



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diseño de una herramienta de cálculo de iluminación basada en el estímulo de los ritmos circadianos.

Holman Enrique Cubides Garzón

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2022

Diseño de una herramienta de cálculo de iluminación basada en el estímulo de los ritmos circadianos.

Holman Enrique Cubides Garzón

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Automatización Industrial

Director (a):

Ph.D. Jesús María Quintero Quintero



Línea de Investigación:

Iluminación

Grupo de Investigación:

MATISSE

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y electrónica

Bogotá D.C., Colombia

2022

(Dedicatoria)

A mis padres

*Por ser pilares de mi vida. A ellos con
gratitud, por su amor y sacrificio.*

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Holman Enrique Cubides Garzón

28 de agosto de 2022

Bogotá D.C.

Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis, PhD Jesús María Quintero Quintero, quien desde su conocimiento y experiencia fue un apoyo constante en todo el proceso y desarrollo de esta tesis.

A mi prometida Andrea Rosales, quien me motivó en los días de agobio y estrés. Sus palabras sinceras y de apoyo, fueron la chispa de avance de este trabajo.

A todos los que me aconsejan y ofrecen palabras sinceras y aprecio constantemente, gracias.

Resumen

La forma más común en que los ritmos circadianos de las diferentes funciones del cuerpo humano se sincronizan es con los ciclos día - noche de la luz natural. Cuando se rompe esta sincronización puede conllevar a cambios físicos, mentales y de conducta en los seres humanos. Los sensores de luz en la retina envían dos tipos de señales: una que llega a la corteza visual del cerebro y proporciona el sentido de la visión. Otra generada por el tejido ganglionar de la retina que llega al núcleo supraquiasmático en el cerebro, el cual usa la glándula pineal para dicha sincronización. La luz que llega al núcleo supraquiasmático se le denomina luz circadiana efectiva. Por esta razón la luz percibida a lo largo del día (sea de origen solar o eléctrico), contribuye al arrastre (sincronización o des-sincronización) de los ciclos circadianos. Uno de los ciclos circadianos más evidente en el cuerpo humano es el de vigilia - sueño, el cual está regulado a la secreción de la hormona melatonina; Es por esto que es muy importante el tipo de iluminación al que están sometidas las personas que trabajan en ambientes donde no hay iluminación natural. La iluminación melanópica tiene en cuenta el efecto que puede producir en el estímulo circadiano para generar un correcto arrastre o sincronización de los ciclos circadianos en los usuarios de dicha iluminación.

La medición del estímulo circadiano está siendo utilizada a nivel mundial en numerosos trabajos de investigación y diseño. Un ejemplo es la aplicación en hospitales que estudian la enfermedad del alzhéimer e iluminación en oficinas. Varias investigaciones han demostrado que el espectro, el nivel de luz y el tiempo de exposición a una fuente de luz puede adelantar o retrasar nuestro reloj biológico influenciando así el sistema circadiano.

El objetivo principal de este trabajo es exponer la herramienta de cálculo de iluminación basada en el estímulo circadiano desarrollada. La implementación de la herramienta de cálculo en el diseño de iluminación plantea la necesidad de inclusión de características espectrales o colorimétricas como la temperatura de color (CCT) y Duv. La herramienta

permite también la comparación con otros estándares para el cálculo del estímulo circadiano.

Con el uso de la herramienta de cálculo del Estímulo Circadiano (CS), se encontró que a partir del cambio de espectro de una fuente de luz LED de 4 canales, se pueden lograr valores de estímulo circadiano CS adecuados para cualquiera de los horarios establecidos según recomendación UL. Se encontró que el valor de CS es muy sensible a la configuración del CERC (contribución espectral de la respuesta circadiana) dada por variaciones muy pequeñas en el Duv de la fuente de iluminación. De igual manera se evidenció que contrario a lo que se esperaría, existen configuraciones espectrales con CERC cálido que inducirían estímulo circadiano para generar estado de alerta, y espectros con CERC frío serían capaces de reducirlo. En el caso de estudio del diseño de iluminación, se logró cumplir con el estándar UL24480 gracias al ajuste de SPD con iluminación dinámica. Por último, se compararon los estándares actuales de iluminación circadiana con el fin de evaluar las diferencias y similitudes en pro de establecer un criterio de diseño adecuado que contemple dichos estándares.

Palabras clave: Estímulo circadiano, Efectos no visuales de la luz, Guía de diseño UL24480, Visión melanópica, Ritmos circadianos, Melanopsina, Melatonina, Luz circadiana.

Abstract

Design of a lighting calculation tool based on the stimulation of circadian rhythms.

The most common way in which the circadian rhythms of the different functions of the human body are synchronized with the day-night cycles of natural light. When this synchronization is broken it can lead to physical, mental and behavioral changes in human beings. Light sensors in the retina send two types of signals: one that reaches the visual cortex of the brain and provides the sense of vision. Another generated by the retinal ganglion tissue that reaches the suprachiasmatic nucleus in the brain, which uses the pineal glands for that function. The light that reaches the suprachiasmatic nucleus is called effective circadian light. For this reason, the light perceived throughout the day (whether of solar or electrical origin), contributes to the entrainment (synchronization or de-synchronization) of the circadian cycles. One of the most evident circadian cycles in the human body is the wake-sleep cycle, which is regulated by the secretion of the hormone melatonin; This is why the type of lighting to which people who work in environments where there is no natural lighting is very important. Melanopic lighting takes into account the effect that it can produce on the circadian stimulus to generate a correct entrainment or animation of the circadian cycles in the users of that lighting.

The measurement of the circadian stimulus is being used worldwide in numerous research and design works. An example is the application in hospitals that study Alzheimer's disease and lighting in offices. Several investigations have shown that both the biological spectrum and the light level of a light source and the time of exposure can advance or delay our clock, thus influencing the circadian system.

The main objective of this work is to expose the lighting calculation tool based on the developed circadian stimulus. The implementation of the calculation tool in lighting design

raises the need to include spectral or colorimetric characteristics such as color temperature (CCT) and Duv. The tool also allows the comparison with other standards for the calculation of the circadian stimulus.

With the use of the Circadian Stimuli (CS) calculation tool, it was found that with the spectrum change of a 4-channel LED light source, appropriate CS circadian stimulus values can be achieved for any of the schedules established according to UL recommendation. It was found that the value of CS is very sensitive to the configuration of the CERC (circadian response spectral contribution) given by very small variations in the Duv of the light source. Similarly, it was shown that contrary to what would be expected, there are spectral configurations with warm CERC that would induce circadian stimulation to generate alertness, and spectra with cold CERC would be able to reduce it. In the lighting design case study, compliance with the UL24480 standard was achieved by adjusting the SPD with dynamic lighting. Finally, the current circadian lighting standards were compared in order to evaluate the differences and similarities in order to establish an adequate design criterion that contemplates some standards.

Keywords: Circadin stimulus, non-visual effects of light, Design guide UL24480, Melanopic visión, Circadian Rhythms, Melanopsin, Melatonin, Circadian light.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Conceptos y principios básicos de percepción de la luz..... | 27 |
| 1.1 La luz..... | 27 |
| 1.2 El color..... | 27 |
| 1.3 El ojo humano | 29 |
| 1.4 Unidades Radiométricas y fotométricas | 32 |
| 1.4.1 Unidades Radiométricas | 32 |
| 1.4.2 Unidades Fotométricas | 33 |
| 1.5 Radiación de cuerpo negro y temperatura de color | 34 |
| 1.6 Fundamentos básicos de iluminación..... | 37 |
| 1.6.1 Iluminancia y uniformidad..... | 37 |
| 1.6.2 Temperatura de color: | 38 |
| 1.6.3 Aporte de luz diurna | 39 |
| 1.6.4 Eficacia y eficiencia luminosa..... | 39 |
| 1.6.5 Aspectos importantes del software de diseño de iluminación SDI..... | 41 |
| 1.7 Fuentes de Luz..... | 41 |
| 1.8 Iluminantes | 42 |
| 1.9 Características LED 4 canales..... | 43 |
| 1.10 Cálculo del estímulo circadiano #1: CLA..... | 45 |
| 1.11 Cálculo del estímulo circadiano #2: Equivalente Melanópico en luxes EML | 52 |
| 1.12 Cálculo del estímulo circadiano #3: método simplificado con funciones armónicas de color..... | 54 |
| 1.13 Cálculo del estímulo circadiano #4: método CIE S026 E2018 | 56 |
| 2. Introducción..... | 59 |
| 2.1 Antecedentes | 61 |
| 2.2 Eficiencia aplicada a la iluminación - LAE..... | 63 |
| 2.3 Estándares del Estímulo Circadiano CS | 64 |
| 2.3.1 Guía de diseño de iluminación UL - DG 24480 | 66 |
| 2.3.2 Estándar Diseño de iluminación circadiana - Well..... | 68 |
| 2.3.3 Sistema de metrología de radiación óptica para respuestas a la luz influenciadas por ipRGCs - Estándar CIE S026 E:2018 | 70 |
| 3. Desarrollo e Implementación de herramienta de cálculo del estímulo Circadiano - CS | 72 |
| 3.1 Diagrama de flujo del desarrollo de la herramienta de cálculo de CS..... | 72 |
| 3.2 Características | 77 |
| 3.2.1 Uso de la herramienta de cálculo de CS | 79 |
| 3.2.2 Guía propuesta para diseño de iluminación circadiana dinámica | 82 |

| | |
|--|------------|
| 4. Caso de Estudio | 85 |
| 4.1 Preliminares de diseño..... | 85 |
| 4.2 Cálculo de CS en iluminación nocturna..... | 89 |
| 4.3 Cálculo de CS en Iluminación diurna..... | 93 |
| 4.4 Cálculo de CS con iluminación dinámica | 97 |
| 5. Resultados y discusión | 105 |
| 5.1 Ajuste de SPD en SDI..... | 105 |
| 5.2 CERC dados CCT y Duv de la fuente de iluminación | 105 |
| 5.3 Comparativo de métodos | 110 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones | 115 |
| 6.1 Conclusiones..... | 115 |
| 6.2 Recomendaciones y trabajos futuros | 116 |
| Bibliografía | 118 |
| A. Anexo: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores y otras | 124 |

Lista de figuras

- Figura 1-1: Espectro electromagnético. Se extiende desde la radiación de menor longitud de onda como los rayos Gama, pasando por los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda que son las ondas de radio. 27
- Figura 1-2 : Experimento de Newton. Un haz de luz solar atraviesa el prisma, que divide o refracta la luz blanca en sus colores constituyentes. 28
- Figura 1-3: Espectro del color visible. Los colores espectrales puros con colores monocromáticos; su espectro se extiende de 380 nm a 780 nm. 28
- Figura 1-4: Esquema del ojo humano. 29
- Figura 1-5 :Distribución de conos y bastones en la retina a lo largo del plano horizontal a través de la fóvea. La presencia de bastones empieza en un ángulo de 4 grados de la fóvea central. La fóvea central contiene la mayor cantidad de conos. 30
- Figura 1-6 :Sensibilidad espectral de la visión fotópica $V\lambda$ y visión escotópica $V\lambda'$. La sensibilidad espectral de conos L +M representada por $V\lambda$ con un pico de sensibilidad de 554 nm. La sensibilidad espectral de bastones representada por $V\lambda'$ con un pico de sensibilidad de 508 nm. 31
- Figura 1-7: Función de radiancia espectral de cuerpo negro y ley de Wien. Cuando la temperatura de un radiador de cuerpo negro aumenta, toda la energía irradiada aumenta y el pico de la curva de radiación se mueve a longitudes de onda más cortas. El producto entre la longitud de onda pico y la temperatura, es una constante. Esta relación es llamada la ley de desplazamiento de Wien. 35
- Figura 1-8: Diagrama de cromaticidad. Establecido en 1931 por la CIE definiendo los 3 colores primarios que a partir de la síntesis aditiva de color forman todos los demás colores. En este modelo X es una mezcla tendiente a la curva de sensibilidad del rojo al verde (conos L y M), Y significa luminosidad y Z es aproximadamente igual al estímulo de azul (conos S). 36

Figura 1-9 Eficacias luminosas: LES y LER. No toda la energía eléctrica consumida por la fuente de luz (bombilla, fluorescente, etc.) es transformada en luz visible. El Driver, encargado de transformar la tensión que se entrega a la fuente de luz, tendrá ciertas pérdidas de potencia percibidas en calor. La fuente de luz dependiendo de su construcción también tiene ciertas pérdidas de energía. La eficiencia será la relación entre la energía recibida y la energía finalmente transformada. 40

Figura 1-10: SPD de algunos iluminantes característicos. Los datos de los iluminantes estándar no han cambiado desde CIE 15.2-1986; algunos ejemplos de espectro de luz monocromática. 42

Figura 1-11 Fotografías de LEDs RGB, RGBW y RGBA. Este tipo de fuentes de luz cuenta con 3 o más LEDs encapsulados, cada uno con un color de luz diferente. Los pines normalmente son, un ánodo para cada color y un cátodo común. La alimentación en cada ánodo permite la combinación de color variando su intensidad. 43

Figura 1-12 Comparativo de aumento de eficiencia de conversión de energía a través de los años según color de LED medidas a 25°C y 35 Acm^2 . Se aprecian curvas ajustadas según datos históricos experimentales. Diferirán de algunos productos comerciales, especialmente aquellos que manejan drivers con densidades de corriente baja. 44

Figura 1-13 Comparativo de eficacia luminosa de fuentes LED de contenido de fósforo a través del tiempo. Curvas de LEDs blanco cálido (300-3500 K) y blanco frío (5700 K), además de las eficiencias hipotéticas para LEDs de mezcla de color 4000K. para el año 2020 los productos comerciales alcanzan 185 lm/W y 165 lm/W de LEDs de temperatura blanco frío y blanco cálido respectivamente. 45

Figura 1-14 :Esquema de la estructura de la retina en el ojo humano. Ilustración simplificada de conexiones sensoriales enfatizando enlaces de los fotorreceptores y las células ganglionares con interneuronas que relacionan los dos tipos de células. 46

Figura 1-15: sensibilidad espectral relativa de los fotorreceptores del ojo humano. Curvas de sensibilidad adoptadas para cálculo de CS. Picos de sensibilidad de Conos S 450nm, ipRGCs 484 nm, bastones 506nm y conos L+M 556 nm. 47

Figura 1-16 :Representación eléctrica del modelo del estímulo circadiano. Señales de entrada S y L+M que representan el estímulo a los conos (fotorreceptores) que llevan el mismo nombre. Bastones (R) y ipRGCs , interactúan también en el modelo generando a la salida una señal CS. 48

| | |
|--|----|
| Figura 1-17: Modelo de representación de la neurofisiología y neuroanatomía de la fototransducción circadiana | 49 |
| Figura 1-18 :Sensibilidad Espectral melanópica. Diferencia de valores de sensibilidad dados los resultados de ensayo de laboratorio con y sin filtro del lente cristalino que provoca picos de sensibilidad de 484 y 490 nm. | 53 |
| Figura 1-19: Funciones armónicas de color. La CIE 1971 redefinió los valores de la CIE 1931. | 54 |
| Figura 2-1 Recomendaciones para exposiciones a luz melanópica en relación con la sensibilidad de supresión de melatonina, reinicio de fase circadiana y respuestas de alerta subjetiva en pacientes. Datos derivados de estudios de laboratorio en humanos sin el uso de dilatadores de pupila. | 70 |
| Figura 3-1 Diagrama de flujo de guía de diseño de iluminación circadiana efectiva propuesta. Los bloques representan los pasos para lograr la implementación de un proyecto de iluminación circadiana dinámica. | 73 |
| Figura 3-2 Diagrama de flujo programa principal. El desarrollo en python implica el uso de librerías para manejo de los datos ingresados como constantes y matrices. La herramienta de cálculo solicita información al usuario como escogencia de SPD, iluminancia medida o CS requerido. Otros bloques como subprogramas, impresión de resultados de cálculo y gráficas componen cada uno de los diagramas. | 74 |
| Figura 3-3: Diagrama de flujo subprograma: Obtenerinfo | 75 |
| Figura 3-4: Diagrama de flujo subprograma: CalculoCLA | 75 |
| Figura 3-5: Diagrama de flujo subprograma: Calculoxyz | 76 |
| Figura 3-6: Diagrama de flujo subprograma: CalculoCLAdCS | 76 |
| Figura 3-7: Diagrama de flujo subprograma: BuscandoEv | 77 |
| Figura 3-8: Herramienta de cálculo de CS: Paso 1. La selección como lista desplegable del SPD por defecto o un SPD ajustado por el usuario. | 80 |
| Figura 3-9: Herramienta de cálculo: entrada de Ev medido. La herramienta calcula el CS a partir de la iluminancia vertical medida y el SPD seleccionado. | 80 |
| Figura 3-10: Herramienta de cálculo de CS: entrada de CS deseado. Calcula la iluminancia vertical que debe ser medida en el área y con la cual se garantiza el CS deseado a partir del espectro seleccionado. | 81 |
| Figura 3-11 Esquema de ajuste de espectro según hora del día. Representación gráfica del funcionamiento de la iluminación dinámica. Los tres horarios de control de CS | |

recomendados por (Laboratories, 2019), dan la pauta para ajustes del espectro de iluminación según hora del día. 82

Figura 3-12 Proceso de diseño de iluminación dinámica aplicado al área de trabajo (oficina líder) del caso en estudio del capítulo 4. Los valores característicos de iluminación presentados fueron calculados con la herramienta de cálculo de estímulo circadiano recomendada a partir de los valores calculados con el SDI y el SPD. 84

Figura 4-1: Diseño de iluminación de laboratorio de muestras médicas. Se distinguen diferentes temperaturas de color debido a los SPD ajustados. El laboratorio de muestras médicas contiene oficinas, áreas de trabajo de procesamiento de muestras, zonas comunes, guardarropas, etc. Cada zona obtuvo características de iluminación específicas. 85

Figura 4-2 Diseño de iluminación zonas microscopía y microbiología. Iluminación nocturna de áreas de procesamiento de muestras y puestos de trabajo. Las paredes en su mayoría, tienen ventanales que permiten la visibilidad de otras áreas contiguas. 86

Figura 4-3: Potencia Total por Área [W]. valores de consumo unitario por luminaria de espectro fijo y según cantidad de luminarias por área. Las luminarias con mayor consumo están instaladas en las zonas más que requieren iluminancia para zonas de trabajo. 88

Figura 4-4: Iluminancias en plano útil (0.85m) zonas de trabajo: intermedio. Los valores de iluminancia máxima y mínima según los valores adoptados de RETILAP. Iluminancias medias se mantienen dentro del umbral y garantizan la uniformidad, CRI y UGR. 89

Figura 4-5: Iluminancias en plano útil (0.85m) zonas de trabajo: pesado. Los valores de iluminancia máxima y mínima según los valores adoptados de RETILAP. Iluminancias medias se mantienen dentro del umbral y garantizan la uniformidad, CRI y UGR. 90

Figura 4-6 : Iluminancias en plano útil (0.85m) áreas generales. Las áreas generales fueron provistas de fuentes de iluminación de flujo menor para estar dentro del umbral de iluminancia requerida por norma. 90

Figura 4-7 : Uniformidad de Iluminación en áreas. Se garantizaron uniformidades superiores al 0.5. 91

Figura 4-8: Clasificación CS Nocturno. Una fuente de luz LED de espectro fijo no garantizó estímulos circadianos acordes para iluminación nocturna. La mayoría de los valores de CS estuvieron por encima de la recomendación UL. 92

Figura 4-9: CERC frío para LED con CCT 4000 K. SPD de fuente de luz instalada en el estudio de iluminación de espectro fijo. 92

Figura 4-10 :CLD: cociente de luz diurna. Los valores por encima de 0 indican que las áreas tienen aporte de luz diurna. Las áreas con mayor aporte de luz diurna cuentan con entrada de luz solar directamente de la fachada del edificio. 93

Figura 4-11 :Iluminancia Vertical con aporte de Luz día. Escenas de luz creadas dentro de el SDI con variaciones en cantidad de iluminarias encendidas según la hora del día. Los cambios bruscos de iluminancia en algunas zonas se deben al apagado de luminarias para lograr controlar la iluminancia provocada por el ingreso de luz solar. La ubicación geográfica de las zonas del edificio también influyó en la iluminancia según el horario. 94

Figura 4-12 :Clasificación CS Horario Diurno. Muchas zonas tienen estímulo circadiano inadecuado(bajo) según UL. Las zonas con aporte de luz día tienen valores de CS adecuado, gracias al estímulo del SPD de luz día. 95

Figura 4-13 :clasificación CS Horario Vespertino. Estímulo circadiano alto en el horario vespertino provoca la producción de Melanopsina, generando el estado de alerta permanente en las personas. 96

Figura 4-14 :Porcentaje de luminarias activas en horario vespertino por zona. La configuración de escenas de luz para apagado de iluminarias innecesarias en horario vespertino, no logró reducir el estímulo circadiano alto. Zonas con 100% de iluminación artificial, lograron sin embargo garantizar estímulos circadianos adecuados. 97

Figura 4-15 valores LES [lm/W] para diferentes luminarias RGBA del mercado. marcas comerciales como COOPER y OSRAM permiten la descarga de fichas técnicas de fuentes de iluminación. Los valores de LES difieren dado el tipo de luminaria, fabricación y potencia. 98

Figura 4-16: Valores de CS según CCT y Duv para E_v 163 lux. Se mantuvo fija una iluminancia de 163 lux con la cual una fuente de luz 4LED de 3500 K y Duv 0 logra generar un CS de 0.1, el CS más bajo en comparación con otros SPD. Se aprecian dos variaciones de CS significativas según configuraciones de espectro de 3400 a 3500 K con Duv de 0 y 3800 a 3900 K con Duv 0.0063. 99

Figura 4-17 E_v vertical según hora del día en áreas con $CS < 0.3$ en horario diurno. 102

Figura 4-18: Valores de CS según CCT y Duv para E_v vertical 235 lux. Una iluminancia mínima de 235 lux garantiza estímulo circadiano adecuado para iluminación diurna con un espectro 4LED de 3800 K y Duv 0.0063. 103

Figura 5-1: Análisis de cambio de CERC frío y cálido con pequeñas variaciones de Duv. Comparativo de clasificación de CERC para un 4LED RGB de 3500 K con valores de Duv

- de 0, 0.00632 y -0.00407. Los cambios de CERC se debieron al cambio del contenido de longitudes de onda media y corta. 106
- Figura 5-2 : Comparativo de espectros con mayor reducción de CS en el horario nocturno según Tabla 4-1. Espectros de CERC frío lograron aportar valores de estímulo circadiano menores a 0.1 con mayor facilidad que espectros de CERC cálido. Las diferencias de SPD se vieron más pronunciadas en el aporte de longitudes de onda media. 107
- Figura 5-3 Comparativo de CERC para espectro de 3800K según Duv. Variaciones pequeñas del Duv permitieron el cambio de CERC frío y cálido. El espectro que garantizó la obtención de CS adecuados para el horario diurno fue un SPD de CERC cálido. 108
- Figura 5-4 : Comparativo de espectros con mayor aumento de CS para el horario diurno según Tabla 4-4 108
- Figura 5-5 Potencia por LED en luminarias RGBA según CCT. Aumento en el CCT produce disminución en el consumo de potencia de los colores cálidos, rojo y amarillo. Los mayores consumos de potencia se tienen para los LED amarillo y verde, seguidos por rojo y por último el azul. La potencia consumida dependerá de varios factores como LES, aporte de cada LED al espectro 4 LED, etc. 109
- Figura 5-6 Comparativo CS: CLA vs método simplificado según CCT 110
- Figura 5-7 Comparativo de cálculos de CS por CLA y por método simplificado 111
- Figura 5-8 Comparativo equivalente melanópico calculado para métodos WELL y CIE S026 (valores máximos para CCTs de 3300 a 3900 K) 112

Lista de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1-1: Índice UGR máximo y niveles de iluminancia para diferentes áreas y actividades | 38 |
| Tabla 1-2: Tipo de fuentes luminosas de la sección en función de sus características de color y CRI. (Tomado de la tabla 200.3.4 RETILAP 2010) | 38 |
| Tabla 1-3 :Fotopigmentos relacionados | 57 |
| Tabla 2-1 :Respuestas del organismo expuesto a malas condiciones de iluminación. Tomado de (Houser & Esposito, 2021) | 62 |
| Tabla 2-2 Valores de estímulo circadiano recomendados para propiciar iluminación adecuada a humanos. Los valores han sido adoptados a partir de ensayos de laboratorio de acuerdo con la producción de Melanopsina en humanos. La producción de Melanopsina genera el estado de alerta en las personas. | 65 |
| Tabla 4-1: Espectros recomendados para reducción de CS en horario nocturno. Valor CS dado para una iluminancia vertical fija de 163 lux. | 100 |
| Tabla 4-2 valores de corriente y características de configuración de fuentes de iluminación RGBA para reducción de valores CS en horario nocturno | 100 |
| Tabla 4-3: Áreas con mayor E_v Vertical | 101 |
| Tabla 4-4 : Espectros recomendados para Aumento de CS en horario diurno. Valor CS dado para una iluminancia vertical fija de 235 lux. | 103 |
| Tabla 4-5 valores de corriente y características de configuración de fuentes de iluminación RGBA para aumento de valores CS en horario diurno. | 104 |
| Tabla 5-1: Factor de corrección de flujo luminoso $k_{\phi SPD}$ para diferentes espectros con 4LED. | 105 |
| Tabla 5-2 : Comparativo de valores de estímulo circadiano para diferentes espectros 4LED RGB | 113 |
| Tabla 5-3: Clasificación de estímulo circadiano según E_v y espectro dado por la configuración de CCT y Duv. | 113 |

