Rg	Rg	Cerca de 100
TM-30 Rt	Rt	Cerca de 100

Respecto a los métodos de parametrización y medición de la iluminación, existen muchas herramientas que permiten calcular los parámetros tradicionales relacionados a la iluminación fotópica, mesópica y escotópica. Sin embargo, existen pocos instrumentos y metodologías integrales que permiten calcular todas las variables que actualmente deberían ser usadas en IICSH.

Entre algunos de los desarrollos bien enfocados sobre todo atendiendo el estandar CIE-S-026:2018, está la librería de LuxPy [17] para el cálculo de parámetros de iluminación integrativa usando plataformas basadas en Phyton, donde se han desarrollado importantes funciones orientadas al análisis del espectro de iluminación, lográndose conseguir los parámetros relacionados a los foto-receptores del ojo humano, conocidos como  $\alpha$ -opics. Adicionalmente, se pueden encontrar herramientas online como CS Calculator 2.0 [13], que permite hacer un análisis circadiano de un determinado espectro y de fuentes de iluminación de referencia. Otra herramienta de mucha utilidad es Espectrum de UPTRECK, un software libre que se instala en PC para el cálculo de parámetros como EML y M/P en función de un espectro medido por un usuario o para analizar el espectro obtenido usando instrumentos como Uprteck-350.

Adicionalmente se pueden encontrar herramientas para la emulación del comportamiento de la iluminación en entornos que tengan una distribución arquitectónica y materiales definidos. Dialux y Revit son herramientas CAD que muestran cómo se comportará la iluminación fotópica y utiliza como base la fotometría de las lámparas usadas, son de las más utilizadas por arquitecturas e ingenierías, pero de momento no muestran detalles del comportamiento melanópico. Por otro lado, Rhinoceros 3D, junto con ALFA [13][25] de Solemma muestra una base de datos de cómo será el comportamiento espectral tanto horizontal en el área de trabajo, así como el comportamiento espectral melanópico en el área visual para diferentes puntos determinados del entorno. Con esta información se pueden hacer análisis más extensos y útiles al momento de determinar cómo será el comportamiento espectral de las fuentes de iluminación y los efectos tanto visuales como no visuales.

#### IV. CONTROL DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN INTEGRATIVA CENTRADA EN EL SER HUMANO

El control de los sistemas de iluminación LED es un área ampliamente explotada en investigación, por lo que se pueden encontrar muchas posibilidades de drivers LED para sistemas de iluminación alimentados desde la red de AC, o mediante DC e implementando un control basado en PWM (Pulse Width Modulation), Control Magnético (CM), etc. Por ejemplo, en [18]-[20] se presentan posibilidades de drivers LED usando convertidores DC-DC para uno o varios canales consiguiendo altos niveles de eficiencia y bajo coste. La gran mayoría de estudios en el ámbito del control de sistemas de iluminación LED en general se enfocan a la eficiencia energética, cumplimiento de estándares de fabricación, metodologías y topologías de los circuitos eléctricos de potencia, simplificación de componentes, algoritmos de control, etc. Sin embargo, existen pocos estudios y desarrollos con un concepto integral, es decir, enfocados en la iluminación integrativa considerando los efectos tanto visuales, así como no visuales tales como los definidos en CIE-S-026:2018. Entonces se abre un abanico de posibilidades de trabajos de investigación que incluyan tanto la eficiencia energética y sostenibilidad, así como los criterios de iluminación integrativa centrada en el ser humano.

En el estudio de IICSH la información principal es la distribución espectral de potencia (SPD) de la fuente de iluminación, su flujo luminoso, eficiencia luminosa y las características de reflectividad del entorno, puesto que de esto dependerán los niveles de iluminación que se conseguirán en el Área Personal del Usuario (APU). La Figura 5 muestra un esquema de los criterios y parámetros principales para el análisis de IICSH.

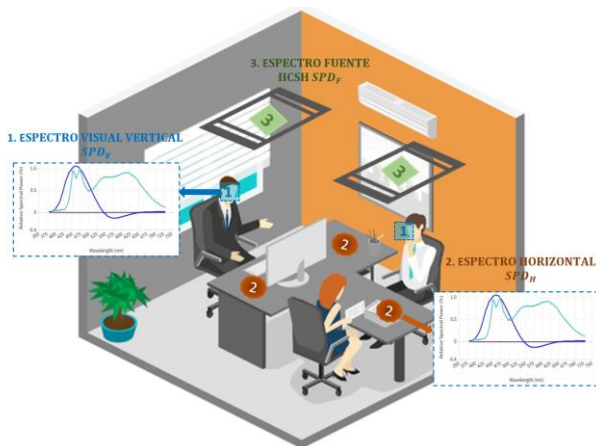


Figura 5. Esquema del concepto de IICSH

Como se puede observar, la iluminación en el área de trabajo, se denomina iluminación horizontal  $SPD_H$ , la cual está medida en  $\text{lux}/\text{m}^2$  a una altura de 0.76 m del suelo. Este punto está asociado a la mesa de trabajo en oficinas, escritorios, mesas de reuniones, mesas de talleres, etc. Por otro lado, la iluminación visual es la iluminación medida de manera vertical a una altura de 1.2 m del suelo, es decir a la altura visual de las personas sentadas en un área de trabajo. Se mide en luxes y a partir de su  $SPD_V$  se pueden calcular los parámetros conocidos como  $\alpha$ -opics descritos en CIE-S-026:2018, donde m-EDI es el protagonista y refleja la estimulación melanópica efectiva que se realizará sobre las ipRGCs. A partir de este esquema, el reto será desarrollar todas las estrategias y metodologías que por un lado permitan

conseguir una iluminación homogénea en el entorno, así como una alta calidad en la reproducción de los colores de los objetos, con una correcta regulación de flujo luminoso y potencia, para de esta manera mantener sincronizados los ritmos circadianos de las personas en cada tipo de caso de estudio.