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término | Unidad | Definición |
|-------------|---|--------------------------|--|
| A | Área | m^2 | |
| a_{b-y} | Constante de representación y características dinámicas de conos L+M | N/A | 0.7 |
| a_{rod} | Constante de representación y características dinámicas de bastones | N/A | 3.3 |
| c | Velocidad de la luz | $\frac{m}{s}$ | $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ |
| CL_A | Luz Circadiana (Circadian Light) | $\frac{W}{m^2}$ | Sección 1.10 |
| CLD | Cociente de luz día | % | Sección 1.6 |
| CS | Estímulo Circadiano | % | Ec. 1-21 |
| D_{uv} | Distancia de un punto de color de luz a la curva de cuerpo negro | N/A | Sección 1.5 |
| E | Irradiancia | $\frac{W}{m^2}$ | Ec. 1-1 |
| E_λ | Irradiancia espectral | $\frac{W}{m^2 nm}$ | Ec. 1-3 |
| E_v | Iluminancia | lux o $\frac{lm}{m^2}$ | Ec. 1-7 |
| EML | Equivalente Melanópico en luxes | lux | Ec. 1-24 |
| FEM | Factor de eficiencia melanópica | N/A | Ec. 1-22 |
| h | Constante de Planck | $\frac{J}{s}$ | $6.62607015 \times 10^{-34} \frac{J}{s}$ |
| I_v | Intensidad luminosa | cd o $\frac{lm}{sr}$ | Ec. 1-9 |
| k_B | Constante de Boltzmann | $\frac{J}{K}$ | $1.3806488 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ |
| k_{CIE} | Factor de multiplicación estándar CIE CIE S026 E2018 | $\frac{W}{m^2}$ | Ec. 1-37 |
| K_{FEM} | Constante de normalización de curvas melanópica y fotópica observador de 2° | N/A | 1.22 |
| k_{itl} | Factor de conversión de irradiancia melanópica a unidades fotométricas | $\frac{lm}{W}$ | Ec. 1-25 |

| Símbolo | Término | Unidad | Definición |
|------------------|---|-----------------------|--|
| k_{LM} | Constante de interacción entre fotorreceptores | N/A | 0.2616 |
| k_{xyz} | Constante de normalización para valores triestímulo | N/A | Ec. 1-29 |
| $k_{\phi SPD}$ | Factor de corrección de flujo luminoso para cambio de espectro en Dialux | N/A | Ec.4-2 |
| L | Radiancia | $\frac{W}{m^2 sr}$ | Ec. 1-4 |
| L_{λ} | Radiancia espectral | $\frac{W}{m^2 sr nm}$ | Ec. 1-5 |
| LAE | Eficiencia aplicada a la iluminación (lighting application efficiency) | N/A | Sección 2.2 |
| LER | Eficacia luminosa de la radiación (Luminous efficacy of radiation) | $\frac{lm}{W}$ | Ec. 1-13 |
| LES | Eficacia luminosa de la fuente (Luminous efficacy of source) | $\frac{lm}{W}$ | Ec. 1-15 |
| Mel_{λ} | Sensibilidad espectral Melanópica corregida para la transmitancia del lente cristalino con pico en 484 nm | N/A | ANEXO: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores |
| $Mel_{2\lambda}$ | Sensibilidad espectral Melanópica sin corrección del lente cristalino con pico en 490 nm | N/A | ANEXO: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores |
| mp_{λ} | Transmitancia del pigmento macular | N/A | |
| P | Potencia eléctrica | W | |
| P_{λ} | Potencia óptica espectral de la fuente de luz | W | |
| RodSat | Constante de saturación media de los bastones | $\frac{W}{m^2}$ | $6.5215 \frac{W}{m^2}$ |
| S_{λ} | Sensibilidad espectral del cono S | N/A | ANEXO: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores |
| T | Temperatura | K o °C | |
| t | Tiempo | s | |
| V_{λ} | Sensibilidad espectral relativa de la visión fotópica para el observador de 10 grados con pico en 554 nm | N/A | ANEXO: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores |
| $V_{2\lambda}$ | Sensibilidad espectral relativa de la visión fotópica para el observador de 2 grados con pico en 556 nm | N/A | ANEXO: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores |
| V'_{λ} | Sensibilidad espectral de la Visión escotópica con pico en 506 nm | N/A | ANEXO: Tablas de sensibilidad espectral de los fotorreceptores |

| Símbolo | Término | Unidad | Definición |
|-----------|-------------------------------------|--------|--------------|
| X | Valor triestímulo X | N/A | Ec. 1-26 |
| \bar{x} | Función armónica de color \bar{x} | N/A | Sección 1.12 |
| Y | Valor triestímulo Y | N/A | Ec. 1-27 |
| \bar{y} | Función armónica de color \bar{y} | N/A | Sección 1.12 |
| Z | Valor triestímulo Z | N/A | Ec. 1-28 |
| \bar{z} | Función armónica de color \bar{z} | N/A | Sección 1.12 |

Símbolos con letras griegas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|-----------------|---|----------------------------|---------------|
| α_{opic} | Sensibilidad espectral de fotorreceptor | N/A | Sección |
| η_s | Eficiencia de la fuente | % | Ec. 1-14 |
| λ | Longitud de onda | nm | Sección 1.1 |
| Φ_R | Flujo radiante | $W \text{ o } \frac{J}{s}$ | Sección 1.4.1 |
| Φ_V | Flujo luminoso | $lm \text{ o } cd * sr$ | Ec. 1-6 |
| π | Constante Pi | N/A | 3.14159265 |

Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|-------------|---|
| $b - y$ | Canal de colores oponentes Azul - Amarillo |
| CCT | Temperatura de color correlacionada |
| CIE | Comisión Internacional de la iluminación (Commission Internationale de l'éclairage) |
| AII | Célula amacrina AII |

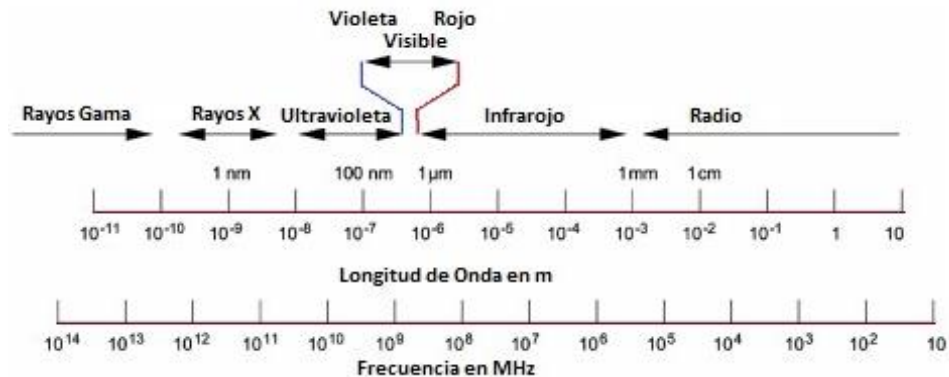
| Abreviatura | Término |
|-----------------------|---|
| <i>A18</i> | Célula amacrina A18 |
| <i>CERC</i> | Contribución espectral relativa de la respuesta circadiana |
| <i>CL_A</i> | Luz circadiana (Circadian Lighting) |
| <i>CLD</i> | Cociente de luz diurna |
| <i>CRI</i> | Índice de reproducción de color |
| <i>CS</i> | Estímulo circadiano (Circadian Stimulus) |
| <i>eb</i> | Señal de excitación color azul |
| <i>er</i> | Señal de excitación en los bastones |
| <i>ey</i> | Señal de excitación color Amarillo |
| <i>FM</i> | Factor de mantenimiento |
| Abreviatura | Término |
| <i>ipRCGs</i> | Células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles |
| <i>L</i> | Conos Largos |
| <i>LED</i> | Diodo emisor de luz (Light emitting Diode) |
| <i>3LED</i> | Diodo emisor de luz de 3 canales (RGB) |
| <i>4LED</i> | Diodo emisor de luz de 4 canales (RGBA o RGBW) |
| <i>M</i> | Conos Medios |
| <i>máx</i> | máximo |
| <i>med</i> | medio |
| <i>min</i> | mínimo |
| <i>rb</i> | Bastones bipolares |
| <i>RETILAP</i> | Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público |
| <i>S</i> | Conos Cortos |
| <i>SCN</i> | Núcleo supraquiasmático (Suprachiasmatic Nucleus) |
| <i>SDI</i> | Software de diseño de iluminación |
| <i>sr</i> | estereorradián |
| <i>UGR</i> | Índice de deslumbramiento unificado (Unified Glare Rating) |
| <i>UL</i> | Underwriters Laboratories |

1. Conceptos y principios básicos de percepción de la luz

1.1 La luz

Ondas electromagnéticas que pueden contener diferentes longitudes de onda λ y frecuencias dentro de un rango conocido como el espectro electromagnético. El ojo detecta solo un estrecho rango de ondas electromagnéticas que es la luz visible.

Figura 1-1: Espectro electromagnético. Se extiende desde la radiación de menor longitud de onda como los rayos Gama, pasando por los rayos X, la radiación ultravioleta, la luz visible y la radiación infrarroja, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda que son las ondas de radio.



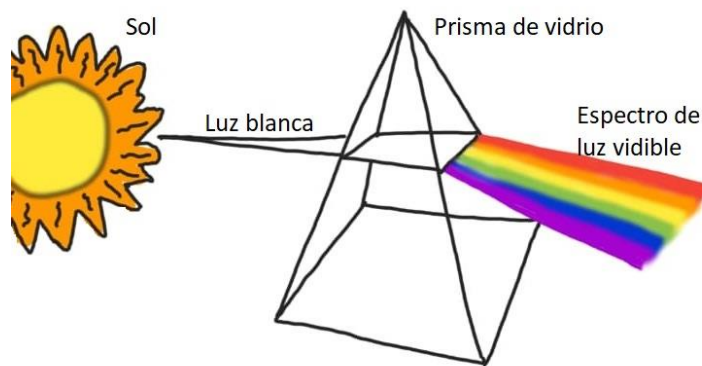
Fuente: Adaptado de Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications, Second Edition 2011.

1.2 El color

Lo que conocemos como color es lo que percibimos con las diferentes longitudes de onda de luz. La dispersión de la luz en vidrio o agua y la difracción, producen la percepción del

color. La interacción de la luz con los materiales de los objetos también genera la percepción del color. Un objeto iluminado puede Transmitir, reflejar, dispersar o absorber la luz, ejemplo de esto se aprecia en la Figura 1-2. El color de una luz puede cambiar con cualquiera de estos 4 procesos ya que no todas las longitudes de onda pueden ser Transmitidas, reflejadas, dispersadas o absorbidas por igual.

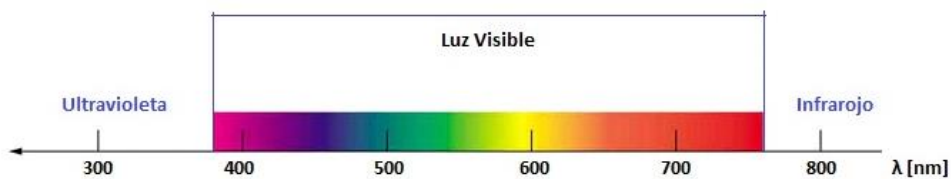
Figura 1-2 : Experimento de Newton. Un haz de luz solar atraviesa el prisma, que divide o refracta la luz blanca en sus colores constituyentes.



Fuente propia.

En el espectro visible representado en la Figura 1-3, vemos como las longitudes de onda corta son percibidas como “azules”, las longitudes de onda media “verde” y longitudes de onda más larga “rojo”.

Figura 1-3: Espectro del color visible. Los colores espectrales puros con colores monocromáticos; su espectro se extiende de 380 nm a 780 nm.

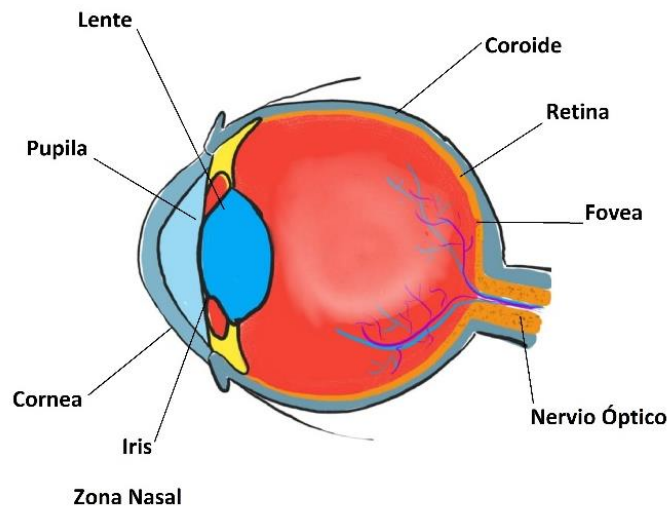


Fuente propia

1.3 El ojo humano

El ojo humano ha sido investigado por muchos años y en el siglo XXI continúa en estudios dentro de lo que llamamos los efectos no visuales. El ojo es un mecanismo equipado con diferentes células que en conjunto forman la visión. Un estímulo luminoso es producido cuando la luz entra en el ojo, dicho estímulo está fuertemente ligado a la longitud de onda. La luz llega a la retina y es absorbida por los fotopigmentos encontrados en conos y bastones.

Figura 1-4: Esquema del ojo humano.



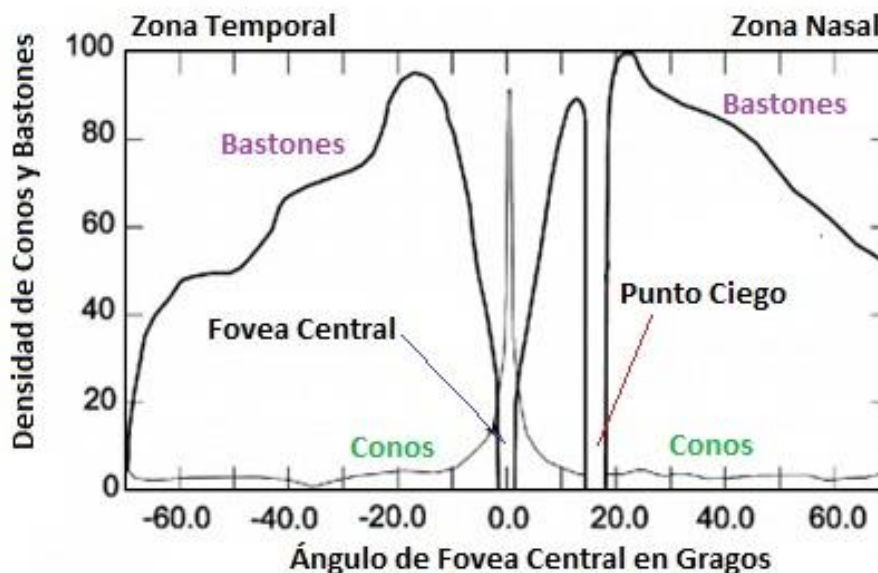
Fuente propia.

Las partes del ojo más importantes para este estudio se describen a continuación:

- a. La pupila es el mecanismo que permite la entrada de luz al ojo y que incrementa o decrecienta su tamaño dependiendo de la cantidad de luz. Su diámetro promedio va de 3.5 a 4mm, con poca luz su diámetro puede ser de 6 a 8 mm, con mucha luz su diámetro mínimo oscila entre 1 y 2 mm.
- b. El lente, también llamado lente cristalino, puede ser modificado (cambiar su forma, acomodación) por medio de los músculos ciliares; así, incrementa su potencia(acomodación) para enfocar objetos cercanos, y relaja su forma para enfocar objetos distantes.

- c. La Fóvea, con su composición representada en la Figura 1-5, es una zona pequeña en el ojo, muy cercana al eje óptico y en la cual la retina se vuelve más delgada. A diferencia de la retina, la Fóvea únicamente contiene conos en una matriz densa y aleatoria. (Snodderly et al., 1984) estudió el pigmento Macular contenido en una zona central de la fóvea el cual es mucho más denso en esta zona también conocida como Macula lútea. Los conos en la Macula tienen una sensibilidad más alta a la luz azul que los conos alrededor de ella. En la Fóvea la densidad de los conos es mayor pero no hay presencia de bastones y la visión más nítida se lleva a cabo en ella.
- d. La retina es la superficie sensible a la luz en el ojo y en la cual se forman las imágenes. Está conformada por diferentes capas en las que se encuentran, las fibras nerviosas, células ganglionares, células amacrinas, conos y bastones y otras células que permiten la conectividad entre capas. Ver Figura 1-14.

Figura 1-5 :Distribución de conos y bastones en la retina a lo largo del plano horizontal a través de la fóvea. La presencia de bastones empieza en un ángulo de 4 grados de la fóvea central. La fóvea central contiene la mayor cantidad de conos.

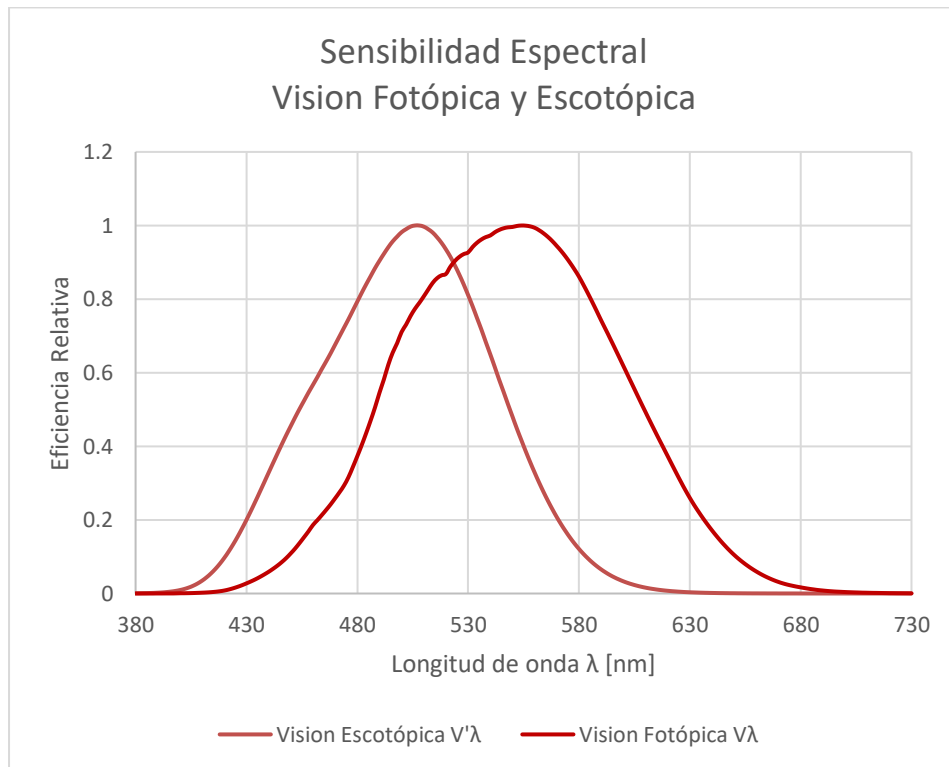


Fuente: Adaptado de Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications, Second Edition 2011.

Los bastones son responsables de la visión nocturna (baja iluminación) o visión escotópica. Los conos son responsables de la visión a color en el día o visión fotópica. La sensibilidad espectral luminosa para estas células está representada mediante V_λ (visión fotópica) y V'_λ (Visión escotópica) de la Figura 1-6.

Los valores de sensibilidad V_λ y V'_λ adoptados para esta tesis se encuentran en el anexo 7. La sensibilidad espectral V'_λ está definida para un observador menor de 30 años ya que sus valores varían de acuerdo con la edad del observador.

Figura 1-6 :Sensibilidad espectral de la visión fotópica V_λ y visión escotópica V'_λ . La sensibilidad espectral de conos L +M representada por V_λ con un pico de sensibilidad de 554 nm. La sensibilidad espectral de bastones representada por V'_λ con un pico de sensibilidad de 508 nm.



Fuente Propia.

Hay tres tipos de conos, los conos S (Short) cuya sensibilidad es mayor para la luz de longitudes de onda corta próximas al color azul, los conos M (medium) asociados a longitudes de onda media próximas al color verde, y los conos L (Large) asociados a longitudes de onda Larga próximas al color rojo.

1.4 Unidades Radiométricas y fotométricas

para entender el color requerimos conocer las definiciones de algunas unidades radiométricas y fotométricas como:

1.4.1 Unidades Radiométricas

Flujo radiante ϕ_R : es la energía radiante por unidad de tiempo transportado por un haz de luz. Se mide en vatios.

Irradiancia o incidencia Radiante E : Es la densidad de área del flujo radiante recibida por un cuerpo iluminado, integrado por todas las longitudes de onda en todas las direcciones. Se mide en vatios por metro cuadrado m^2 .

1-1

$$E = \frac{\text{flujo Radiante}}{\text{area}} = \frac{d\phi_R}{dA}$$

Irradiancia Espectral E_λ : es la irradiancia por intervalo de longitud de onda unitaria. En la longitud de onda λ se relaciona con la irradiancia mediante:

1-2

$$E = \int_{380}^{780} E_\lambda d\lambda$$

Para efectos prácticos en este desarrollo se usó la ecuación:

1-3

$$E_\lambda = \frac{P_\lambda E_v}{683 \int_{380}^{780} P_\lambda V_{2\lambda} d\lambda}$$

Donde P_λ es la potencia óptica espectral de la fuente de luz, medida en vatios.

Radiancia L : es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, por unidad de área proyectada en una dirección dada, integrado por todas sus longitudes de onda. Se mide en $\frac{W}{m^2 sr}$.

1-4

$$L = \frac{\text{Flujo Radiante por stereoradian}}{\text{Area proyectada}} = \frac{d^2 \phi_R}{dA_p d\Omega}$$

Radiancia espectral $L(\lambda)$: es la radiancia por intervalo de longitud de onda unitario, en la longitud de onda λ . Se mide en $\frac{W}{m^2 sr nm}$. está relacionado con la radiancia por:

1-5

$$L = \int_0^\infty L(\lambda) d\lambda$$

1.4.2 Unidades Fotométricas

Flujo Luminoso ϕ_V : es la unidad básica fotométrica equivalente al flujo radiante. Se mide en *Lumens (lm)* o $cd * sr$. Puede ser calculado mediante la ecuación:

1-6

$$\phi_V = 683.02 \int_{380}^{780} P_\lambda V_{2\lambda} d\lambda$$

Iluminancia E_v : es la cantidad de flujo luminoso incidiendo sobre una superficie. Se mide en *lux* o $\frac{lm}{m^2}$

1-7

$$E_v = \frac{\text{flujo luminoso}}{\text{area}} = \frac{d\phi_V}{dA}$$

También se puede hallar por medio de la irradiancia espectral mediante la ecuación:

1-8

$$E_v = 683.02 \int_{380}^{780} E_\lambda V_{2\lambda} d\lambda$$

Intensidad Luminosa I_v : es el flujo luminoso total integrado en toda el área de la fuente (una fuente de luz puntual o una fuente de luz extendida observada desde una distancia mucho más larga que la fuente de luz) y sus longitudes de onda, en un ángulo sólido y dirección definida. Se mide en *candela* (*cd*) o $\frac{lm}{sr}$.

1-9

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

Entonces, 1 *lumen* es 1 *candela* emitida por unidad de ángulo sólido *sr*.

1.5 Radiación de cuerpo negro y temperatura de color

Una fuente de luz no monocromática se caracteriza por su distribución de potencia espectral, en un amplio rango de longitudes de onda. El radiador de cuerpo negro de Planck luce rojo a 1000 K o 727 °C, amarillo a los 1500 K o 1227°C, blanco a los 4500 K o 4227°C y blanco azulado a los 6500 K o 6227 °C.

La ley de radiación de cuerpo negro de Planck que describe como la radiancia espectral y el color de un cuerpo negro cambian con su temperatura es:

1-10

$$L_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{ch}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Donde:

h es la constante de Planck

k es la constante de Boltzmann

c es la velocidad de la luz

λ es la longitud de onda

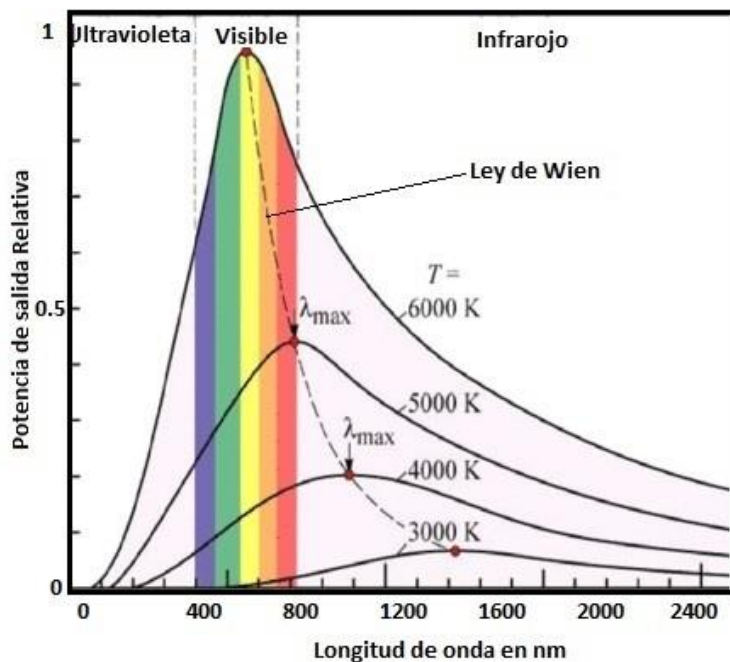
T la temperatura absoluta

La longitud de onda en la cual se tiene el pico de la radiación está dada por la ley de desplazamiento de Wien la cual es derivada de la ley de radiación de cuerpo negro:

1-11

$$\lambda_m T = \frac{ch}{4.965k_B} = .0028978[m] * T[K]$$

Figura 1-7: Función de radiancia espectral de cuerpo negro y ley de Wien. Cuando la temperatura de un radiador de cuerpo negro aumenta, toda la energía irradiada aumenta y el pico de la curva de radiación se mueve a longitudes de onda más cortas. El producto entre la longitud de onda pico y la temperatura, es una constante. Esta relación es llamada la ley de desplazamiento de Wien.



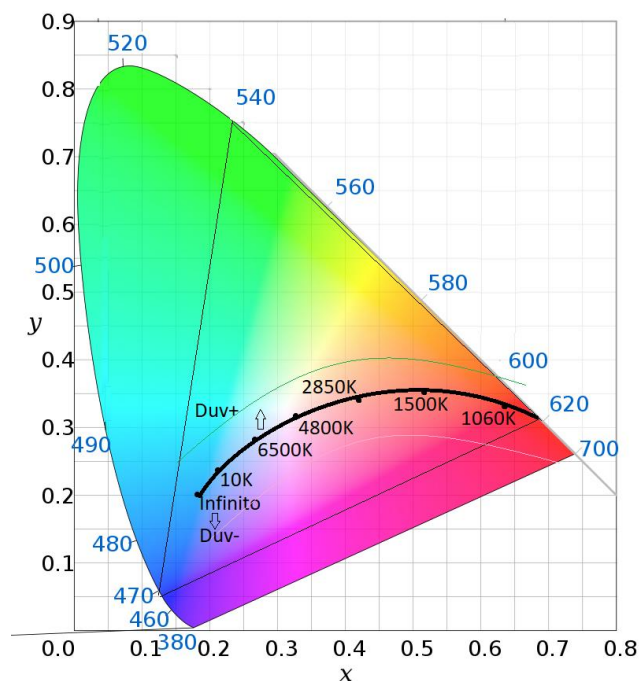
Fuente: Adaptación de Light-Emitting Diodes 3rd edition, E Fred Schubert, 2018.

Para una fuente de luz que tiene el mismo color de un cuerpo negro a cierta temperatura T , se dice que la fuente de luz tiene una temperatura de color T , sin que esta sea su temperatura real. Si el color de la fuente de luz no es exactamente igual al del cuerpo negro, pero si muy cercano, se dice que su temperatura de color correlacionada CCT es T . La luz del día no tiene temperatura de color constante. Su temperatura de color puede ser

más fría (azulada) al amanecer, y más cálida (rojiza) al atardecer, y es dependiente de muchos factores, como condiciones climáticas, nubosidad, ubicación geográfica, etc. (Malacara, 2011).

De la distribución de potencia espectral de la fuente de luz, además de la temperatura de color correlacionada CCT, obtenemos también sus coordenadas cromáticas e índice de reproducción de color CRI. Para definir la cromaticidad de una fuente de luz necesitamos la distancia Duv que va desde la línea de cuerpo negro a las coordenadas de color de la fuente de luz. Tal como se representa en la Figura 1-8, un valor negativo de Duv indica que el punto de color está por debajo de la línea de cuerpo negro tomando tonalidades hacia el color rosado. Un valor positivo indica un punto de color por encima de la curva de cuerpo negro tomando tonalidades de verde.

Figura 1-8: Diagrama de cromaticidad. Establecido en 1931 por la CIE definiendo los 3 colores primarios que a partir de la síntesis aditiva de color forman todos los demás colores. En este modelo X es una mezcla tendiente a la curva de sensibilidad del rojo al verde (conos L y M), Y significa luminosidad y Z es aproximadamente igual al estímulo de azul (conos S).



Fuente: adaptado de CIE 1931

Se tomó como referencia el estándar nacional americano para lámparas eléctricas – especificaciones para la cromaticidad de iluminación de estado sólido ANSI C78.377-2015. Con dicho estándar se calcularon los límites Duv mínimos y máximos del caso de estudio de la sección 4.4.

1-12

$$Duv = 57700 \left(\frac{1}{CCT} \right)^2 - 44.6 \left(\frac{1}{CCT} \right) + 0.00854$$

para $CCT \geq 2870$

$$Duv \pm 0.0060$$

Con el fin de analizar los cambios de espectro para Duv fijos, se ajustaron los umbrales Duv :

$$Duv_{min} = -0.004072$$

$$Duv_{med} = 0$$

$$Duv_{max} = 0.006323$$

1.6 Fundamentos básicos de iluminación

1.6.1 Iluminancia y uniformidad

Para garantizar buenas condiciones de iluminación de cualquier recinto, medimos las características de las fuentes de luz y de las áreas, clasificando sus valores de acuerdo con las tablas que veremos a continuación. Los niveles de iluminancia para el Caso de Estudio en la página 85, se tomaron de acuerdo con la Tabla 1-1.

La relación entre la iluminancia mínima obtenida sobre la iluminancia media de cada una de las áreas $\frac{E_{vmin}}{E_{vmed}}$, es la uniformidad establecida en el Tabla 410.4 del RETILAP denominada “uniformidades y relación entre iluminancias de áreas circundantes inmediatas al área de tarea”. Con la uniformidad, se evitan cambios bruscos de iluminancia entre áreas de trabajo. Para el Caso de Estudio en la página 85, se trabajó sobre los parámetros recomendados. Para iluminancias de tarea se ajustó una uniformidad mayor o

igual a 0.5; en las áreas circundantes inmediatas las uniformidades fueron mayores o iguales a 0.4.

Tabla 1-1: Índice UGR máximo y niveles de iluminancia para diferentes áreas y actividades

| Tipo de recinto y actividad | | Niveles de iluminancia [lux] | | | |
|--------------------------------------|--|------------------------------|--------|-------|--------|
| | | UGR | mínimo | medio | máximo |
| Áreas generales en las edificaciones | áreas de circulación y corredores | 28 | 50 | 100 | 150 |
| | vestidores y baños | 25 | 100 | 150 | 200 |
| | almacenes y bodegas | 25 | 100 | 150 | 200 |
| Zonas de trabajo | Trabajo Pesado, cuartos útiles, Pocetas | 25 | 200 | 300 | 500 |
| | Trabajo intermedio, oficinas y zonas de manipulación de materiales | 22 | 300 | 500 | 750 |

1.6.2 Temperatura de color:

La temperatura de color *CCT* que favorecerá el CRI de cada una de las áreas y el factor de deslumbramiento, también se tuvieron en cuenta en el capítulo 4. En cada uno de estos cálculos se tomaron como referencia las tablas 1-1 y 1-2.

Tabla 1-2: Tipo de fuentes luminosas de la sección en función de sus características de color y CRI. (Tomado de la tabla 200.3.4 RETILAP 2010)

| Índice de Reproducción Cromática CRI | Clase | Neutro | Frío | Criterio de aplicación |
|--------------------------------------|-------|--------------|--------|--|
| | | 3300 a 5000K | >5000K | |
| >= 90 | 1A | LED | LED | Principalmente donde la apreciación del color sea un parámetro crítico 7 |

| Índice de Reproducción Cromática CRI | Clase | Neutro 3300 a 5000K | Frío >5000K | Criterio de aplicación |
|--------------------------------------|-------|------------------------|----------------|--|
| 80 -89 | 1 B | LED | LED | En áreas donde la apreciación correcta del color no es una consideración primaria pero donde es esencial una buena reproducción de colores |

1.6.3 Aporte de luz diurna

Para la consideración del aporte de luz día en la sección 4.3, el valor del Cociente de luz diurna CLD es la relación entre la iluminancia en un punto del espacio interior y la iluminancia sin sombras en el espacio exterior, bajo un cielo homogéneamente cubierto. Se considera que se alcanza una incidencia de luz optima a partir del 4%.

1.6.4 Eficacia y eficiencia luminosa

La eficacia luminosa de la radiación o LER por sus siglas en inglés luminous efficacy of radiation, es la relación existente entre el flujo luminoso producido por la fuente y el flujo radiante. Tiene un valor máximo posible de 683 lm/W para el caso de una luz monocromática de una longitud de onda de 555 nanómetros (verde). La eficiencia de la fuente dependerá de la tecnología de fabricación de la fuente de luz; tiene un valor porcentual.

1-13

$$LER = \frac{\phi_V}{\phi_R}$$

1-14

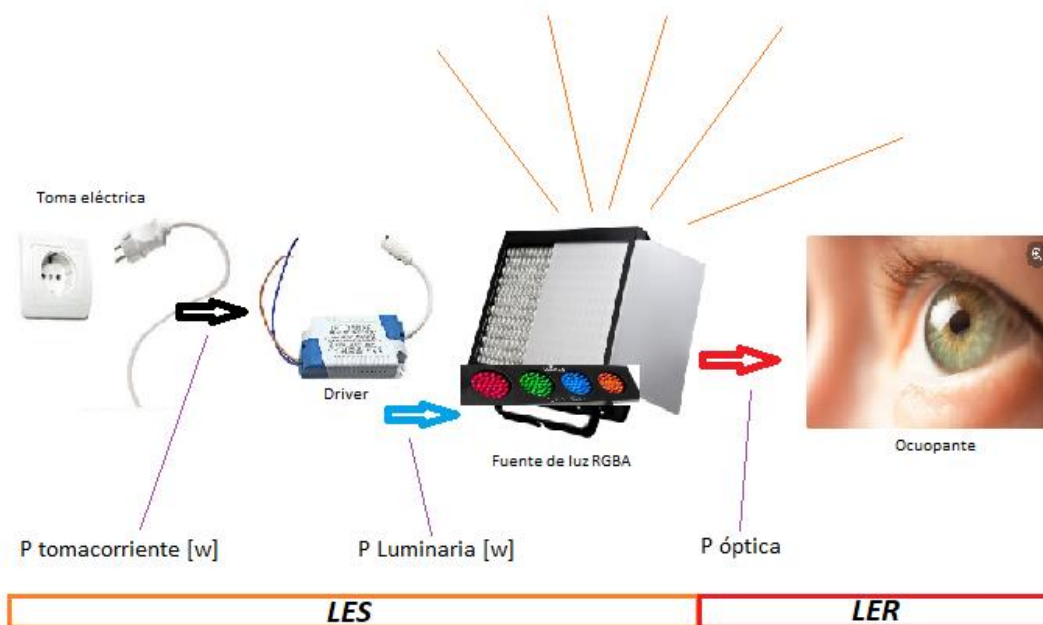
$$\eta_s = \frac{P_i}{P_o}$$

La eficacia luminosa de una fuente de luz por sus siglas en inglés LES luminous efficacy of Source, es el producto entre la eficacia luminosa de la radiación y la eficiencia de la fuente. El resultado tiene unidades de lm/W y mide la potencia eléctrica que se usa para iluminar.

1-15

$$LES = LER * \eta_S = \frac{\phi_V}{P}$$

Figura 1-9 Eficacias luminosas: LES y LER. No toda la energía eléctrica consumida por la fuente de luz (bombilla, fluorescente, etc.) es transformada en luz visible. El Driver, encargado de transformar la tensión que se entrega a la fuente de luz, tendrá ciertas pérdidas de potencia percibidas en calor. La fuente de luz dependiendo de su construcción también tiene ciertas pérdidas de energía. La eficiencia será la relación entre la energía recibida y la energía finalmente transformada.



Fuente propia

1.6.5 Aspectos importantes del software de diseño de iluminación SDI

El uso de Dialux o cualquier otro software de diseño de iluminación SDI, requiere el ajuste del flujo luminoso en la fotometría de la fuente de luz para que los cálculos de iluminancia sean los correctos. El valor real de flujo luminoso con el cual el SDI ejecuta los cálculos se basa en la fotometría de la fuente de luz. En vista de que el SDI Dialux no trabaja directamente con el espectro de la fuente de luz, en la sección 4.1 se presenta la metodología desarrollada en esta tesis para contemplar el espectro de cualquier fuente de luz en los cálculos de diseño de iluminación.

Otra configuración importante son los factores de mantenimiento o FM de la fuente de luz, este factor tiene incidencia en los cálculos de la iluminancia E_v . Para simplificar el modelo propuesto, dicho factor se hizo 1 para todas las luminarias.

1.7 Fuentes de Luz

Existen diferentes tipos de fuentes de luz, cada una de ellas con características especiales y de las cuales dependemos para un buen diseño de iluminación. Las lámparas de tungsteno que tienen un filamento incandescente y que generan altas temperaturas. Las lámparas de descarga de gas y lámparas fluorescentes que usan gas en su interior que reacciona a alta intensidad de voltaje y que entre otras cosas alarga su vida útil. Las características de reproducción de color o CRI varían dependiendo del tipo de lámpara que se use.

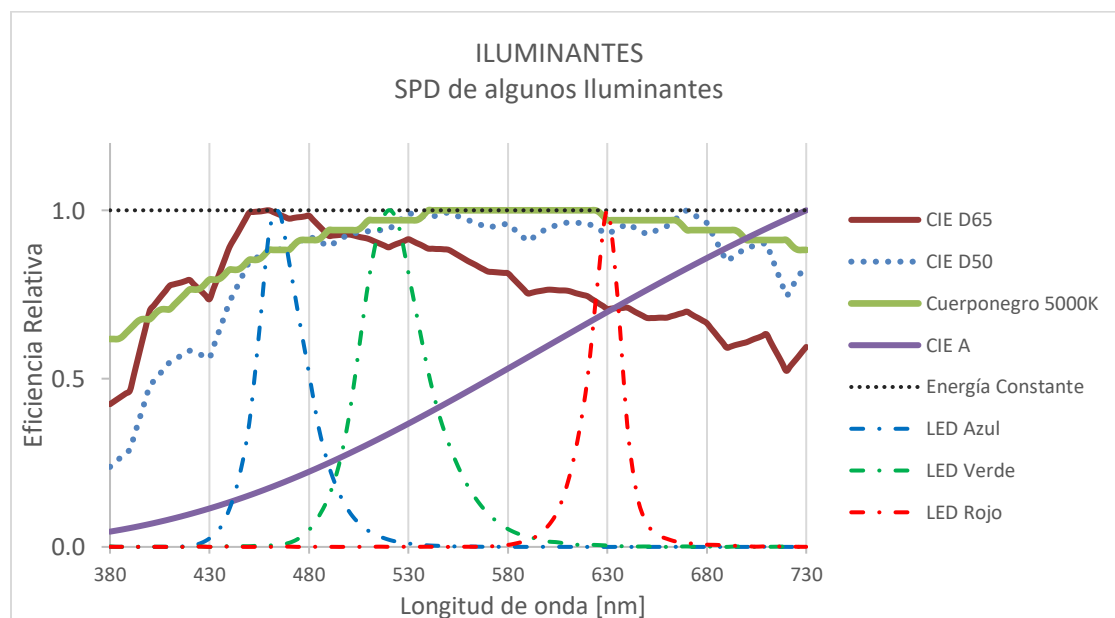
Los LEDs (diodos emisores de luz) son hoy en día las fuentes de luz más eficientes gracias a muchas de sus características. Dentro de estas, Los LED producen más luz por watio que otro tipo de fuentes luminosas, por lo tanto, tienen muy buena eficacia luminosa. Los LED pueden producir una luz de casi cualquier color debido a la facilidad de configuración de su espectro y con un espectro relativamente angosto (Malacara, 2011) . Debido a su facilidad de configuración como di, tri o tetracromático, los LED tienen un CRI alto. En la actualidad, se están implementando los 3LED y 4LED para el diseño y montaje de iluminación artificial en espacios arquitectónicos. Los LED de 3 canales o 3LED, permiten la obtención de luz blanca de diferentes características gracias a la configuración de su

espectro con la combinación de 3 colores primarios, rojo, verde y azul. Los 4LED también permiten la obtención de luz blanca a partir de los 3 colores primarios más la adición del color amarillo.

1.8 Iluminantes

Los iluminantes estándar son fuentes de luz numéricamente ideales que han sido usadas como base para el diseño y fabricación de fuentes de luz que simulan el espectro de los iluminantes estándar. Ejemplo de esto, son los SPD de la Figura 1-10 que ilustran algunos iluminantes definidos por la convención de la CIE 15.2-1986 en los que se encuentran: El iluminante *A* que es formado por una lámpara incandescente llena de gas con un filamento de tungsteno en espiral y bulbo de cuarzo cuyo CCTs es 2856 K. Iluminantes de la serie *D*, *D55* (5500 K), *D65* (6500K), *D75*(7500K) reemplazan los iluminantes *B* y *C* que emulaban la luz de la luna y el promedio de luz día respectivamente. Los Iluminantes *F* están formados por varios tipos de lámparas incandescentes.

Figura 1-10: SPD de algunos iluminantes característicos. Los datos de los iluminantes estándar no han cambiado desde CIE 15.2-1986; algunos ejemplos de espectro de luz monocromática.



Fuente propia.

1.9 Características LED 4 canales

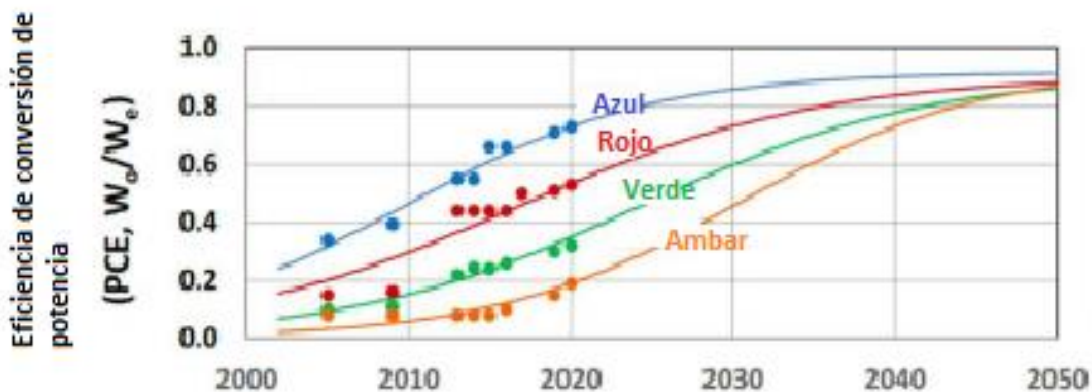
Figura 1-11 Fotografías de LEDs RGB, RGBW y RGBA. Este tipo de fuentes de luz cuenta con 3 o más LEDs encapsulados, cada uno con un color de luz diferente. Los pines normalmente son, un ánodo para cada color y un cátodo común. La alimentación en cada ánodo permite la combinación de color variando su intensidad.



Fuente: adaptado de <http://www.osram.us/ledengin>

El presente trabajo final de maestría contempla el uso de iluminación LED de 4 canales o 4LED debido a las ventajas de configuración de espectro y garantías de mejora a largo plazo. Los 4LED permiten el cambio de espectro de acuerdo con el contenido de colores ajustado por el usuario. Para el caso en estudio de la sección 4.4, se usó un 4LED RGBA dados sus colores ajustables, rojo, verde, azul y ámbar. Los 4LED tiene gran proyección de mejora de eficacia lumínica; un ejemplo es el aumento de eficacias para los LEDs de mezcla de colores que pasó de 40 lm/w en 2008 con una eficiencia del 9 %, a 137 lm/W en 2018 con una eficiencia del 33% (US DOE, 2016) .

Figura 1-12 Comparativo de aumento de eficiencia de conversión de energía a través de los años según color de LED medidas a 25°C y $35 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$. Se aprecian curvas ajustadas según datos históricos experimentales. Diferirán de algunos productos comerciales, especialmente aquellos que manejan drivers con densidades de corriente baja.



Fuente: Adaptado de (US DOE, 2016)

Una de las formas de generar luz blanca es el uso de fuentes LED compuestas por fósforo o denominadas PC-LED. A través de los años se ha venido mejorando la eficiencia del LED azul hasta alcanzar eficiencias del 62%, sin embargo, las pérdidas de stocks mantienen su eficacia por debajo de los 255 lm/W.

Gracias a la generación de luz blanca a través de la mezcla de color, y al permanente avance en la mejora de eficiencia de los LEDs rojo, verde y ambar, se garantiza una mejora de eficiencia que certifica de igual manera la reducción de costos y mejor calidad de iluminación. Actualmente se ve como el uso de iluminación de mezcla de colores está predominando en el mercado, la implementación de proyectos de iluminación 4LED promete tener un gran potencial para los años venideros. En la Figura 1-13 se observa el aumento de eficacia luminosa de las fuentes de luz LED con contenido de fósforo que está llegando a sus límites y que será reemplazado a partir de 2030 por las fuentes de luz blanca de mezcla de colores.

Figura 1-13 Comparativo de eficacia luminosa de fuentes LED de contenido de fósforo a través del tiempo. Curvas de LEDs blanco cálido (300-3500 K) y blanco frío (5700 K), además de las eficiencias hipotéticas para LEDs de mezcla de color 4000K. para el año 2020 los productos comerciales alcanzan 185 lm/W y 165 lm/W de LEDs de temperatura blanco frío y blanco cálido respectivamente.



Fuente: Adaptada de (US DOE, 2016)

Actualmente el mercado ofrece gran variedad de fuentes de iluminación 4LED. las configuraciones más usadas son RGBW y RGBA en donde se mezclan los colores primarios con blanco o ámbar respectivamente. Para el caso de estudio se tomó una luminaria de prueba 4LED con las características expuestas en Tabla 4-2 y Tabla 4-5.

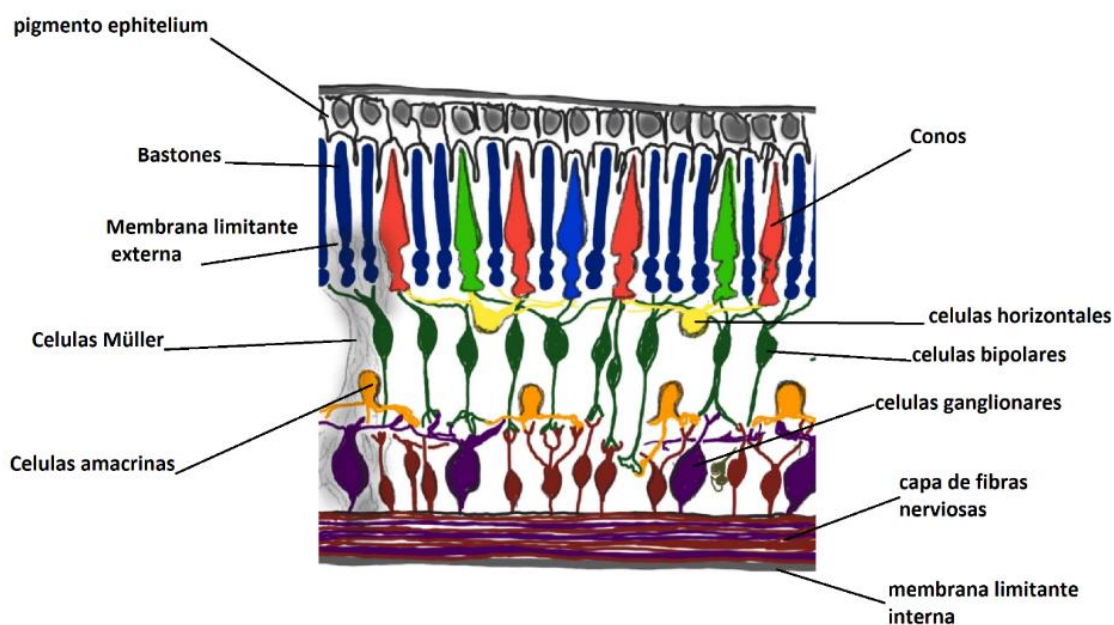
1.10 Cálculo del estímulo circadiano #1: CLA

Esta tesis usa el modelo planteado por (M. G. Figueiro et al., 2019), que caracteriza el efecto de la luz en el sistema circadiano humano. La retina, convierte la luz en señales neuronales para el sistema circadiano conocido como fototransducción. Esta luz convertida en señales neuronales se le denomina luz circadiana efectiva o CL_A (M. S. Rea et al.,

2012a) . El rol principal del sistema circadiano es de sincronizar las 24 horas del día y ciclos de oscuridad en el reloj biológico interno y su ritmo circadiano.

La hormona melatonina es conocida como la hormona de sueño. La melatonina circula por la sangre y entre otras cosas indica al cerebro que es tiempo de noche. La información viaja desde las ipRGCs hacia nuestro reloj Biológico que se encuentra en el núcleo supraquiasmático SCN. La luz estimula las ipRGCs las cuales indican al SCN que debe suprimir la producción de la melatonina, acción que activa un estado de alerta en la persona.

Figura 1-14 :Esquema de la estructura de la retina en el ojo humano. Ilustración simplificada de conexiones sensoriales enfatizando enlaces de los fotorreceptores y las células ganglionares con interneuronas que relacionan los dos tipos de células.