#### V. CONCLUSIONES

Del análisis realizado acerca de los sistemas de iluminación integrativa centrada en el ser humano se determina que la iluminación melanópica, parametrizada en m-EDI es el principal parámetro utilizado para cuantificar la influencia de la luz en los ritmos circadianos y la respuesta de las ipRGCs. Entonces este parámetro es el más idóneo para utilizarlo en el diseño de iluminación biológicamente optimizada, donde se busca proporcionar una iluminación que tenga un impacto positivo en el bienestar y la salud de las personas al regular adecuadamente sus ritmos circadianos.

Aún existe mucho trabajo para integrar los nuevos conceptos relacionados a iluminación integrativa en los sofisticados sistemas de iluminación que existen actualmente. Los trabajos futuros de este estudio se pueden extender tanto a la especificación de las adecuadas fuentes de iluminación para producir espectros visibles regulados con un coherente impacto melanópico para la regulación de los ritmos circadianos, así como también al desarrollo e implementación de metodologías y algoritmos de control que permitan complementar los nuevos criterios de IICSH. Esta nueva línea de estudio y trabajo también se la podrá entender como Iluminación Integrativa Inteligente (III).

El consumo de energía de los sistemas de iluminación, las metodologías y topologías de optimización de los circuitos de control, así como los algoritmos de control sigue representando una oportunidad importante para desarrollar trabajos de investigación para sistemas de iluminación. Sin embargo, el desarrollo de nuevas metodologías centradas en el bienestar humano, usando conceptos como la iluminación circadiana, iluminación biológica o iluminación integrativa, abre un abanico amplio de posibilidades en investigación con retos claros para incluir sobre todo la mejora de la calidad de vida, seguridad, bienestar y salud de las personas.

#### REFERENCIAS

- [1] IEA, "Lighting," IEA Report, <https://www.iea.org/reports/lighting>, License: CC BY 4.0, Paris, 2022.
- [2] Hector Chinchero, et-al., "LED Lighting Systems for Smart Buildings: A Review," IET Smart Cities, vol.2, 2020.
- [3] J. Marcos Alonso, et-al., "A Review of LED Drivers and Related Technologies," IEEE Trans. Indus. Electronics, vol.64, no. 64, 2017.
- [4] Mark Rea, et-al., "Circadian Light" Journal of Circadian Rhythms," vol. 8(1):2, 2010.
- [5] Robert J. Lucas, et al., "Measuring and Using Light in the Melanopsin Age," Trends in Neurosciences, 37, pp: 1-9, CELL Press, 2014.
- [6] L.J.M Schlangen, et al., "Designing and specifying light for melatonin suppression, non-visual responses and integrative lighting solutions establishing a proper bright day, dim night metrology," Lighting Research & Technology, vol. 54, 2022.
- [7] Jazi al Enezi, et al., "A Melanopic Spectral Efficiency Function Predicts the Sensitivity of Melanopsin Photoreceptors to Polychromatic Lights," Journal of Biological Rhythms, vol 26, 2011.
- [8] M. Rossi, "Circadian Lighting Design in the LED Era," Springer, 2019.
- [9] Mark Rea, et al., "Light as a circadian stimulus for architectural lighting," Lighting Research & Technology, vol. 50, 2018.
- [10] S. Babilon, et al., "A field test of a simplified method of estimating circadian stimulus," Lighting Research & Technology, vol. 54, 2022.

- [11] William Truong, et-al., "Circadian metric – Computation of circadian stimulus using illuminance," correlated colour temperature and colour rendering index, *Building and Environment*, vol. 184, 2020.
- [12] Well Building Standard, "Well Building Standard V2," International WELL Building Institute, 2018.
- [13] N. Ildiri, et-al., "Impact of WELL certification on occupant satisfaction and perceived health, well-being, and productivity: A multi-office pre-versus post-occupancy evaluation," *Elsevier Building and Environment*, vol. 224, 2022.
- [14] CIE International Standard, "CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-influenced Responses to Light," International Commission of Illumination CIE, 2018.
- [15] MG. Figueiro, "Disruption of Circadian Rhythms by Light During Day and Night," *Curr Sleep Med Reports*, vol. 3, 2017.
- [16] T. Brown, et al., "Recommendations for Healthy Daytime, Evening, and Night-Time Indoor Light Exposure," International Commission of Illumination CIE, 2021.
- [17] K.A.G. Smet, "LuxPy: a package for lighting and color science," <https://ksmet1977.github.io/luxpy/build/html/index.html>, 2022.
- [18] J. Marcos Alonso, "LED Lighting and Drivers," Amazon KDP, 2019.
- [19] Hector Chinchero, J. Marcos Alonso, "Using Magnetic Control of DC-DC Converters in LED Driver Applications," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19 (2), 2021.
- [20] Hector Chinchero and J. M. Alonso, "Using Magnetic Control of DC-DC SIMO Converters in LED Driver Applications," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2020.
- [21] F. García-Estañ, "Calidad del Ambiente Interior en el Trabajo," Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, Madrid, 2022.
- [22] United Nations, "Dark and Quiet Skies for Science and Society," ONU Report and recommendations, USA, 2020.
- [23] Guyton y Hall., "Neurofisiología central de la visión," *Fisiología Médica*, Elsevier, 2021.
- [24] J. Corbet, J. Chen, "Sistema Visual," *Principios de Neurociencia, Aplicaciones Básicas y Clínicas*, Elsevier, 2019.
- [25] Solemma, "ALFA Adaptive Lighting for Alertness," <https://www.solemma.com/alfa>, Solemma LLC, USA, 2023.