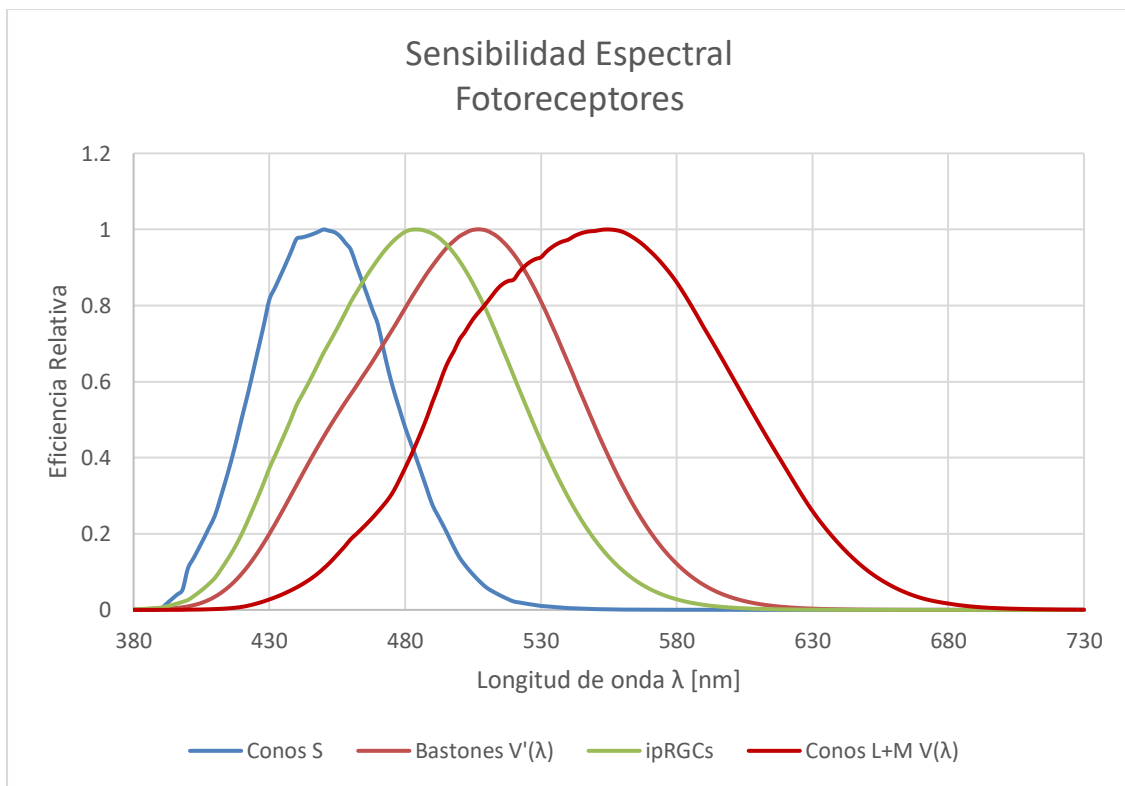
Fuente: Adaptado de (Kolb, 1995)

Algunos estudios con vertebrados (Hattar et al., 2003; Panda et al., 2003 y Belenky et al., 2003), han demostrado que las ipRGCs además de conducir la información al SCN, también reciben señales de conos y bastones.

Los rayos que ingresan al ojo a lo largo del eje central alcanzan la retina con mejor efectividad que la luz debajo, encima o por los lados de la línea de visión (Bullough et al.,

2001). Las ipRGCs son menos sensibles a la radiación de la luz que los conos y bastones por lo que requieren mayor cantidad de fotones para ser excitados. (Hattar et al., 2002 ; Schmidt et al., 2011). En la Figura 1-15 se aprecian los picos de sensibilidad de cada una de las células nombradas anteriormente; un ejemplo es el pico de sensibilidad de 484 nm de las ipRGCs, que difiere del pico la respuesta visual fotópica que es de 554 nm.

Figura 1-15: sensibilidad espectral relativa de los fotorreceptores del ojo humano. Curvas de sensibilidad adoptadas para cálculo de CS. Picos de sensibilidad de Conos S 450nm, ipRGCs 484 nm, bastones 506nm y conos L+M 556 nm.

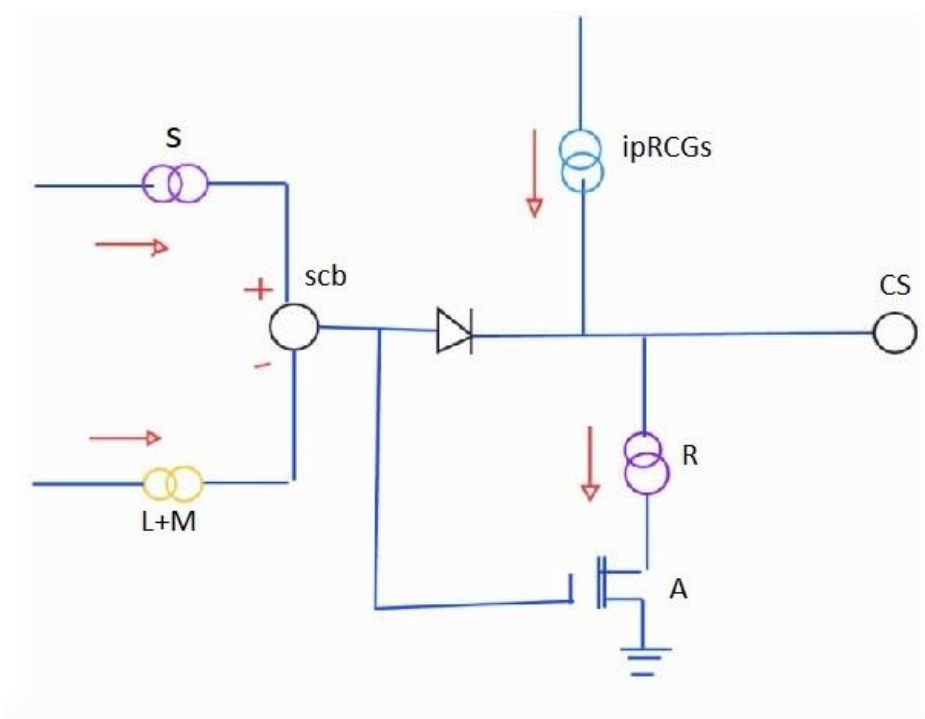


Fuente propia.

En la representación eléctrica del modelo del estímulo circadiano Figura 1-16, la señal opuesta $b-y$ se define como la resta de la señal L+M con la respuesta del cono S. La señal L+M es multiplicada por la constante k_{LM} que es menor que una unidad con el fin de hacer consistente la operación $b - y$. Lo mismo pasa con la respuesta de las ipRGCs, la magnitud y el umbral de $b-y$ fue modelada para ser lineal con los operadores a_{b-y} y a_{rod} . El diodo permite el flujo de la señal en solo un sentido, así cuando la señal $b - y$ es positiva,

esta se suma a la respuesta de las ipRGCs, modelando la despolarización de la respuesta de las ipRGCs a la radiación de longitudes de onda corta. Cuando $b - y$ es negativo, la respuesta de los bastones no se resta al lado derecho de la ecuación y la respuesta de las ipRGCs actúa sola a la salida (Mark S. Rea et al., 2005).

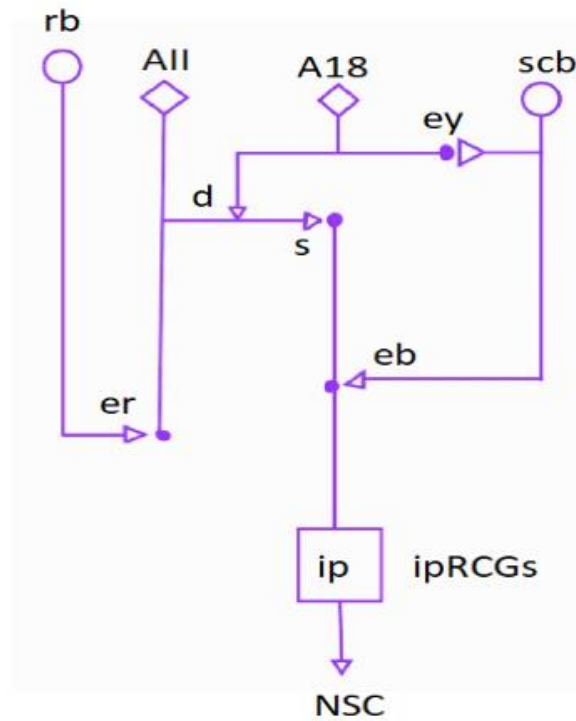
Figura 1-16 :Representación eléctrica del modelo del estímulo circadiano. Señales de entrada S y L+M que representan el estímulo a los conos (fotoreceptores) que llevan el mismo nombre. Bastones (R) y ipRGCs , interactúan también en el modelo generando a la salida una señal CS.



Fuente: Adaptada de (Mark S. Rea et al., 2005).

En la representación neurofisiológica y neuroanatómica de la fototransducción circadiana, Figura 1-17, la señal de excitación e_r a los bastones bipolares rb estimula las células amacrinas AII , las cuales proveen una inhibición s a las dendritas de despolarización de las ipRGCs haciendo que estas aumenten su umbral absoluto. e_b para despolarización causada por longitudes de onda corta “azul”, e_y para hiperpolarización causada por longitudes de onda media y larga “amarillo”, son los dos tipos de señal del cono S bipolar.

Figura 1-17: Modelo de representación de la neurofisiología y neuroanatomía de la fototransducción circadiana



Fuente: adaptada de (Mark S. Rea et al., 2005).

La señal “azul” se adhiere a la sensibilidad de las ipRGCs para superar gradualmente la inhibición s a medida que incrementan los niveles de luz. La señal “amarilla” desacopla la inhibición causada por los bastones por medio de las células amacrinas $A18$ y revela el umbral absoluto de las ipRGCs para longitudes de onda mayores de 500 nm “verde” (Mark S. Rea et al., 2005).

El modelo que define matemáticamente la sensibilidad espectral del sistema circadiano humano fue representado en (M. G. Figueiro et al., 2019) por La luz circadiana CL_A de las ecuaciones 1-16y 1-17.

1-16

$$CL_A = 1547.9 \left[\int_{380}^{730} Mel_\lambda E_\lambda d\lambda + \left[a_{b-y} \left(\int_{380}^{730} \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k_{LM} \int_{380}^{730} \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int_{380}^{730} V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right] \right]$$

$$\text{Si } \int_{380}^{730} \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k_{LM} \int_{380}^{730} \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda > 0$$

1-17

$$CL_A = 1547.9 \int_{380}^{730} Mel_\lambda E_\lambda d\lambda$$

$$\text{Si } \int_{380}^{730} \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k_{LM} \int_{380}^{730} \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \leq 0$$

Donde:

CL_A Luz circadiana. La constante 1547.9 normaliza el valor de CL_A

E_λ es la irradiancia espectral de la fuente de luz.

Mel_λ es la sensibilidad espectral melanópica – corregida para la transmitancia del lente cristalino con pico en 484 nm. Ver Figura 1-18

S_λ sensibilidad espectral cono S

mp_λ transmitancia del pigmento macular

V_λ sensibilidad espectral fotópica

V'_λ sensibilidad espectral escotópica

$RodSat$ constante de saturación media de los bastones $6.5215 \frac{W}{m^2}$

$$k_{LM} = 0.2616$$

$$a_{b-y} = 0.700$$

$$a_{rod} = 3.300$$

La respuesta de las células ganglionares de la retina ipRGCs a la luz, es modelada por:

1-18

$$\int_{380}^{730} Mel_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda$$

Los bastones controlan la sensibilidad absoluta de la respuesta de los conos mediante la expresión:

1-19

$$\left[a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int_{380}^{730} V'_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{RodSat}} \right) \right]$$

Sobre el umbral, la respuesta de los conos a la luz es procesada mediante el mecanismo espectralmente oponente $b - y$, azul vs amarillo.

1-20

$$\left[a_{b-y} \left(\int_{380}^{730} \frac{S_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda - k_{LM} \int_{380}^{730} \frac{V_{\lambda}}{mp_{\lambda}} E_{\lambda} d\lambda \right) \right]$$

Cuando el espectro de luz tiene más contenido espectral de longitudes de onda corta, el mecanismo $b - y$ indica luz azul; en este momento la salida del mecanismo $b - y$ es adherida a la respuesta de las ipRGCs. Solo se tomará la respuesta de las ipRGCs si el mecanismo $b - y$ indica “amarillo”, es decir que el espectro de luz tiene más contenido espectral de longitudes de onda larga.

La ecuación que define la supresión porcentual de melatonina nocturna es:

1-21

$$CS = 0.7 - \frac{0.7}{1 + \left(\frac{CLA}{355.7} \right)^{1.1026}}$$

La calculadora propuesta por (Mark S. Rea et al., 2005) se encuentra en la página web CS Calculator (rpi.edu)¹ y se basa en el modelo anteriormente planteado. Para el ejercicio de

¹ Center, L. R. (2017 -2020). *Lighting Research Center*. Obtenido de <https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/>

esta tesis y efectos prácticos, la densidad óptica del pigmento macular se asume con una densidad óptica única de 0.5 para todas las personas (Mark S. Rea et al., 2005).

1.11 Cálculo del estímulo circadiano #2: Equivalente Melanópico en luxes EML

El equivalente Melanópico en luxes EML, es el criterio para ponderar la luz equivalente circadiana en el espectro de luz comprendido por la sensibilidad espectral melanópica sin corrección del lente cristalino con pico en 490 nm. Dicho espectro incide en la supresión de la segregación de melatonina en el cuerpo.

Primero se debe conocer el factor de eficiencia melanópica FEM de la fuente de luz. Para hallar el FEM, La sumatoria de la sensibilidad espectral melanópica se divide por la sumatoria de la sensibilidad espectral fotópica. Se multiplica por la constante de normalización de las curvas k_{FEM} . Se usa $k_{FEM} = 1.22$ para corregir la diferencia en el área de las dos curvas de flujo E_λ y $Mel_{2\lambda}$ (Souman et al., 2018).

1-22

$$FEM = k_{FEM} \frac{\int_{380}^{730} E_\lambda Mel_{2\lambda} d\lambda}{\int_{380}^{730} E_\lambda V_{2\lambda} d\lambda}$$

Donde:

$Mel_{2\lambda}$ es la sensibilidad espectral melanópica sin corrección del lente cristalino con pico en 490 nm Figura 1-18.

$V_{2\lambda}$ Sensibilidad espectral relativa de la visión fotópica para el observador de 2 grados con pico en 556 nm

Posteriormente se calcula EML :

1-23

$$EML = FEM * E_v$$

De una forma más directa, EML puede ser calculado:

1-24

$$EML = k_{itl} \int_{380}^{730} E_{\lambda} Mel_{2\lambda} d\lambda$$

Donde:

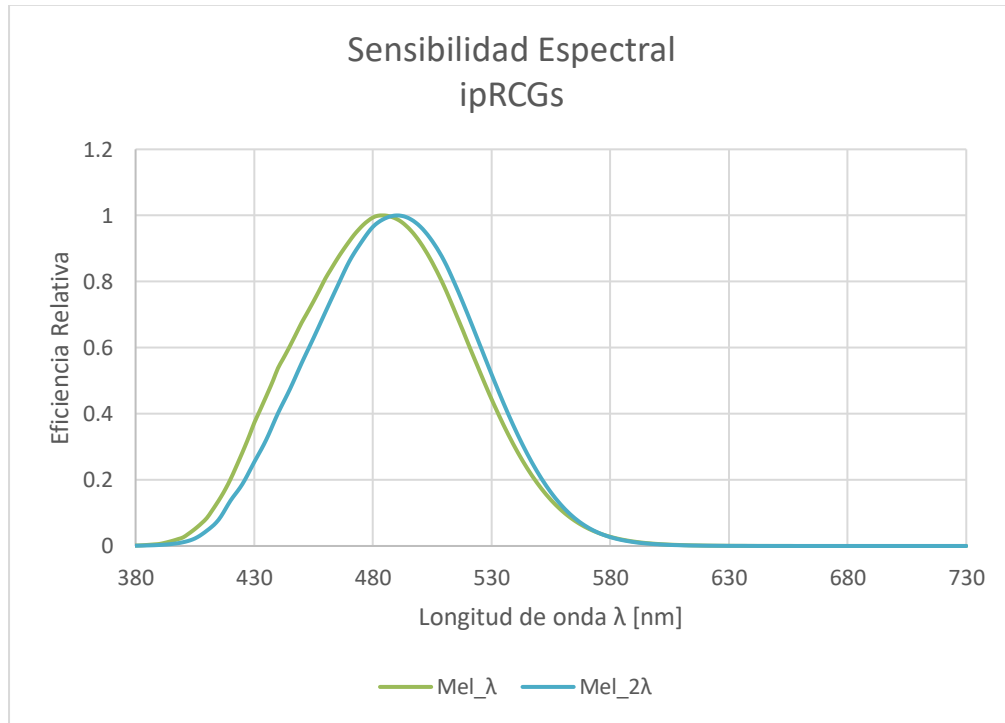
k_{itl} es el factor de conversión de la irradiancia melanópica a unidades fotométricas. Para

k_{itl} es $832.39 \frac{lm}{W}$ calculado por:

1-25

$$k_{itl} = 683 \frac{\int_{380}^{730} V_{2\lambda} d\lambda}{\int_{380}^{730} Mel_{2\lambda} d\lambda}$$

Figura 1-18 :Sensibilidad Espectral melanópica. Diferencia de valores de sensibilidad dados los resultados de ensayo de laboratorio con y sin filtro del lente cristalino que provoca picos de sensibilidad de 484 y 490 nm.



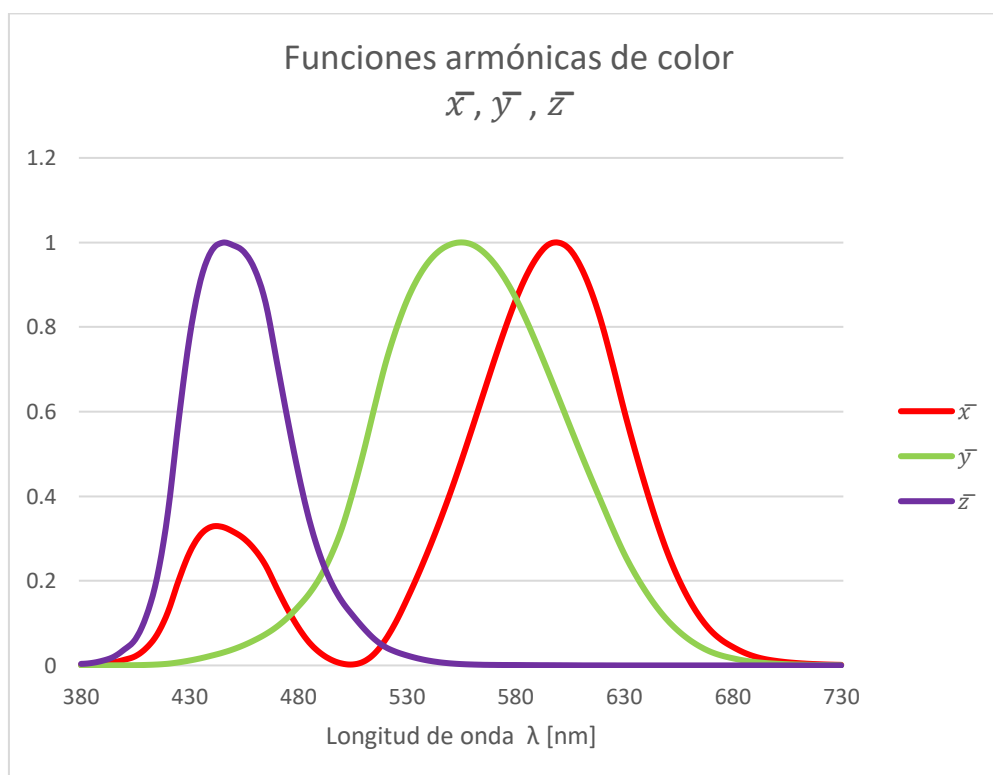
Fuente propia.

1.12 Cálculo del estímulo circadiano #3: método simplificado con funciones armónicas de color

Las funciones armónicas color representan las cantidades de luz de color primario (rojo, verde y azul) en unidades de triestímulo, necesarias para alcanzar la intensidad unitaria de luz con una banda estrecha de longitudes de onda centrada en λ .

Un método simplificado para cálculo de CS fue presentado por (Babilon et al., 2021). El método se basa en el estudio de iluminación y la aplicación en recintos hospitalarios con condiciones de luz interior y entradas de luz día. En (W. Truong et al., 2020; William Truong et al., 2020) los estudios realizados por el laboratorio desarrollaron algunos métodos computacionales usados para calcular el CS a partir de las bien conocidas cantidades fotométricas y colorimétricas. Este método modela CS como una función de E_v en luxes y la función armónica de color \bar{z} , ambas medidas verticalmente al nivel del ojo.

Figura 1-19: Funciones armónicas de color. La CIE 1971 redefinió los valores de la CIE 1931.



Fuente propia.

A partir de los valores de \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} , podemos calcular los valores triestímulo

$$X = k_{xyz} \int_{380}^{730} E_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d\lambda$$

1-26

$$Y = k_{xyz} \int_{380}^{730} E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda$$

1-27

$$Z = k_{xyz} \int_{380}^{730} E_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d\lambda$$

1-28

Donde:

k_{xyz} es una constante de normalización definida por:

$$k_{xyz} = \frac{100}{\int_{380}^{730} E_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d\lambda}$$

1-29

Las coordenadas de cromaticidad x , y , z del estímulo espectral están dadas por los radios:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

1-30

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

1-31

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y$$

1-32

Teniendo el valor de la coordenada de cromaticidad z y E_v *vertical*, CS será calculado por:

1-33

$$CS_2 = 0.7 - \left(\frac{0.7}{1 + 0.016781(z E_\lambda^{0.509265})^{2.268904}} \right)$$

para $z \geq 0.195$

1-34

$$CS_2 = 0.7 - \left(\frac{0.7}{1 + 0.011376(z E_\lambda)^{1.109998}} \right)$$

para $z < 0.195$

1.13 Cálculo del estímulo circadiano #4: método CIE S026 E2018

Mediciones como la iluminancia fotópica reflejan primariamente la sensibilidad espectral de conos largos y medios, con un peso sustancial de conos largos, cuantificando inapropiadamente la sensibilidad a los efectos no visuales que están basados en la sensibilidad de la Melanopsina. Los efectos no visuales de la luz en el ojo incluyen la sensibilidad de la ipRGCs y bastones, en donde la intensidad de la luz, el tiempo de exposición y la hora del día, influyen directamente en el efecto de la respuesta no visual (Lucas et al., 2014)(Gooley et al., 2012) (Gooley et al., 2010) (te Kulve et al., 2019). El estudio del grupo de científicos sobre las respuestas no visuales, propuso en el 2013 la cuantificación de las respuestas ponderando la irradiancia y su efectividad en los 5 fotorreceptores conocidos, conos largos, medios y cortos, bastones y ipRGCs (CIE Central Bureau, 2018) .

Este método expuesto en (CIE Central Bureau, 2018), presenta la forma de cuantificar la influencia de la luz en los fotorreceptores intrínsecamente fotosensibles encargados de la supresión de melatonina. A través del cálculo de iluminancia luz día equivalente

melanópica D65 o M-EDI (melanopic equivalent daylight illuminance), se aterrizan los estudios de los estímulos no visuales de la luz en el ojo humano. Las propiedades fotópicas como por ejemplo la iluminancia del estándar de luz D65, coinciden con las tasas efectivas de sensibilidad de cada opsina o $\alpha - opic$. Conos L, M y S, bastones y ipRGCs, tienen cada uno, un pigmento o $\alpha - opic$ asociado, que es segregado de acuerdo con el estímulo de luz que incide en ellos, según la Tabla 1-3.

Tabla 1-3 :Fotopigmentos relacionados

| Fotorreceptor | Fotopigmento | Representación de sensibilidad espectral |
|---------------|--------------|--|
| Cono S | Cianopsina | α_{sc} |
| Cono M | Cloropsina | α_{mc} |
| Cono L | Eritropsina | α_{lc} |
| ipRGCs | Melanopsina | α_{mel} |
| Bastones | Rodopsina | α_{rh} |

El cálculo del M-EDI en luxes, usa el flujo luminoso de la ecuación 1-35.

$$\phi_V = 683.02 \int_{380}^{780} E_\lambda V_{2\lambda} d\lambda$$

La irradiancia espectral en $\frac{W}{m^2}$ será calculada para cada una de las sensibilidades de los 5 fotorreceptores del ojo humano:

1-36

$$E_{\alpha-opic} = \int_{380}^{780} k_{CIE} E_\lambda \alpha - opic_\lambda d\lambda$$

Donde $\alpha - mel_\lambda = Mel_{2\lambda}$ y k_{CIE} es el factor de multiplicación hallado a partir de:

1-37

$$k_{CIE} = \frac{E_v \text{ Vertical}}{\phi_v}$$

Se puede calcular la eficacia luminosa de la radiación de cada uno de los fotoreceptores mediante:

1-38

$$LER_{\alpha\text{-opic}} = 1000 * \frac{E_{\alpha\text{-opic}}}{E_v \text{ Vertical}}$$

Por último, el cálculo del equivalente luz día para cada uno de los foto receptores está dado por la ecuación:

1-39

$$EDI_{\alpha\text{-opic}} = 1000 * \frac{E_{\alpha\text{-opic}}}{LER D65_{\alpha\text{-opic}}}$$

Las constantes de eficacia luminosa de la radiación de cada uno de los fotoreceptores tienen los valores siguientes:

$$LER D65_{mel} = 1.3262$$

$$LER D65_{sc} = 0.8173$$

$$LER D65_{mc} = 1.4558$$

$$LER D65_{lc} = 1.6289$$

$$LER D65_{rh} = 1.4497$$

El valor que tomaremos para diseño de iluminación circadiana eficiente estará dado por el cálculo del EDI_{mel} o EDI melanópico.

El EDI melanópico, representa de buena manera la sensibilidad espectral de las respuestas no visuales. Para exposiciones de una hora o superiores, la supresión de melatonina puede ser estimada por el EDI melanópico. (Nowozin et al., 2017) muestra que las respuestas oculares a la luz fueron mejor anticipadas por la irradiancia melanópica que por otras mediciones propuestas previamente como iluminancia fotópica.

2. Introducción

El ojo tiene la capacidad de usar la luz percibida, para representar lo que vemos y transformarlo en imágenes hacia el cerebro. Se sabe que el ojo también envía información no visual al cerebro; El ciclo luz día-noche, es informado al cerebro por medio de señales eléctricas que viajan por el nervio óptico. Estos ciclos son llamados los ritmos circadianos y rigen a muchos seres vivos, incluyendo a los humanos.

El reloj biológico en el cerebro es encargado de mantener un sincronismo ante estímulos de iluminación; en él, intervienen grupos de neuronas dentro de una estructura llamada núcleo supraquiasmático o SCN por sus siglas en inglés. El SCN, recibe información directa de las células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensitivas o ipRGCs por sus siglas en inglés (Sciences, 2020). Cuando la luz entra en el ojo, provoca impulsos que comprimen el nervio óptico y transmiten información de niveles de iluminación al (Sciences, 2011).

La luz contrae la pupila, suprime la producción de melatonina pineal, aumenta la frecuencia cardíaca y la temperatura corporal, estimula la producción de cortisol y actúa como estimulante neurofisiológico (aumento subjetivo y medidas objetivas de alerta y reacción psicomotora, tiempo y reducción de lapsos de atención), (Lucas et al., 2014); (Rogério dos Santos Alves; Alex Soares de Souza, 2014).

Los estudios basados en ritmos circadianos son relativamente recientes y vienen desde el descubrimiento de las ipRGCs en el 2002. Los ritmos circadianos se basan en los ciclos de luz diarios, que conllevan a cambios físicos, mentales y de conducta. Ejemplo de esto es el análisis de como el trabajo por turnos y la exposición a pantallas de dispositivos electrónicos pueden alterar los ritmos circadianos y los ciclos de sueño -vigilia (Berson et

al., 2002) . Desviaciones de esta rutina cotidiana, reducen dicha alerta, generan desorden del sueño y se relacionan con enfermedades del corazón.

Numerosos estudios vienen identificando una problemática de salud en personas de todo el mundo debida a la exposición continua a luz artificial; dicha exposición afecta funciones corporales, Salud, conducta, produce sueño interrumpido, obesidad , diabetes, depresión, afecta el estados de ánimo de las personas y su temperatura corporal, entre otras (Sciences, 2011). En Varios países ya se vienen diseñando e implementando aplicaciones de control de iluminación artificial para mejora de las condiciones de salud en personas. Un ejemplo de estas aplicaciones, son los tratamientos terapéuticos (Lucas et al., 2014), con propiedades antidepressivas de tratamiento de trastorno afectivo estacional y terapia de trastornos circadianos. Dentro de los trastornos circadianos más conocidos están los ritmos de sueño, el trabajo por turnos y la descompensación horaria o jet lag causado por vuelos intercontinentales(Penders et al., 2016; Perera et al., 2016). .

Entender las necesidades específicas de iluminación en un espacio arquitectónico conlleva a la creación de entornos más saludables y productivos. De aquí la Importancia del uso de la iluminación LED, la cual permite control de los niveles de iluminación y su componente espectral (Wagiman et al., 2020). Adicionalmente la tecnología LED proporciona excelentes prestaciones en calidad de color y eficacia lumínica (flujo luminoso), índice de reproducción cromática, y temperatura de color). En (Skeldon et al., 2017) se especifican algunos detalles de problemas relacionados con un mal diseño de iluminación nocturna.

Así, En esta tesis se consideran los efectos no visuales de la luz para el diseño de iluminación artificial; de esta forma los requerimientos del estímulo circadiano para mejora del confort y salud de los usuarios de este tipo de iluminación se tienen en cuenta. Se desarrolló una Herramienta de cálculo que permite conocer el valor CS y el control de iluminación que cumple con los estándares de la norma UL24480 (Laboratories, 2019). Con ayuda de la herramienta de cálculo de CS se propuso un caso de estudio en el cual se diseñó la iluminación circadiana efectiva teniendo en cuenta las condiciones arquitectónicas de un laboratorio de muestras médicas.

La herramienta gráfica de cálculo desarrollada podrá ser aplicada en cualquier estudio de iluminación que requiera tener en cuenta el estímulo circadiano dentro de su diseño. Los limitantes de la herramienta de cálculo caen en la información de potencia espectral de las luminarias que se quieran usar; sin embargo, estas modificaciones quedan abiertas a futuros proyectos de mejora de la herramienta de cálculo de CS.

El desarrollo de este proyecto inició con la revisión del estado del arte y los estudios que se ha llevado a cabo por diferentes investigadores. Se usó el modelo propuesto por (M. G. Figueiro et al., 2019) que plantea la fototransducción circadiana de una forma matemática por cálculo de CLA. Adicionalmente se realizó el comparativo entre los métodos de cálculo de CS por CLA, método simplificado, cálculo de EML y M-EDI. se usó la norma UL24480 con el fin de satisfacer las necesidades para una propuesta de iluminación circadiana efectiva. Por último, se analizaron los resultados obtenidos y se propuso la mejora de las herramientas de control, la fabricación de iluminación basada en el espectro y el uso de iluminación dinámica.

2.1 Antecedentes

Toda la iluminación, no solamente la luz solar, contribuye al fotoentrenamiento circadiano. La luz en la noche retrasa la fase de respuesta pues suprime la secreción de melatonina; Sin embargo, los niveles de iluminación nocturna pueden regular los ritmos circadianos. Niveles bajos de luz circadiana, son recomendados para no interferir con la fase circadiana, el sistema circadiano Mel_{λ} es más sensible a 484 nm de una luz azul, mientras el sistema visual V_{λ} es mas sensible a 554 nm (región verde)

Para individuos con trabajo por turnos, los niveles de luz nocturna deben ser ajustados para activar el estado de alerta. La medición del CS está siendo utilizada a nivel mundial en numerosos trabajos de investigación y diseño como hospitales que estudian la enfermedad del alzhéimer e iluminación en oficinas.(M. G. Figueiro et al., 2016); (Mariana G. Figueiro et al., 2015).

Las investigaciones han demostrado que tanto el espectro como el nivel de luz de una fuente de luz, pueden influenciar el reloj circadiano. El tiempo de exposición puede adelantar o retrasar nuestro reloj biológico. Varios estudios han demostrado que la respuesta circadiana (ej. supresión nocturna de la melatonina) se acerca a sus máximos niveles después de 0.5 a 1.5 horas de exposición a luz blanca a 300 lux (Cajochen et al., 2000).

Un estudio realizado en una oficina con 200 trabajadores, 100 recibieron un estímulo circadiano menor de 0.15 en la mañana (8am a mediodía) y otros 100 un *CS* mayor a 0.3; los últimos fueron a dormir mucho más temprano, reportaron una mejor calidad de sueño, menos perturbación del sueño y se sintieron menos depresivos. Una iluminancia De 40 a 200 lux de una luz roja de 640 nm, demostró que mejora la actividad durante el día y noche sin afectar las concentraciones de melatonina (Mariana G. Figueiro et al., 2016) (Sahin & Figueiro, 2013).

Tabla 2-1 :Respuestas del organismo expuesto a malas condiciones de iluminación. Tomado de (Houser & Esposito, 2021)

| Duración | Psicológico | Fisiológico |
|-----------------------------------|--|--|
| Inmediata (Segundos o minutos) | percepción del brillo Discomfort visual Atención | Adaptación de la pupila Supresión de la melatonina Adaptación a la oscuridad Adaptación cromática |
| Retardo (Horas, días o semanas) | Estado de ánimo Condiciones cognitivas | Regulación ritmos circadianos Calidad del sueño |
| Largo término (Meses o años) | Productividad Depresión | Estrés afectaciones a la salud Desordenes estacionales (SADS) Depresión |

Factores como densidad espectral de la luz, intensidad y el tiempo de exposición, afectan dicho estímulo circadiano como se muestra en la Tabla 2-1. La luz de la mañana ayuda a avanzar la respuesta circadiana mientras que la luz de la tarde la retrasa. La luz de medio

día no tiene mayor impacto, pero aumenta el estado de alerta. (Rüger et al., 2006); (Yosten, 2020).

2.2 Eficiencia aplicada a la iluminación - LAE

(US DOE, 2016) introduce la eficiencia aplicada a la iluminación o LAE por sus siglas en inglés (lighting application efficiency). LAE se entiende como la generación efectiva y entrega optimizada de luz apropiada en el espacio y tiempo correctos. Esta iniciativa de caracterización se compone de varios criterios que valoran la función de la iluminación en un espacio y están interrelacionados con la actividad ejecutada y su tiempo de duración. Las funciones de la iluminación son: La eficiencia de las fuentes de luz o LES que actualmente se tiene como premisa para la mejora permanente de las fuentes de luz. El potencial de energía consumido vs el potencial de energía realmente necesitado; la efectividad de la intensidad de luz que se entrega para ciertas tareas puntuales y la eficiencia espectral que relaciona el espectro con el estímulo circadiano como base.

Históricamente la Eficiencia de la fuente de luz que compromete el Incremento del LES, ha sido una prioridad de mejora. Pero LAE comprende también el potencial de energía sin explotar, dentro del cual, la iluminación puede ser dirigida a cumplir su función, reduciendo consumos de energía y eliminando iluminación perjudicial e innecesaria en el medio ambiente. Grandes intensidades de iluminación pueden generar pérdidas de energía; baja intensidad de iluminación puede desmejorar la función de la iluminación.

La efectividad de la intensidad refiere que la cantidad de luz entregada debe ser adecuada de acuerdo con la demandada. Un ejemplo de efectividad de la intensidad se ve en las carreteras en las que ciertos espacios no necesitan intensidades de iluminación altas mientras que otros sí. La cantidad de luz entregada debe mejorar la función visual puesto que diferentes actividades a lo largo del día requieren de funciones de iluminación diferentes.

En cuanto a la eficiencia espectral, se debe garantizar el control del espectro de luz adecuado con el fin de proporcionar condiciones de luz específica según la necesidad de la aplicación. El espectro de luz influye en la estimulación de los ritmos circadianos con la

entrega de luz acorde al horario del día. En algún momento los SPD mejorados podrán mejorar consigo las funciones de iluminación, aumentando la productividad en las personas y reduciendo enfermedades a largo plazo. Muchos espacios no requerirán de un control automatizado de iluminación, pero sí una mejora de los diseños de iluminación estáticos que permitan alcanzar los beneficios de LAE.

2.3 Estándares del Estímulo Circadiano CS

Cada uno de los diferentes estándares del estímulo circadiano que veremos a continuación, está enfocado en un estudio de laboratorio específico. Este proyecto usa como referencia la guía de diseño UL, siendo esta, una orientación de diseño de iluminación que tiene en cuenta los valores de estímulo circadiano recomendados a lo largo del día. La guía UL fue el primer modelo encontrado para implementación del presente desarrollo; durante el avance del proyecto se encontró que otros estándares adoptaron estudios relacionados, pero que difieren en algunos aspectos.

El estándar WELL adopta los valores de EML relacionando también el EDI melanópico para recomendación de diseño de iluminación, aunque no propone una guía paso a paso para diseño como si lo hace UL. Se encontró también que UL adoptó el modelo (M. S. Rea et al., 2012b) que tiene en cuenta la relación de todos los 5 fotorreceptores para el cálculo de CS, mientras que los valores EML y EDI melanópico calculan el estímulo a partir de los valores de sensibilidad de los ipRGCs o sensibilidad de la Melanopsina.

Los estudios relacionados al diseño de iluminación circadiana siguen generando nuevas propuestas y no tienen aún valores definitivos fijos. Es seguro que se continúe investigando y aclarando las dudas que existen en la relación de la luz, el ojo humano y el estímulo circadiano. Los valores tomados para el caso de estudio en la sección 4 se aprecian en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Valores de estímulo circadiano recomendados para propiciar iluminación adecuada a humanos. Los valores han sido adoptados a partir de ensayos de laboratorio de acuerdo con la producción de Melanopsina en humanos. La producción de Melanopsina genera el estado de alerta en las personas.

| Und. de medida | Modo de cálculo | Referencias | Umbral | Vr. de umbral | Horario | Tiempo de exposición |
|------------------------|---|--|----------------------|---|----------------------|--|
| CS | involucra curvas de sensibilidad de fotoreceptores IpRGCs, Bastones, conos L+M, conos S | UL DG 24480 - 2020 (M. S. Rea et al., 2012b) | Nocturno | $CS \leq 0.1$ | después de 8 pm | durante el horario |
| | | | Vespertino | $CS \leq 0.2$ | 5 pm a 7 pm | |
| | | | transición | $CS < 0.3$ | 4 pm a 5pm | |
| | | | Diurno | $CS \geq 0.3$ | 7 a 4 pm | exposición mayor a 1.5 horas continuas |
| CS simplificado | involucra las funciones armónicas de color y los valores triestímulo | Piloto de obtención simplificada de CS (Babilon et al., 2021) | Adopta valores de CS | Adopta valores de CS | Adopta valores de CS | Adopta valores de CS |
| M-EDI o EDI melanópico | involucra curvas de sensibilidad $V_{2\lambda}$ y $Mel_{2\lambda}$ | CIE S026 E:2018 (Lucas et al., 2014) WELL v2 - 2022 | Nocturno | $M-EDI < 1$ | No específica | No específica |
| | | | Vespertino | $M-EDI < 10$ | No específica | No específica |
| | | | Diurno | $M-EDI > 275$ | > 12 pm | 4 horas, iniciando a más tardar a partir del medio día |
| EML | involucra curvas de sensibilidad $V_{2\lambda}$ y $Mel_{2\lambda}$ | WELL v2 - 2022 (Brown et al., 2022) | Diurno | 1 pto en WELL v2, 150 EML o 136 M-EDI en espacios con luz netamente artificial y 120 EML o 109 M-EDI en espacios con aporte de luz diurna | > 12 pm | 4 horas, iniciando a más tardar a partir del medio día |
| | | | | 3 pto en WELL v2, 275 EML o 250 lux M-EDI en espacios con luz netamente artificial y 180 EML o 163 M-EDI en espacios con aporte de luz diurna | | |

2.3.1 Guía de diseño de iluminación UL - DG 24480

El instituto de certificación UL Underwriters Laboratories en el 2019 presentó una guía práctica para iluminación circadiana. La métrica se basa en el cálculo del estímulo circadiano desarrollada por el Lighting Research Center LRC del Instituto Politécnico Rensselaer. La guía², sugiere los pasos para diseño de iluminación circadiana efectiva en espacios comerciales, de educación y espacios de industria(Laboratories, 2019). Todas las consideraciones de la guía están dadas en términos de iluminancia fotópica vertical E_v en los ojos de los ocupantes y no considera diseño de iluminación para personas que laboran en turno nocturno.

Pasos:

A. Establecer un criterio de luz Circadiana-efectiva.

Un mínimo de dos horas al día de la luz circadiana efectiva o $CS \geq 0.3$, deben ser establecidas para suprimir la producción de melatonina en la noche. Esta iluminación debe ser suministrada a los ojos de los ocupantes durante el horario diurno (7 am a 4 pm).

Después de las 4pm se debe hacer una transición garantizando un valor de $CS \leq 0.3$, los niveles de luz circadiana efectiva deberían ser limitados mientras se hagan suficientes para realizar tareas visuales durante estos periodos. El horario vespertino (5pm a 7pm) el valor recomendado es $CS \leq 0.2$. Después de 8pm el CS debe ser igual o menor a 0.1.

B. Seleccionar el tipo de luminaria

Se debe conocer la distribución de intensidad luminosa de la fuente de luz seleccionada.

C. Seleccionar la Distribución de Potencia espectral de la fuente luminosa

La distribución de potencia espectral SPD de la fuente de luz debe ser conocida mediante el fabricante o puede ser medida directamente con un espectroradiómetro. La distribución de potencia espectral impacta la habilidad para alcanzar los criterios de diseño de

² <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=36592&ShowFreeviewModal=1>

iluminación circadiana efectiva. Fuentes luminosas con igual temperatura de color correlacionada CCT, difieren en sus *SPDs*.

D. Ejecutar cálculos de software de diseño de iluminación

Software de diseño de iluminación SDI, debe ser usado para calcular la iluminancia fotópica del sistema de iluminación en los ojos de los ocupantes en el plano esperado E_v . El plano de trabajo a la altura de los ojos se asume entre 0.9 y 1.3 m sobre el suelo y se extiende a lo largo del espacio de trabajo.

Al menos 10 muestras representativas de E_v deben ser obtenidas.

E. Calcular el *CS* con respecto a E_v en el plano a la altura de los ojos de los ocupantes y la *SPD*.

Calcular el *CS*. La guía propone el uso de la calculadora pública CS Calculator (rpi.edu)³; calculo que se realizó en esta tesis por medio de la herramienta de cálculo propuesta en la página 72 . Posteriormente se promedian los valores de *CS*.

F. Determinar si el sistema de iluminación cumple con el criterio de diseño de iluminación circadiana efectiva

Si no se alcanza el diseño de criterio de iluminación circadiana efectiva, repetir los pasos previos después de alterar el tipo de luminario y/o la fuente de iluminación. Considerar adicionar luminarias como iluminación local en espacios de trabajo. Valores de reflectancia de diferentes superficies en la zona de estudio pueden también ser ajustadas en el SDI seleccionado. Considerar también usando una luminaria que no está en el plano de techo. La guía recomienda la integración de un control que permita disminuir el aporte del estímulo circadiano en horas de la noche.

³ <https://www.lrc.rpi.edu/cscalculator/>

2.3.2 Estándar Diseño de iluminación circadiana - Well

El estándar Well en el Diseño de Iluminación Circadiana ⁴, establece un umbral mínimo de intensidad de luz día ya que los efectos biológicos de la luz en los humanos pueden ser medidos por el Equivalente Melanópico en luxes o *EML*. Su principal objetivo es el proporcionar espacios arquitectónicos que no generen perturbación de los ciclos circadianos, mejorar la calidad de sueño y afectar positivamente el estado de ánimo y productividad de las personas.

El Instituto internacional de construcción WELL o IWBI⁵, Inicialmente ajustó un mínimo de 250 *EML* el cual fue actualizado recientemente a 240 *EML* por más de 4 horas al día. El umbral específico está sujeto a cambios a medida que avancen los desarrollos y estudios de la luz melanópica.

A. Intensidad de luz melanópica para áreas de trabajo

Las mediciones o cálculos de luz demostrarán que se cumple al menos uno de los dos requisitos.

- i. Al menos el 75% o más estaciones de trabajo deben tener como mínimo 200 *EML* medidos en el plano vertical (a una altura de 1,2 m sobre el suelo) para simular el ojo de los ocupantes. Este nivel de luz puede incorporar luz diurna y está presente en el horario de 9 am a 1 pm todos los días del año.
- ii. Todas las estaciones de trabajo con luz artificial deben entregar al menos 150 *EML* medidos en el plano vertical orientado hacia adelante.

B. Intensidad de Luz melanópica en espacios de vivienda.

⁴ <https://v2.wellcertified.com/v/en/light>

⁵ International WELL Building Institute (IWBI)/ [https://www.wellcertified.com/.](https://www.wellcertified.com/)

En todas las habitaciones, baños y cuartos con ventanas, uno o más accesorios proporcionan lo siguiente:

- i. Durante el día, se deben medir 200 *EML* o más sobre el plano vertical a 1.2 m sobre el suelo y frente a la pared en el centro de la habitación. Las luminarias existentes se deben atenuar con la luz día, pero pueden también alcanzar estos niveles de forma independiente.
- ii. En horas de la noche, las luces proporcionan no más de 50 *EML*, a 0.75 m sobre el nivel del suelo.

C. Intensidad de luz melanópica en cuartos de descanso.

Trabajadores expuestos a largas jornadas y a condiciones de luz limitadas, tendrán dispuestas zonas de descanso con las siguientes condiciones de luz.

- i. Las luces proporcionaran un promedio de al menos 250 *EML* medidos en el plano vertical a los 1.2 m sobre el nivel del suelo. Las luces serán atenuadas en la presencia de luz día, aunque pueden alcanzar dichos niveles de forma independiente.

D. Intensidad de luz melanópica en áreas de aprendizaje.

Al menos uno de los siguientes requerimientos debe ser alcanzado:

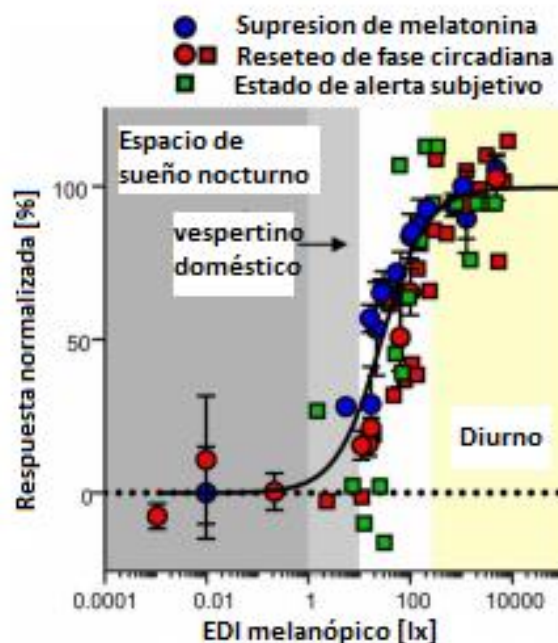
- i. Para áreas de aprendizaje de primaria, secundaria y adultos menores de 25 años, en zonas con luz día, al menos 125 *EML* medidos a los 1.2 metros de altura de nivel de suelo deben ser garantizados por al menos 4 horas al día todos los días del año. Estos niveles deben ser garantizados para al menos el 75% de los escritorios.
- ii. Las luces ambientales proveen iluminación mantenida en el plano vertical de *EML*, mayor o igual a las recomendadas en la tabla 3 de IES-ANSI RP-3-13 (illuminating engineering society- American National standards institute RP practice for office

lighting) (American National Standard Practice on Lighting for Educational Facilities, 2013)

2.3.3 Sistema de metrología de radiación óptica para respuestas a la luz influenciadas por ipRGCs - Estándar CIE S026 E:2018

Las sugerencias de adopción del EDI melanópico en luxes, están dadas por el 2do taller internacional en fotometría neurofisiológica y circadiana para el sueño. La Figura 2-1 ilustra los datos de estudios sin dilatadores de pupila, para exposiciones mayores a 2 horas con fuentes de luz de banda ancha. las áreas sombreadas muestran las recomendaciones para horarios nocturno o de sueño, vespertino y diurno.

Figura 2-1 Recomendaciones para exposiciones a luz melanópica en relación con la sensibilidad de supresión de melatonina, reinicio de fase circadiana y respuestas de alerta subjetiva en pacientes. Datos derivados de estudios de laboratorio en humanos sin el uso de dilatadores de pupila.



Fuente: Adaptado de (Brown et al., 2022)

A. Recomendaciones de iluminación diurna para espacios interiores

(Brown et al., 2022) recomienda trabajar a lo largo del día con un EDI melanópico de 250 lux medidos en el plano vertical a la altura de 1.2 (iluminancia vertical en el ojo en una persona sentada). Luz diurna debe ser usada como prioridad, si está disponible.

Si es estrictamente necesaria la iluminación artificial, se recomienda usar espectros de luz blanca con picos cercanos al espectro de acción melanópico para alcanzar el EDI melanópico recomendado.

B. Recomendaciones de iluminación vespertina para espacios residenciales e interiores

En el horario vespertino, al menos 3 horas antes de la hora de dormir, el EDI melanópico máximo recomendado es de 10 lux medidos en el plano vertical a una altura de 1.2 m. para poder alcanzar dichos niveles, el espectro de luz blanca debe contener mínimos niveles de longitudes de onda corta cercanos al pico de sensibilidad melanópica.

C. Recomendaciones de iluminación nocturna para espacios de descanso (sueño)

Los espacios de descanso (sueño) deben ser lo más oscuros posible. El EDI Melanópico máximo recomendado es de 1 lux medido en el ojo. Para actividades nocturnas en las que es indispensable la luz artificial, el EDI Melanópico máximo recomendado es de 10 lux medidos en el plano vertical a 1.2 metros de altura.

D. Consideraciones adicionales

- i. En lo posible, se debe garantizar ciclos con exposiciones diarias regulares de luz y oscuridad con el fin de alinear de la mejor manera los ritmos circadianos en pro de alcanzar buenas condiciones de comportamiento del sueño, cognición y salud.
- ii. Estas condiciones no pretenden eliminar las pautas de luz y seguridad en actividades diarias. Las pautas de esta guía deben ser tomadas a consideración adicional cumpliendo los estándares visuales.
- iii. Estas recomendaciones deben aplicarse en adultos con actividades regulares diarias. Para grupos específicos como niños, ancianos, o trabajadores por turnos, se tomarían consideraciones especiales.

3. Desarrollo e Implementación de herramienta de cálculo del estímulo Circadiano - CS

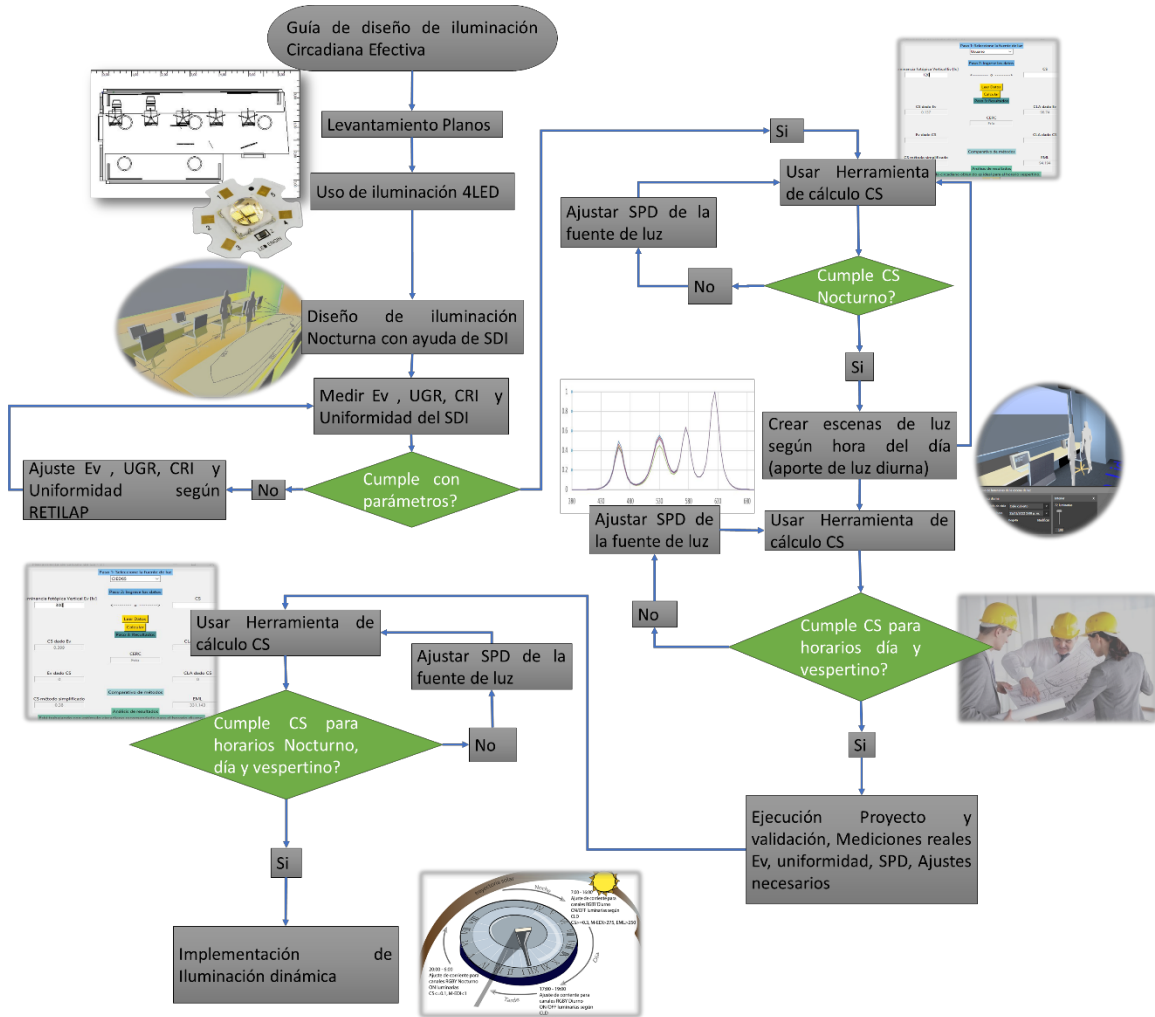
Para el cálculo del estímulo circadiano se desarrolló una herramienta gráfica de cálculo que permite la interacción con las variables de iluminación. La herramienta arroja los resultados para trabajo, comparación y análisis sobre las normativas existentes; de esta manera se contribuye al estudio del estímulo circadiano en el balance de métodos para facilitar su cálculo. El caso de estudio del capítulo 4 muestra la aplicación y uso real de la herramienta de cálculo CS.

3.1 Diagrama de flujo del desarrollo de la herramienta de cálculo de CS

Con el uso de la metodología y de los modelos de fototransducción circadiana se realizó el diseño de la herramienta de cálculo. El algoritmo empleado para el funcionamiento de la herramienta fue desarrollado de acuerdo con la secuencia del diagrama de flujo representado de la Figura 3-1 a la Figura 3-7.

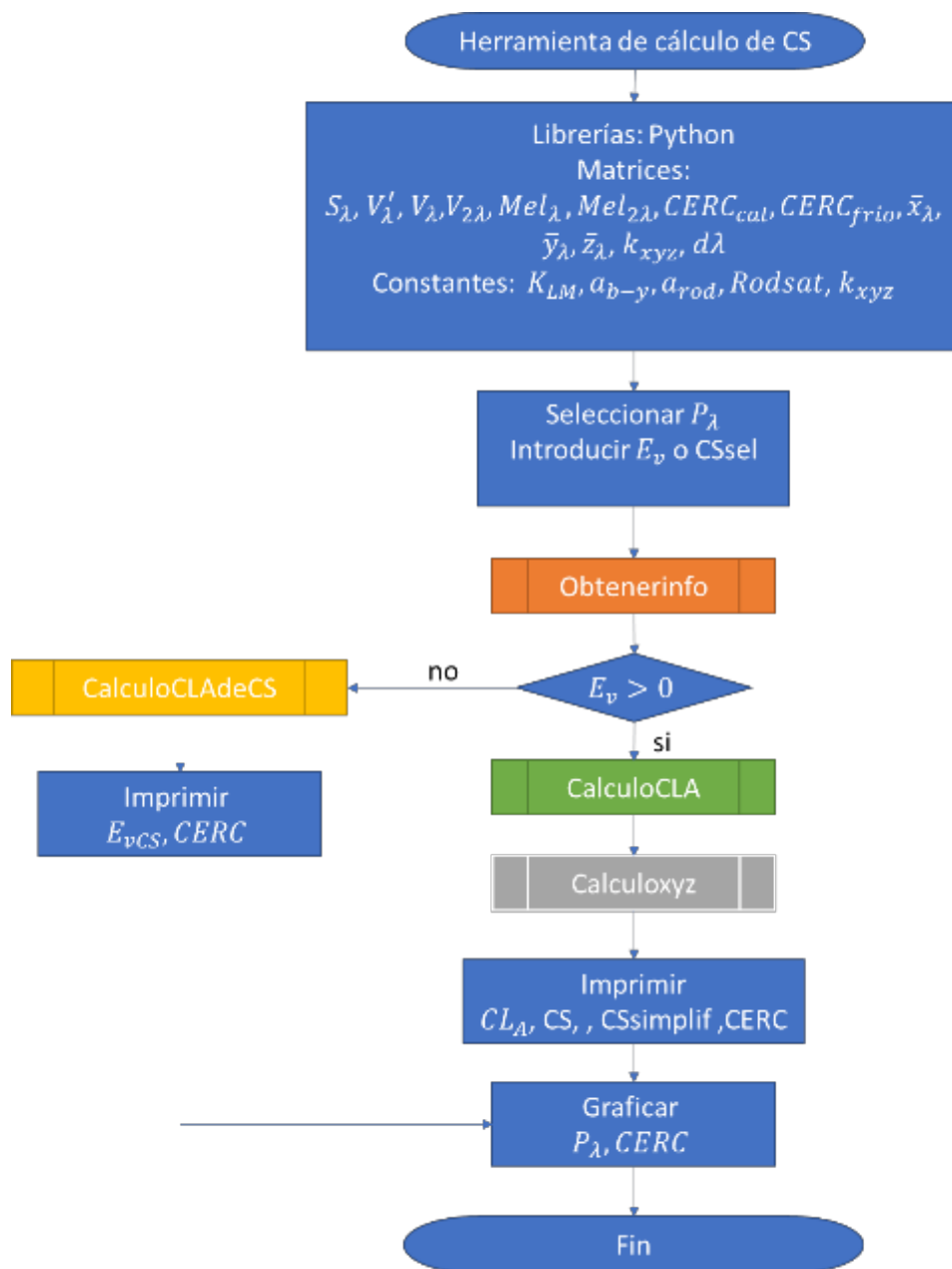
La Figura 3-1 muestra el algoritmo principal con el cual se inicia el cálculo de estímulo circadiano. Se usaron matrices con la información de los valores de la sensibilidad de fotorreceptores y valores de apoyo de cálculo. El algoritmo principal requiere de la información de espectro, E_v , y tipo de cálculo. De acuerdo con las variables seleccionadas, el algoritmo selecciona el subprograma para cálculo e impresión de resultados.

Figura 3-1 Diagrama de flujo de guía de diseño de iluminación circadiana efectiva propuesta. Los bloques representan los pasos para lograr la implementación de un proyecto de iluminación circadiana dinámica.



Fuente propia

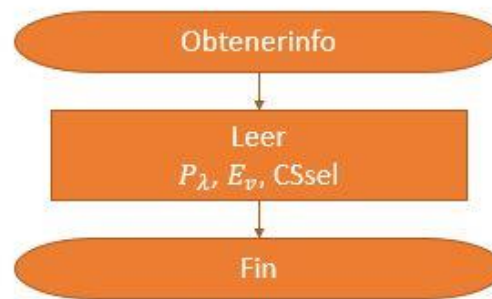
Figura 3-2 Diagrama de flujo programa principal. El desarrollo en python implica el uso de librerías para manejo de los datos ingresados como constantes y matrices. La herramienta de cálculo solicita información al usuario como escogencia de SPD, iluminancia medida o CS requerido. Otros bloques como subprogramas, impresión de resultados de cálculo y gráficas componen cada uno de los diagramas.



Fuente propia.

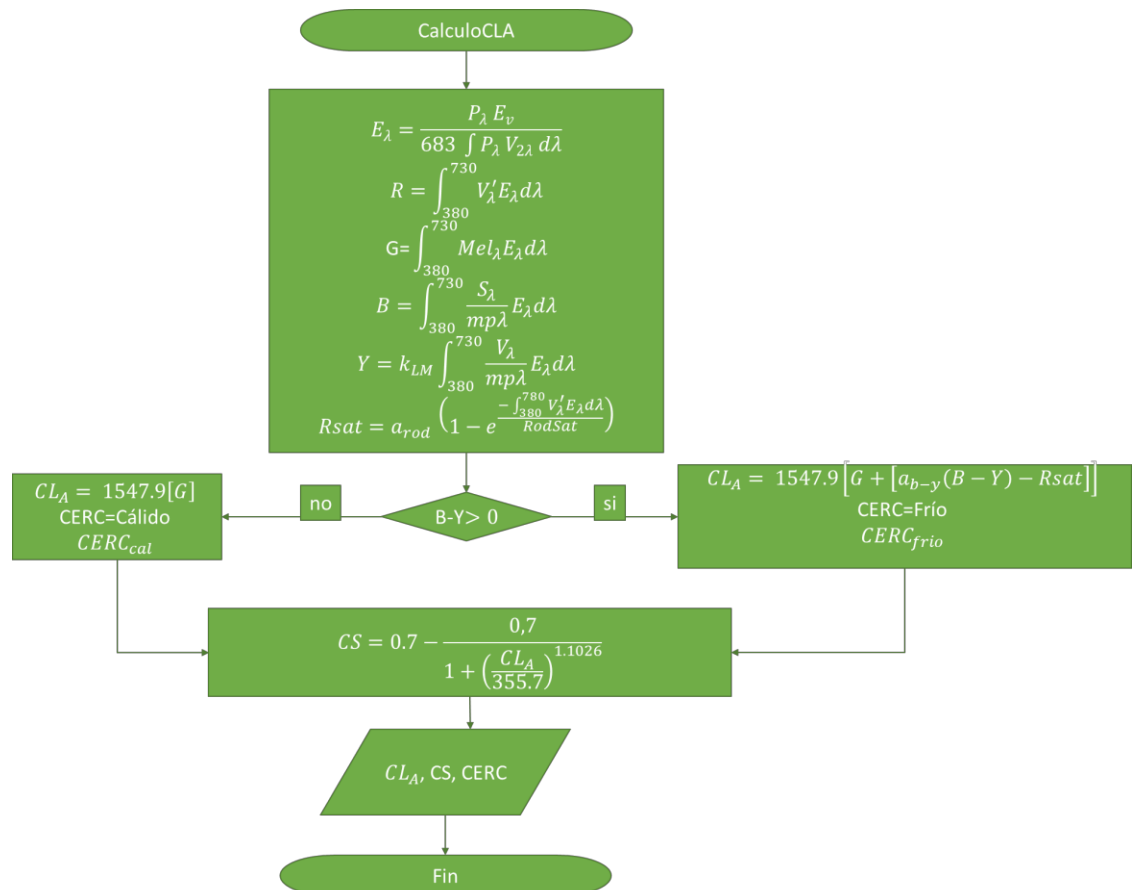
Las figuras 3-2 a 3-6 muestran los subprogramas usados para obtención de información desde la interfaz de usuario y cálculo por separado de los valores necesarios para obtención de valores de estímulo circadiano.

Figura 3-3: Diagrama de flujo subprograma: Obtenerinfo



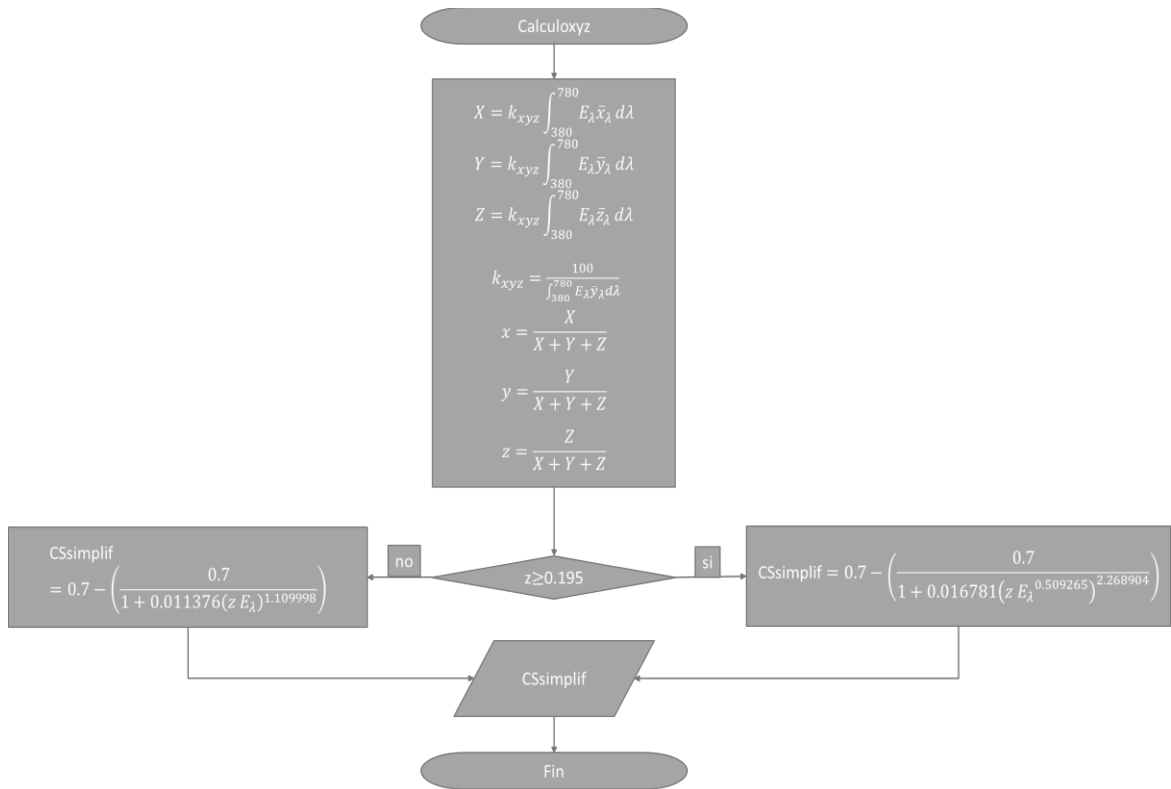
Fuente propia.

Figura 3-4: Diagrama de flujo subprograma: CalculoCLA



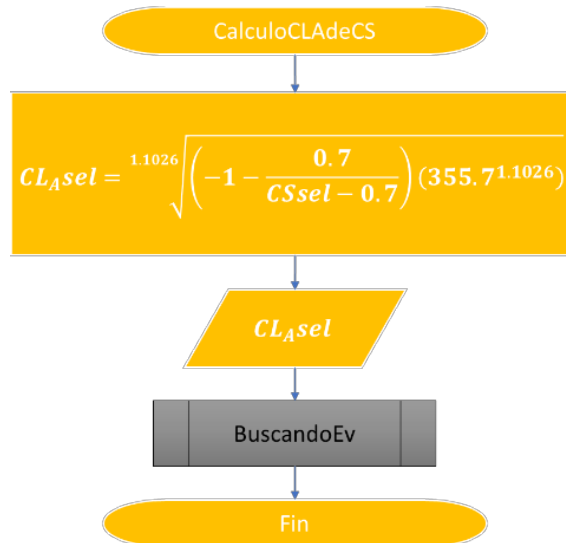
Fuente propia.

Figura 3-5: Diagrama de flujo subprograma: Calculoxyz



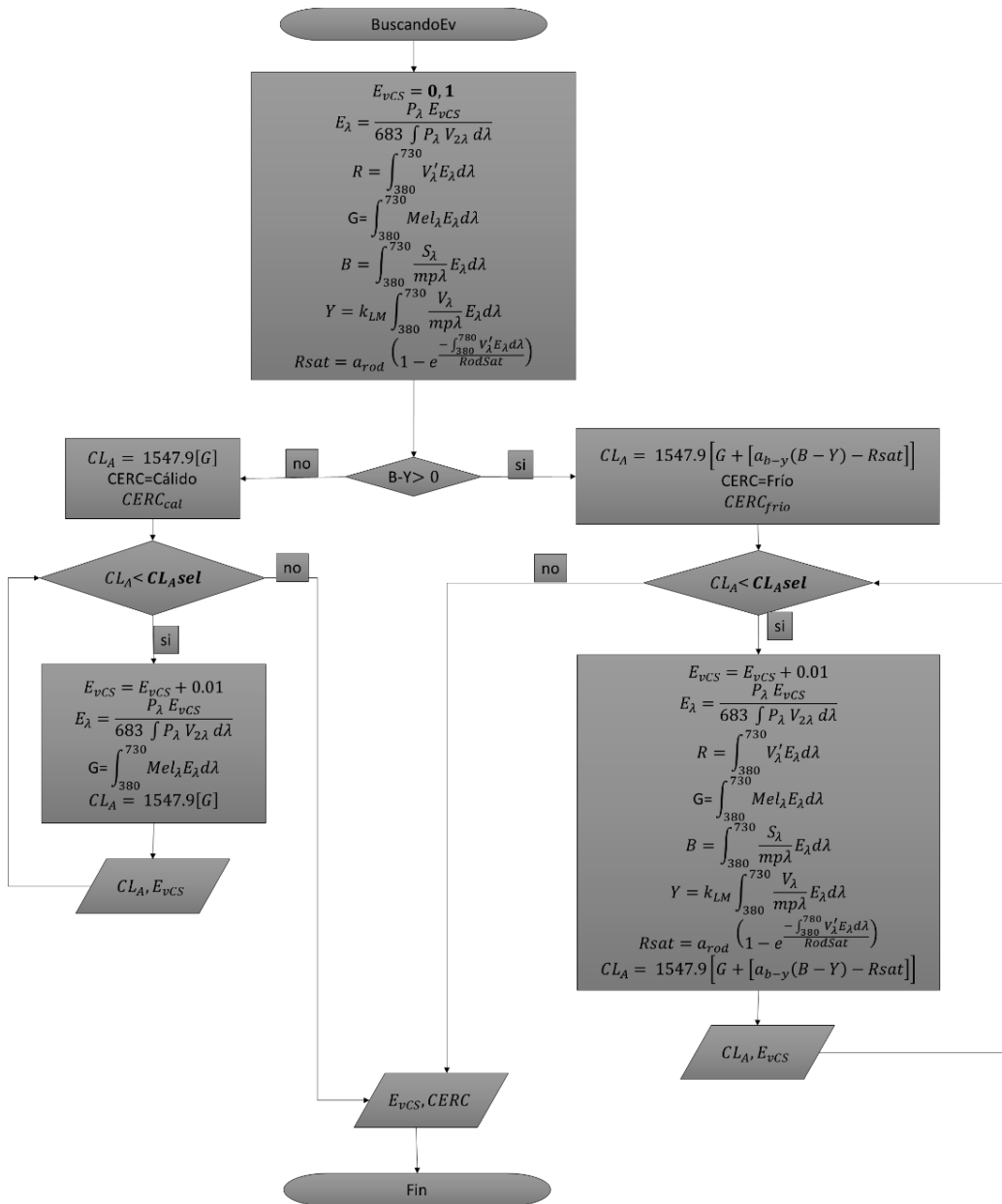
Fuente propia.

Figura 3-6: Diagrama de flujo subprograma: CalculoCLAdCS



Fuente propia.

Figura 3-7: Diagrama de flujo subprograma: BuscandoEv



Fuente propia.

3.2 Características

Para el desarrollo de la herramienta gráfica de cálculo, se usó el lenguaje de programación PYTHON escogido principalmente por ser un software de código abierto y tener una

interfaz amigable. Las librerías usadas para el desarrollo de la herramienta de cálculo de CS fueron:

A. Librería para manejo de matrices (Numpy)

Facilitó el uso de matrices para la interacción de las diferentes tablas. Es una librería estable y muy rápida.

Se definió un total de 22 matrices $n \times 1$, pertenecientes a:

- a. Longitudes de onda λ con $d\lambda = 2$
- b. Sensibilidad espectral de los fotorreceptores, conos, bastones y ipRGCs.
- c. Funciones armónicas de color \bar{x}_λ , \bar{y}_λ y \bar{z}_λ
- d. Valores *SPD* de iluminantes tomados de (CIE, 2005)
- e. Curvas de representación de la contribución espectral relativa de la respuesta circadiana o *CERC* cálido y frío.

B. Librería de operaciones matemáticas (Math)

Proporcionó el acceso a las funciones matemáticas definidas por Python. Con la ayuda de esta librería se operaron matrices y se hizo uso de exponenciales. Operaciones que contienen exponenciales como por ejemplo el caso de la ecuación 1-33, gracias a la librería `math()`, se trabajaron de forma sencilla como se aprecia en la ecuación 3-1:

3-1

$$CS2 = 0.7 - (0.7 / (1 + 0.016781 * (zminus * E.get() ** (0.509265)) ** (2.268904)))$$

C. Librería para uso de gráficas (Matplotlib)

Es una librería que permite el uso e implementación de gráficos en dos dimensiones. Además, da las facilidades para configurar gráficos de muchas maneras diferentes. El uso de esta librería permitió obtener los gráficos de los SPD de cada fuente de luz escogida y la *CERC* relacionada.

Mediante el comando `plt.plot()` se solicitó la gráfica requerida en cada caso. Se usó también el comando `NavigationToolbar2Tk()`, con el cual se trabaja en la librería Tkinter para poner barras de herramientas a los gráficos. Dichas barras de herramientas permiten la manipulación del gráfico para dar zoom, imprimir, buscar valores de las coordenadas cartesianas x, y , entre otros.

D. Librería para desarrollo de la interfaz de usuario (Tkinter)

Tkinter proporciona a Python la posibilidad de manejo y administración de ventanas. Los espacios para introducción de datos, muestra de resultados y listas desplegables fueron implementados con esta librería. Mediante el comando Label() se agregaron líneas de texto, con Entry() se posicionaron cajas para el ingreso de datos. Se usó ttk.Combobox() para la implementación de la lista desplegable de selección de fuentes de luz. Los botones de “leer datos”, “calcular” y “gráficar”, fueron implementados mediante Button().

E. Librería de ayuda de operación entre matrices (Pandas)

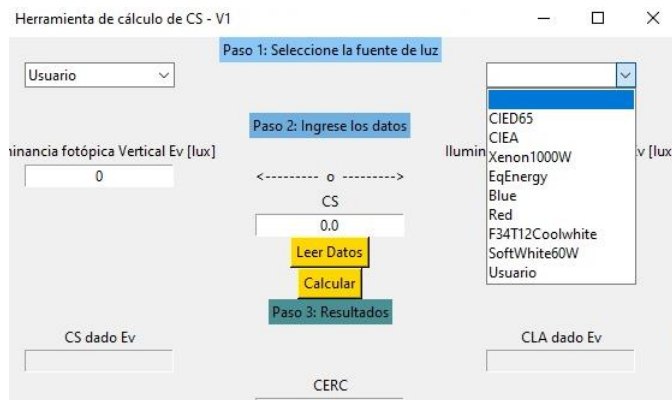
Especializada en el manejo y análisis de estructuras de datos. Se usó para la manipulación de algunos de los arreglos matriz contenidos en esta tesis. Por ejemplo, el uso de esta librería permitió a la herramienta de cálculo de CS, interactuar con datos contenidos en una tabla de Excel con el fin de facilitar al usuario el ingreso de los SPD personalizados. Esto permite a la herramienta desarrollada, ser más amigable con el usuario y le abre la posibilidad de llamar datos desde algún archivo de modificación de espectros para hacer más automático el proceso.

3.2.1 Uso de la herramienta de cálculo de CS

La herramienta de cálculo desarrollada permite mediante pasos sencillos, lograr la obtención de los valores de CS para el diseño de iluminación circadiana efectiva. Esta herramienta es intuitiva y fácil de manejar. En la Figura 3-8 se muestran las listas desplegables que contienen algunas fuentes de luz con espectros ya definidos. Como paso 1 se selecciona la fuente de luz con la cual se trabajará en el diseño de iluminación, se puede escoger una sola fuente de iluminación en la lista desplegable izquierda, o la combinación de dos SPD a partir de la selección de la lista desplegable del lado derecho.

La selección de la fuente de luz “Usuario”, tomará del archivo de Excel de nombre “Usuario.xlsx” ubicado en la carpeta del programa, la información de espectro que hayamos ingresado. “Usuario.xlsx” permite el ingreso de datos de un espectro de $d\lambda$ fijo de 2 nm dentro de las longitudes de onda de 380 nm hasta 730 nm.

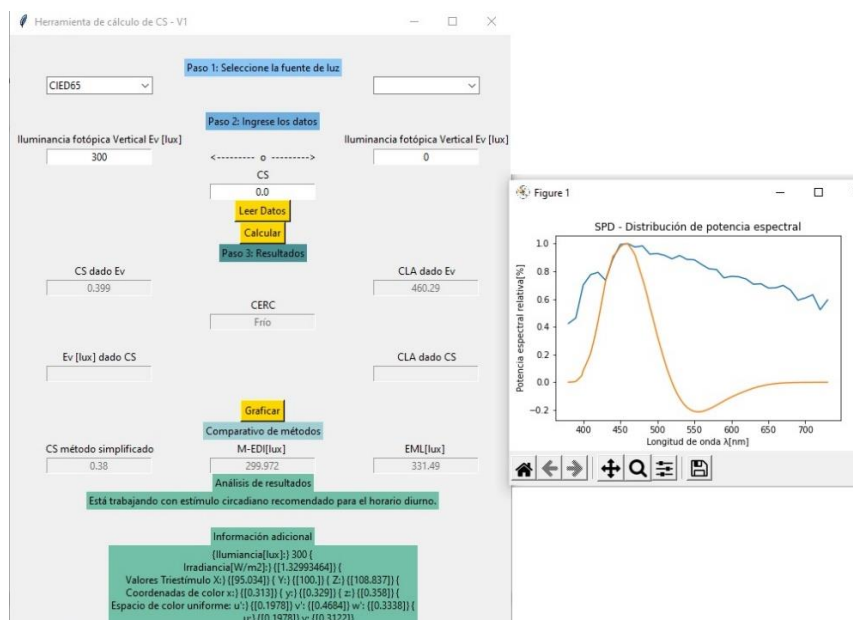
Figura 3-8: Herramienta de cálculo de CS: Paso 1. La selección como lista desplegable del SPD por defecto o un SPD ajustado por el usuario.



Fuente propia.

Una vez seleccionada la fuente de luz, podemos ingresar la iluminancia para cálculo de CS y otras características. Otra opción será calcular la iluminancia requerida, ingresando el valor CS según el espectro de la fuente de luz seleccionada. En la Figura 3-9 se muestran los resultados calculados a partir de la iluminancia vertical en el plano de trabajo; dicha iluminancia será calculada por el SDI a la altura de trabajo inicialmente definida.

Figura 3-9: Herramienta de cálculo: entrada de Ev medido. La herramienta calcula el CS a partir de la iluminancia vertical medida y el SPD seleccionado.



Fuente propia.

Para el caso contrario, en el paso 2 se deja la E_v en cero y se ingresa el valor de CS deseado de acuerdo con la fuente de luz seleccionada. Esta opción simplemente arrojará el CERC de la fuente de luz, y los valores de E_v y CL_A como se observa en la Figura 3-10.

Figura 3-10: Herramienta de cálculo de CS: entrada de CS deseado. Calcula la iluminancia vertical que debe ser medida en el área y con la cual se garantiza el CS deseado a partir del espectro seleccionado.



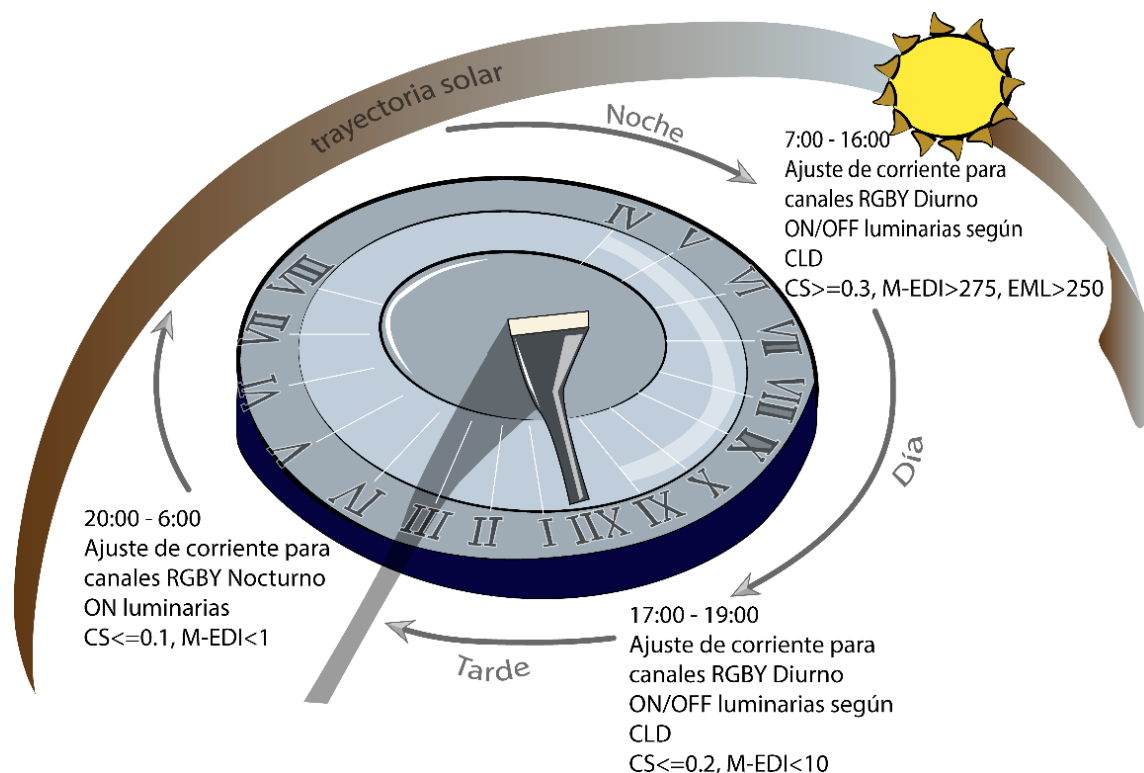
Fuente propia.

Adicionalmente la herramienta de cálculo muestra los valores calculados a partir de los métodos de las secciones 1.10 a 1.13. El análisis de resultados está basado en las recomendaciones de (Laboratories, 2019). La información adicional deriva de los cálculos expuestos en (CIE TC 1-48, 2004), cálculos realizados a partir de los valores de SPD de la fuente de luz seleccionada.

3.2.2 Guía propuesta para diseño de iluminación circadiana dinámica

De acuerdo con el desarrollo de la herramienta de cálculo de estímulo circadiano y teniendo en cuenta los estándares relacionados, se recomienda usar los pasos para un diseño de iluminación circadiana adecuado como se muestra en la Figura 3-11. El diseño de iluminación implica desde un estado inicial de levantamiento de planos, hasta la implementación en sitio de la iluminación dinámica que garantiza un adecuado estímulo circadiano en los ocupantes de un espacio arquitectónico determinado. Se deja abierta a gusto del diseñador, la escogencia del software de diseño de iluminación para medir y garantizar características como E_v , UGR, CRI y Uniformidad.

Figura 3-11 Esquema de ajuste de espectro según hora del día. Representación gráfica del funcionamiento de la iluminación dinámica. Los tres horarios de control de CS recomendados por (Laboratories, 2019), dan la pauta para ajustes del espectro de iluminación según hora del día.



Fuente propia.

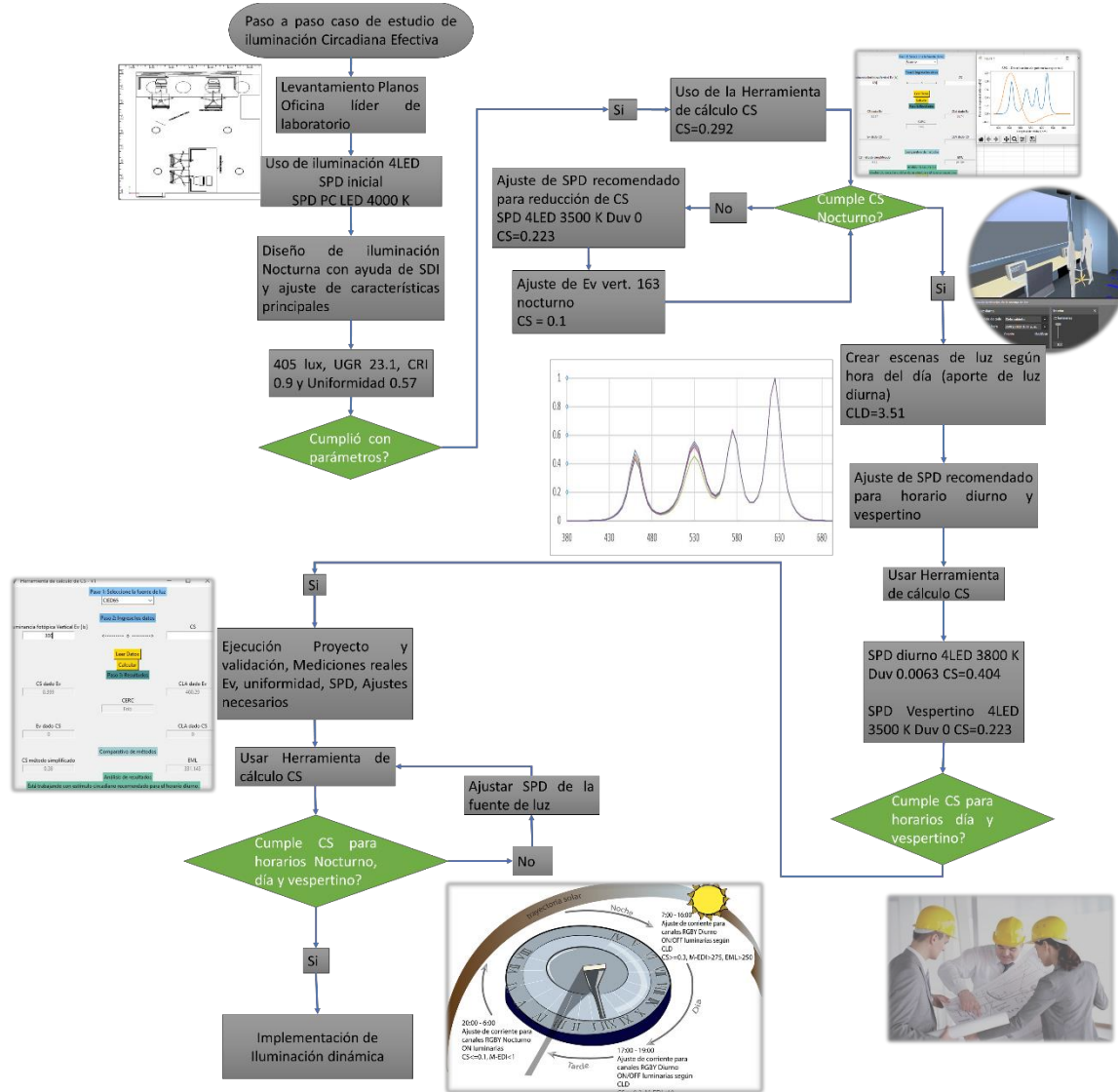
El uso de la herramienta de cálculo de CS es necesario para verificar que el diseño de iluminación garantice la estimulación circadiana acorde con los parámetros iniciales. Finalmente, la guía de diseño de iluminación plantea el uso de iluminación dinámica con la que se adaptará por medio de la modificación del espectro, la estimulación adecuada al sistema circadiano.

La iluminación dinámica ajustará los parámetros de las fuentes de luz instaladas, según horario actual, horario diurno, horario vespertino, horario nocturno. Cada una de las condiciones concertará las características de iluminación que garantizan el ajuste del espectro de la fuente de luz para cumplir con las condiciones de iluminación circadiana según la zona. Con el uso de iluminación 4LED RGBA, el arreglo de espectro para la iluminación dinámica corresponderá a la entrega de corriente de cada led, ver ejemplos de Tabla 4-2 y Tabla 4-5.

De esta manera el diseño de iluminación con el uso de iluminación dinámica que permita el estímulo de los ritmos circadianos queda concluido.

La Figura 3-12 muestra un ejemplo del uso de la guía de iluminación propuesta. Para efectos prácticos únicamente se exponen los valores característicos del área nombrada como oficina líder. Los valores de iluminancia, UGR, CRI y uniformidad, se ajustaron de acuerdo con Tabla 1-1 y Tabla 1-2 de la sección 1.6.1. Aunque el SPD en horario nocturno fue ajustado, los valores de estímulo circadiano nocturno para esta área, no fueron acordes a lo recomendado por (Laboratories, 2019), finalmente se realizó un ajuste en la iluminancia del área. En el horario diurno y vespertino, los SPD recomendados en la sección 4.4 garantizan un estímulo circadiano acorde con la recomendación (Laboratories, 2019). Durante la ejecución e implementación de un proyecto de este tipo, se recomiendan las mediciones reales con el fin de ajustar las características de iluminación puntual de cada área y satisfacer los requerimientos de iluminación circadiana.

Figura 3-12 Proceso de diseño de iluminación dinámica aplicado al área de trabajo (oficina líder) del caso en estudio del capítulo 4. Los valores característicos de iluminación presentados fueron calculados con la herramienta de cálculo de estímulo circadiano recomendada a partir de los valores calculados con el SDI y el SPD.



Fuente propia.

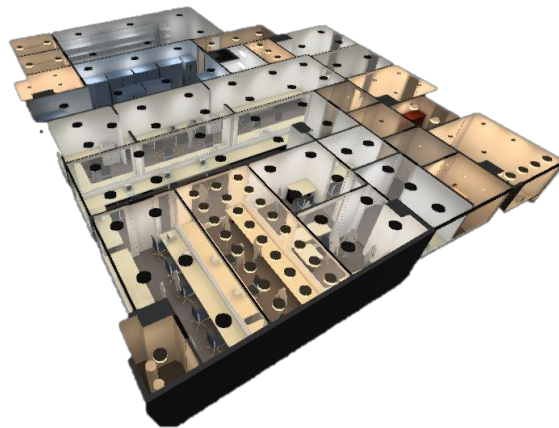
4. Caso de Estudio

4.1 Preliminares de diseño

Este trabajo final de maestría presenta el uso de la herramienta de cálculo de CS hacia el diseño y evaluación de estudios de iluminación. Para efectos prácticos se muestra la aplicación de la herramienta de cálculo en un laboratorio de muestras médicas, basados en la guía UL 24480 de la sección 2.3.1 y el balance de los estándares WELL y CIE S026 de las secciones 2.3.2 y 2.3.3 respectivamente.

Se llevó a cabo la selección de las fuentes de iluminación teniendo en cuenta el aporte de la luz día y apoyados en el software DIALUX Versión 5.9.2.52160 para diseño de iluminación. También se consideró la ubicación geográfica del edificio y el diseño de fachada que permite el aporte de la iluminación natural con parámetros de zona horaria UTC-05:00 Bogotá Lima quito, coordenada de Longitud -74.13, Latitud 4.68 y Orientación hacia el norte 323.57. De esta manera se modeló el laboratorio de muestras médicas de acuerdo con los planos arquitectónicos reales como se aprecia en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Diseño de iluminación de laboratorio de muestras médicas. Se distinguen diferentes temperaturas de color debido a los SPD ajustados. El laboratorio de muestras médicas contiene oficinas, áreas de trabajo de procesamiento de muestras, zonas comunes, guardarropas, etc. Cada zona obtuvo características de iluminación específicas.



Fuente propia

Se adicionaron también elementos estructurales como marcos, ventanas y puertas. El laboratorio de muestras médicas tiene espacios tales como oficinas, puestos de trabajo, zonas de procesamiento de muestras, pasillos, exclusas entre otros.

Figura 4-2 Diseño de iluminación zonas microscopía y microbiología. Iluminación nocturna de áreas de procesamiento de muestras y puestos de trabajo. Las paredes en su mayoría, tienen ventanales que permiten la visibilidad de otras áreas contiguas.



Fuente propia.

La disposición de las luminarias se realizó con empotramiento al techo y un modelo lineal. Las zonas con aporte de luz tienen disposiciones específicas de luminarias proponiendo un control de apagado y encendido en las zonas que así lo requieren. Se cumplió con los requisitos de niveles de iluminación, uniformidad e índices de deslumbramiento de la sección 1.6.

El SDI no tiene en cuenta la distribución de potencia espectral de la fuente de luz para los cálculos de iluminancia, a diferencia de la herramienta de cálculo de CS desarrollada. Se contempló la armonía entre el SDI y la herramienta de cálculo de CS trabajando con el valor de flujo luminoso de la fuente de luz. En vista de que Dialux no trabaja directamente con el espectro si no con el flujo luminoso de la fuente de luz, se usó la herramienta de

cálculo para hallar el flujo luminoso a partir del espectro seleccionado. Primero se asignó un espectro fijo con el cual se supone Dialux ejecuta los cálculos:

4-1

$$\phi_{Vfijo} = 683 \int_{380}^{730} P_{\lambda fijo} V_{2\lambda} d\lambda$$

Para simular un cambio de espectro en el SDI, calculamos el $\phi_{Vdiseño}$ a partir de su relación con el ϕ_{Vfijo} .

4-2

$$k_{\phi SPD} = \frac{\phi_{Vdiseño}}{\phi_{Vfijo}} = \frac{683 \int_{380}^{730} P_{\lambda diseño} V_{2\lambda} d\lambda}{683 \int_{380}^{730} P_{\lambda fijo} V_{2\lambda} d\lambda}$$

donde $k_{\phi SPD}$ será para nosotros el factor de corrección del flujo según el SPD. Así, para trabajar en Dialux con un cambio de espectro, basta con usar la ecuación 4-3.

4-3

$$\phi_{Vdiseñocorregido} = \phi_{Vfijo} * k_{\phi SPD}$$

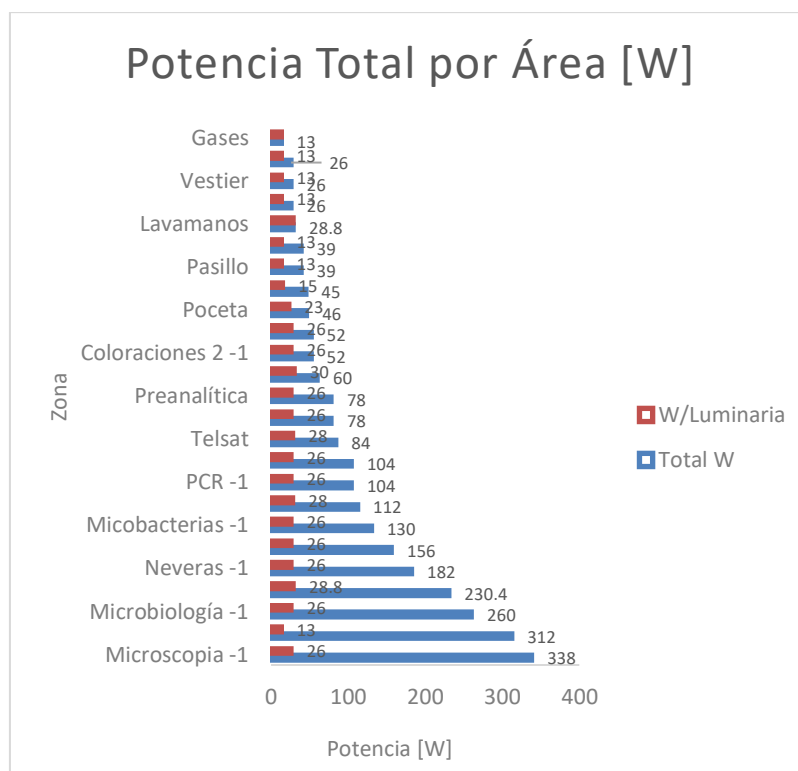
Se seleccionó una escena con luz diurna para cielo nublado y sin alteraciones de sombra para diferentes horas el día. También se modeló una escena con luz nocturna y se ajustaron valores de atenuación, horario y cantidad de luminarias encendidas. Los cálculos para luz nocturna se ejecutaron descartando resultados alterados por superficies y muebles y tomando solo las superficies de cálculo asignadas. Las superficies de cálculo fueron nombradas como: plano útil a 0.75 m de la altura del suelo y plano vertical a 1.1 m de la altura del suelo.

La cantidad de luminarias por zona varía según el área, flujo luminoso de la fuente de luz seleccionada, distribución espacial garantizando la iluminancia, uniformidad y UGR. Los cálculos realizados, no tienen en cuenta muebles y objetos de cada área; las sombras producidas por dichos elementos afectan fuertemente las condiciones de diseño.

Los índices de deslumbramiento se alteran dependiendo de la ubicación del ocupante, sin embargo, se diseñó dentro de los índices UGR de la Tabla 1-1. En las zonas con gran cantidad de ventanas, el UGR fue controlado reduciendo el flujo luminoso de cada luminaria, pero aumentando en cantidad para garantizar E_v ; como ejemplo, la zona COVID fue la zona con más luminarias asignadas debido a los ventanales con el fin de reducir el UGR.

La potencia total instalada por área se muestra en la Figura 4-3. Las áreas con mayor consumo son las áreas más grandes, microscopía, COVID y Microbiología. Se debe tener en cuenta que dicho consumo está relacionado a la iluminación activa en el horario nocturno y sería el consumo máximo en iluminación ya que esta puede variar según el uso de las áreas.

Figura 4-3: Potencia Total por Área [W]. valores de consumo unitario por luminaria de espectro fijo y según cantidad de luminarias por área. Las luminarias con mayor consumo están instaladas en las zonas más que requieren iluminancia para zonas de trabajo.

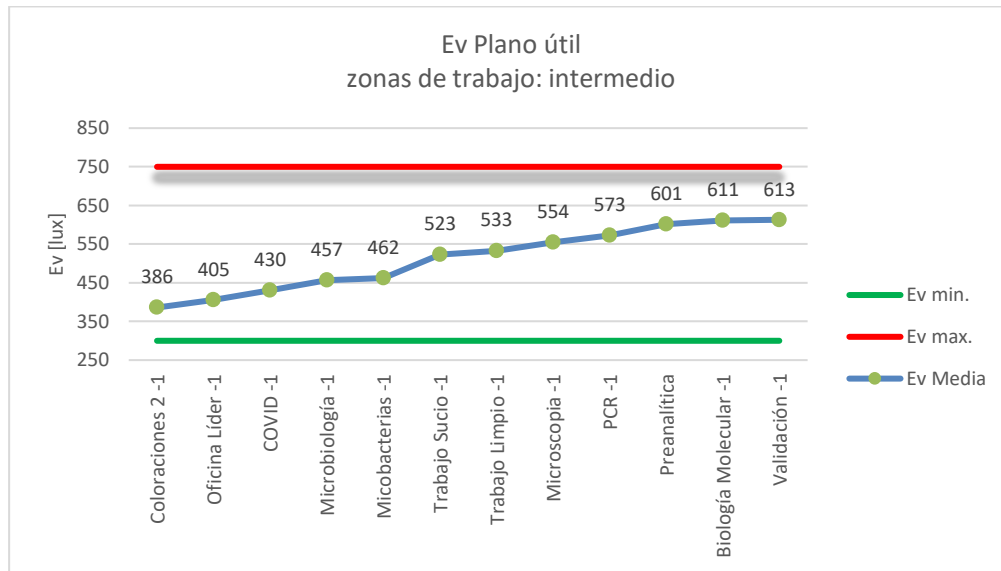


Fuente propia.

4.2 Cálculo de CS en iluminación nocturna

La E_v,med fue calculada inicialmente para el horario nocturno a fin de impedir cualquier afectación de la luz diurna en los cálculos. Se aprecian en Figura 4-4, Figura 4-5 y Figura 4-6, las E_v máximas y mínimas de diseño en concordancia con la Tabla 1-1.

Figura 4-4: Iluminancias en plano útil (0.85m) zonas de trabajo: intermedio. Los valores de iluminancia máxima y mínima según los valores adoptados de RETILAP. Iluminancias medias se mantienen dentro del umbral y garantizan la uniformidad, CRI y UGR.

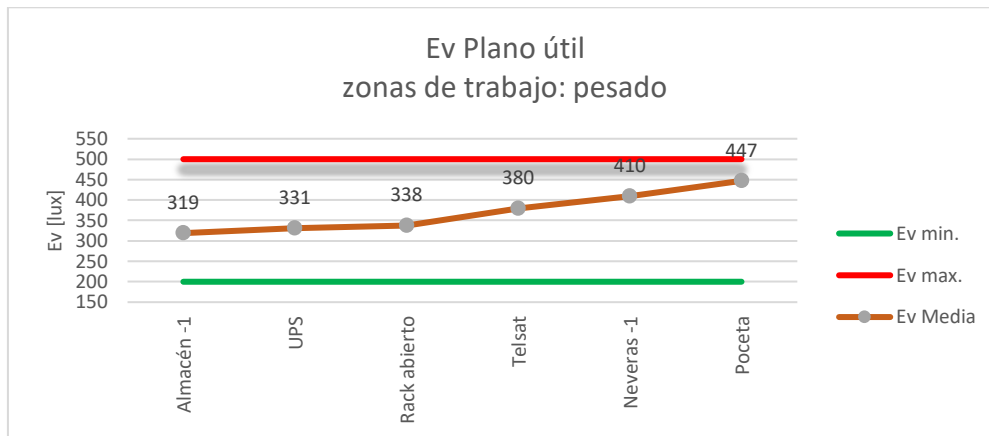


Fuente Propia.

Para las zonas de trabajo intermedio se diseñó con E_v mínima de 300 lux y E_v máxima de 750 luxes de la Figura 4-4. Las E_v medias más altas se midieron en preanalítica, biología molecular y validación. El diseño de iluminación para estas áreas tuvo en cuenta la uniformidad igual o superior a 0.5 como se aprecia en la Figura 4-7.

La clasificación de zonas de trabajo pesado se asignó a las zonas que, a pesar de no tener la necesidad de iluminación para trabajo de precisión, sí requieren iluminación adecuada para revisiones y trabajos específicos de la zona, ver Figura 4-5. La iluminancia más alta la obtuvo el área de la poceta, aunque se mantuvo casi 50 lux por debajo del máximo.

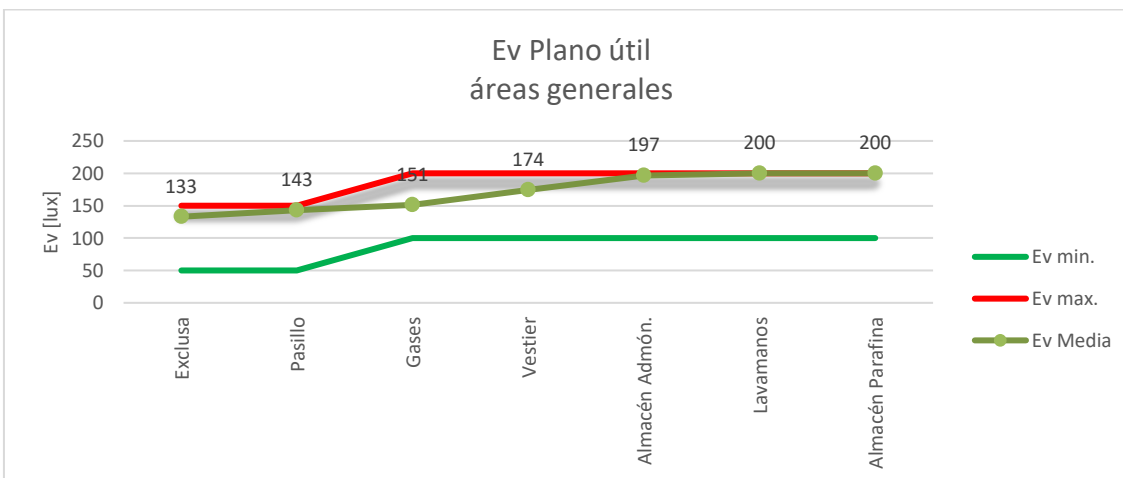
Figura 4-5: Iluminancias en plano útil (0.85m) zonas de trabajo: pesado. Los valores de iluminancia máxima y mínima según los valores adoptados de RETILAP. Iluminancias medias se mantienen dentro del umbral y garantizan la uniformidad, CRI y UGR.



Fuente propia.

Las áreas generales tienen una iluminancia menor que las zonas de trabajo, sin embargo, pueden ser zonas con alto tráfico de personas. Pasillo y exclusas tienen un diseño de iluminancia de máximo 150 lux a diferencia de los 200 lux de las otras áreas. Las áreas de almacén admón., parafina y área de lavamanos, fueron diseñados justo sobre el límite de los 200 lux cómo se lo ilustra la Figura 4-6.

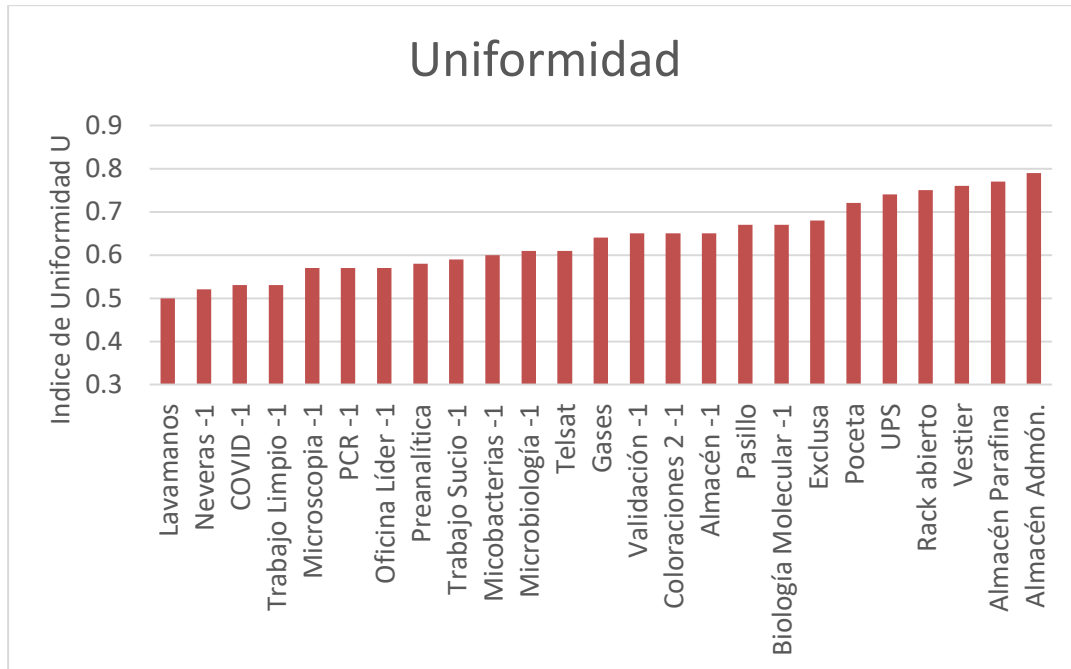
Figura 4-6 :Iluminancias en plano útil (0.85m) áreas generales. Las áreas generales fueron provistas de fuentes de iluminación de flujo menor para estar dentro del umbral de iluminancia requerida por norma.



Fuente propia.

De acuerdo con la sección 1.6, se diseñaron las zonas para obtener la máxima uniformidad. Son aceptadas las Uniformidades iguales o superiores a 0.5. Para este diseño se garantizó la mayor uniformidad de iluminación sobre las zonas con puestos de trabajo.

Figura 4-7 :Uniformidad de Iluminación en áreas. Se garantizaron uniformidades superiores al 0.5.

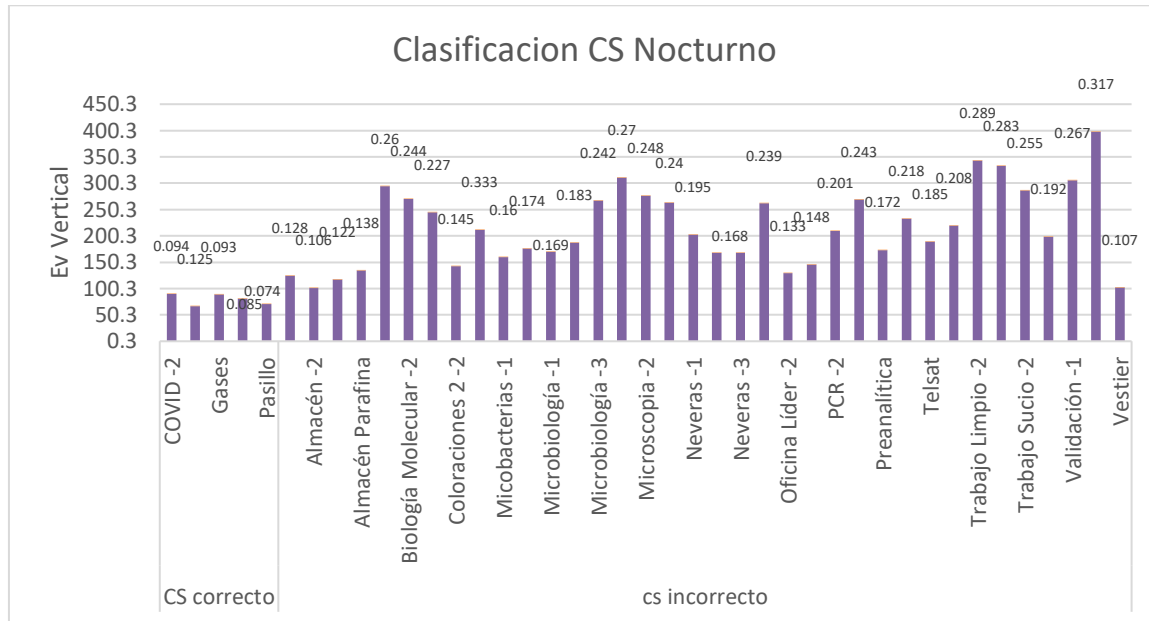


Fuente propia.

En el diseño de iluminación nocturna se obtuvieron los resultados de la Figura 4-8 . Se muestran los valores de CS para la iluminación propuesta, trabajando dentro de los parámetros de E_v en el plano de trabajo a 0.85 m del suelo. Para todas las zonas se modelaron varios planos de medición de E_v vertical , todos a 1.1 m de altura del suelo simulando la iluminancia percibida en los ojos de los ocupantes.

En la Figura 4-8 , se observan la mayoría de las zonas con CS incorrectos, situación que amerita iluminación dinámica para garantizar una iluminación circadiana efectiva. Para lograr el control del CS en horario nocturno, después de 8pm, sin afectar la E_v en el plano de trabajo, es necesario modificar el espectro de la luminaria.

Figura 4-8: Clasificación CS Nocturno. Una fuente de luz LED de espectro fijo no garantizó estímulos circadianos acordes para iluminación nocturna. La mayoría de los valores de CS estuvieron por encima de la recomendación UL.

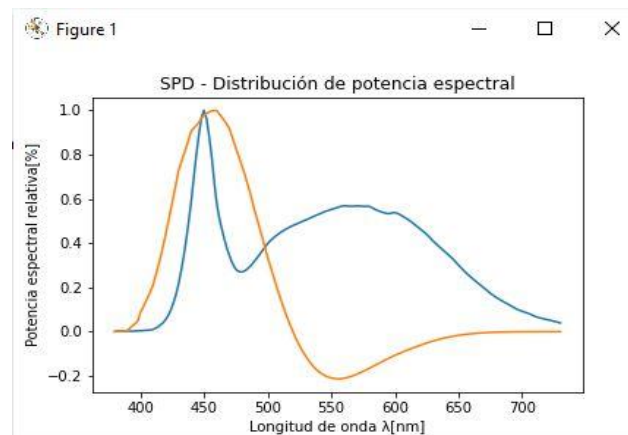


Fuente propia.

El diseño de iluminación propuesto trabajó el espectro con CERC frío de la Figura 4-9

Figura 4-9. En la sección 4.4 se ilustrarán algunos espectros modificados con los que se mejoran los $CS > 0.1$.

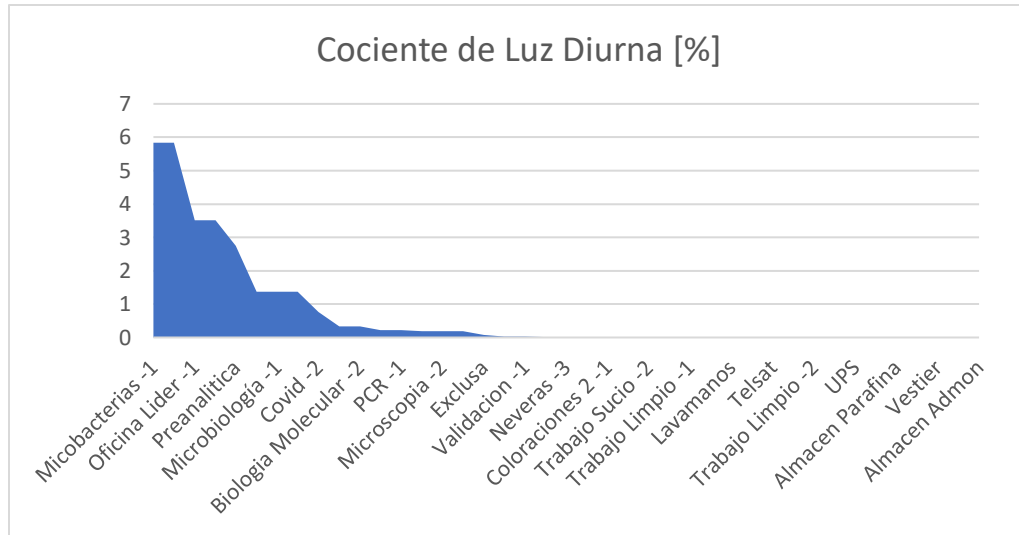
Figura 4-9: CERC frío para LED con CCT 4000 K. SPD de fuente de luz instalada en el estudio de iluminación de espectro fijo.



Fuente propia.

4.3 Cálculo de CS en Iluminación diurna

Figura 4-10 :CLD: cociente de luz diurna. Los valores por encima de 0 indican que las áreas tienen aporte de luz diurna. Las áreas con mayor aporte de luz diurna cuentan con entrada de luz solar directamente de la fachada del edificio.



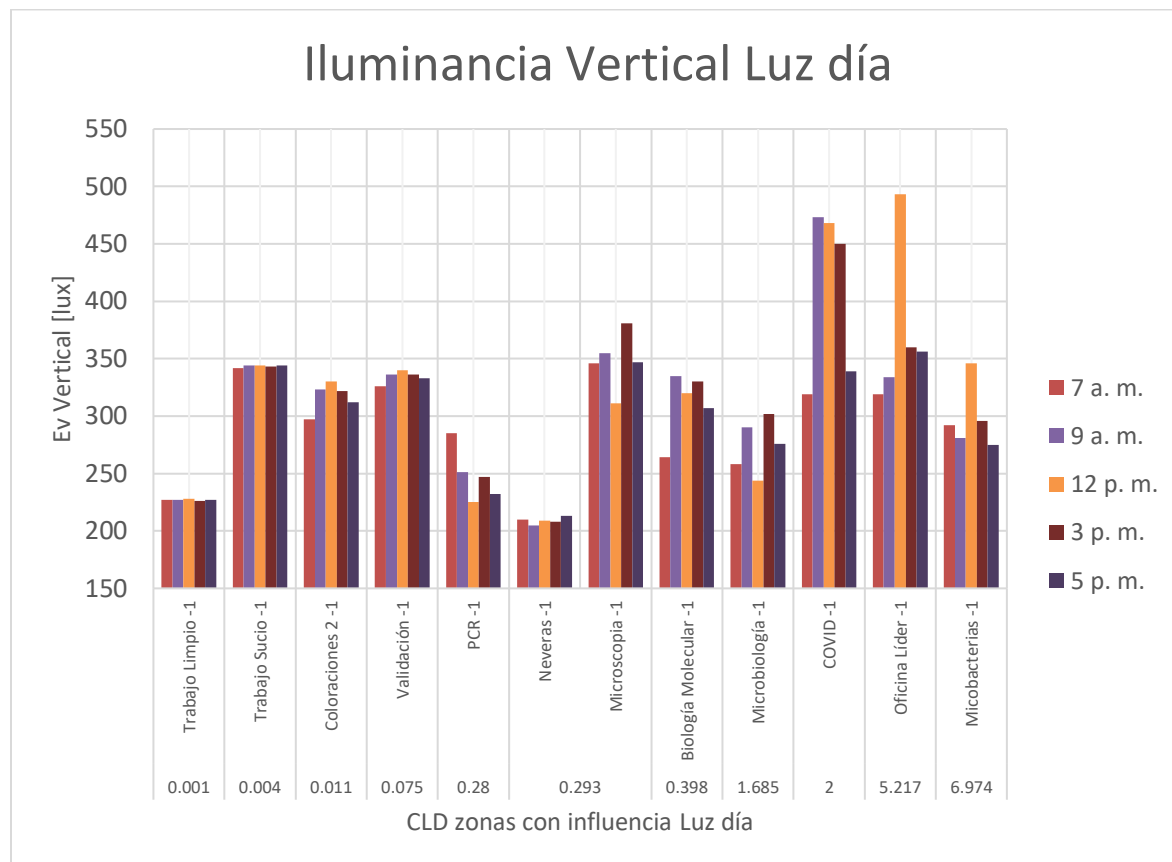
Fuente propia.

Condiciones de Simulación:

- Cielo Nublado
- Fecha 25 enero 2022
- Hora 12 pm

Para obtener los valores de E_v vertical se crearon escenarios de luz según hora, en los que se activaron o desactivaron luminarias para trabajar sobre los valores E_v de diseño de la Tabla 1-1. En la Figura 4-11 se aprecian los valores de E_v vertical obtenidos. Se puede ver que según sea el valor del cociente de luz diurna CLD , puede haber una variación de la iluminancia debido a la combinación de las fuentes de luz artificial y el aporte de luz día o luz natural. No se muestran las zonas con $CLD = 0$ ya que los resultados son los mismos para la configuración de iluminación nocturna sección 4.2.

Figura 4-11 :Iluminancia Vertical con aporte de Luz día. Escenas de luz creadas dentro de el SDI con variaciones en cantidad de iluminarias encendidas según la hora del día. Los cambios bruscos de iluminancia en algunas zonas se deben al apagado de luminarias para lograr controlar la iluminancia provocada por el ingreso de luz solar. La ubicación geográfica de las zonas del edificio también influyó en la iluminancia según el horario.



Fuente propia.

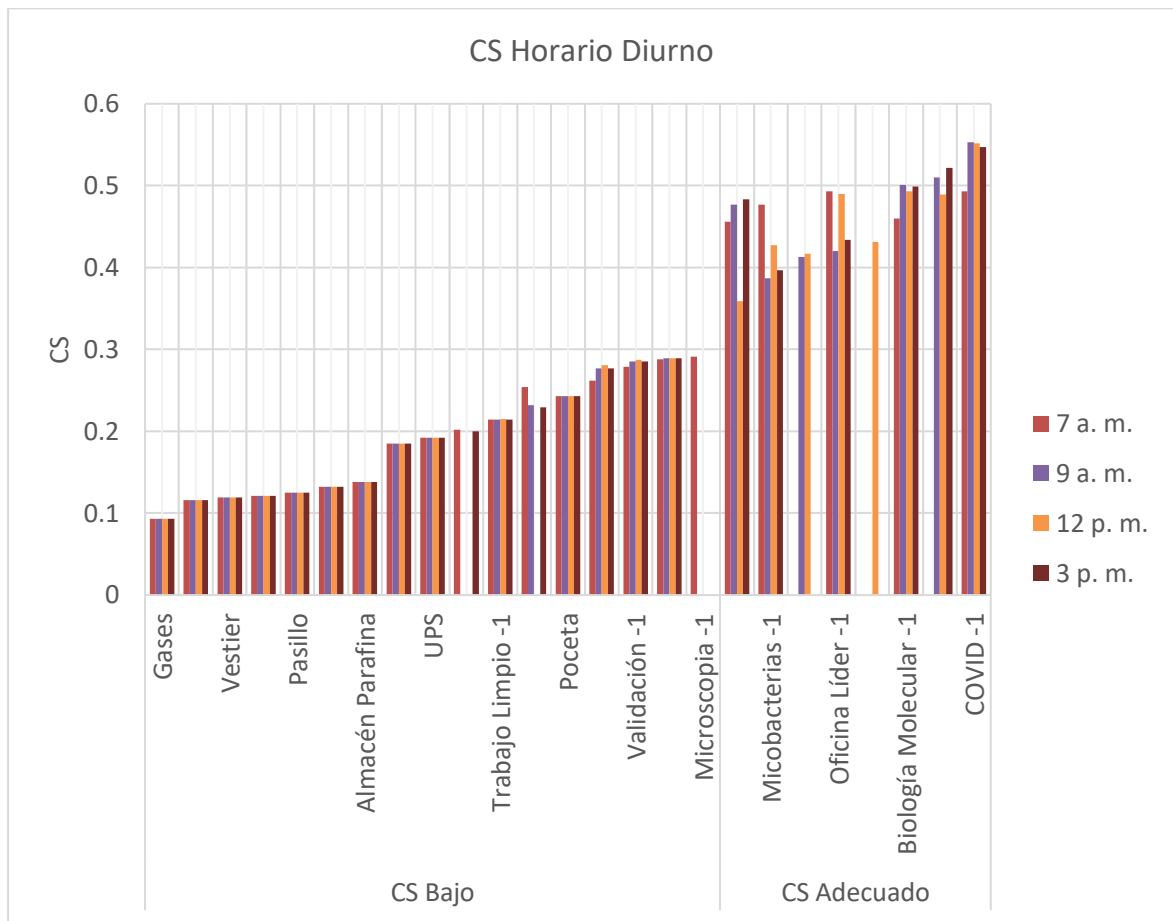
La Figura 4-12 muestra el cálculo del estímulo circadiano para el horario diurno establecido en la 2.3.1. Para el horario diurno comprendido entre las 7 am y las 4 pm, el CS bajo no promueve el estado de alerta en los usuarios. La mayoría de las zonas con CS bajo, aunque no requieren un E_v alto, deben garantizar una iluminación circadiana efectiva. No se contempla el aumento de E_v con el fin de evitar el deslumbramiento y garantizar las iluminancias de diseño asignadas en la Tabla 1-1. La implementación de iluminación dinámica, modifica del espectro de la fuente de luz para las áreas que así lo requieran.

En la Figura 4-12 se observa que algunas zonas estarían por debajo del CS recomendado en la sección 2.3.1. Para áreas de trabajo en horarios entre 7 am y 4 pm el valor de CS

debe ser igual o mayor a 0.3. Además, se requiere que el valor de CS debe ajustarse de acuerdo con el horario del día. La iluminación dinámica propuesta, automatiza el proceso de cambio de espectro de la fuente de luz para ajuste del CS .

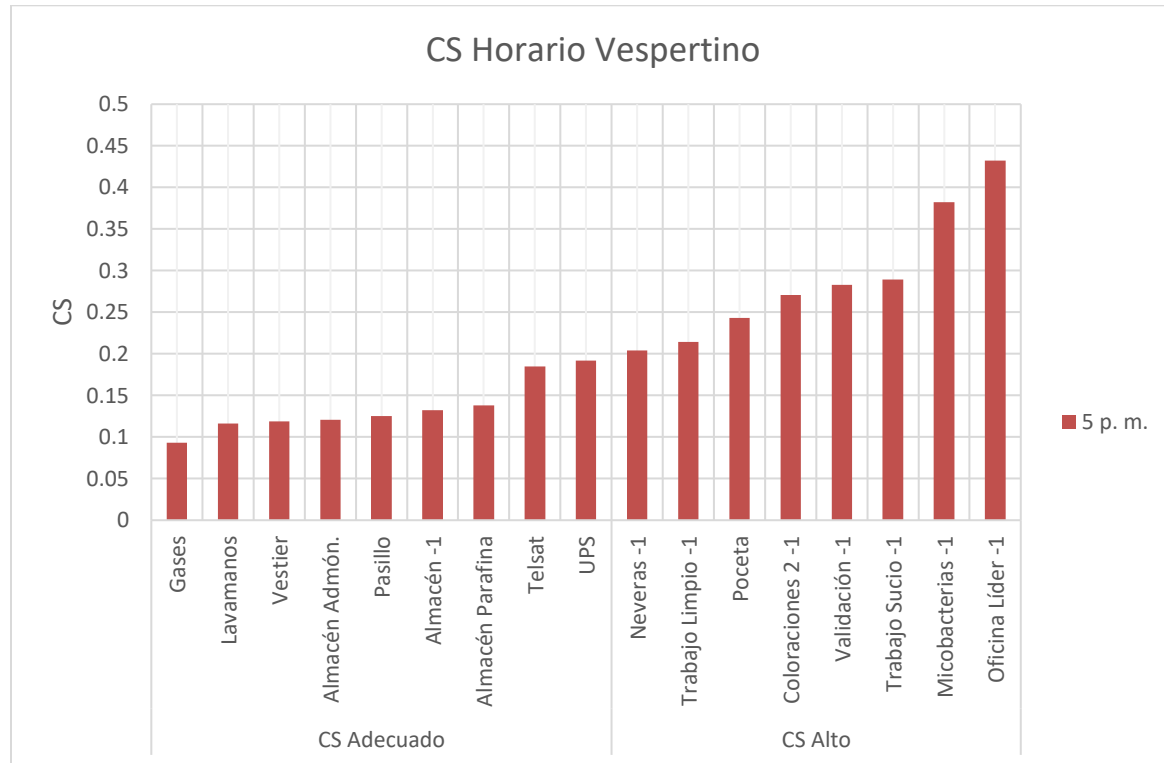
Para el horario vespertino comprendido entre las 5 pm y las 8 pm, se obtuvieron las CS representados en la Figura 4-13. Los $CS > 0.2$ producen un estímulo muy alto en el horario vespertino, por lo que requieren control. La mayoría de las zonas con estímulos altos, contienen la combinación de cierta cantidad de luminarias activas más el aporte de luz diurna (atardecer) que incide en ellas.

Figura 4-12 :Clasificación CS Horario Diurno. Muchas zonas tienen estímulo circadiano inadecuado(bajo) según UL. Las zonas con aporte de luz día tienen valores de CS adecuado, gracias al estímulo del SPD de luz día.



Fuente propia.

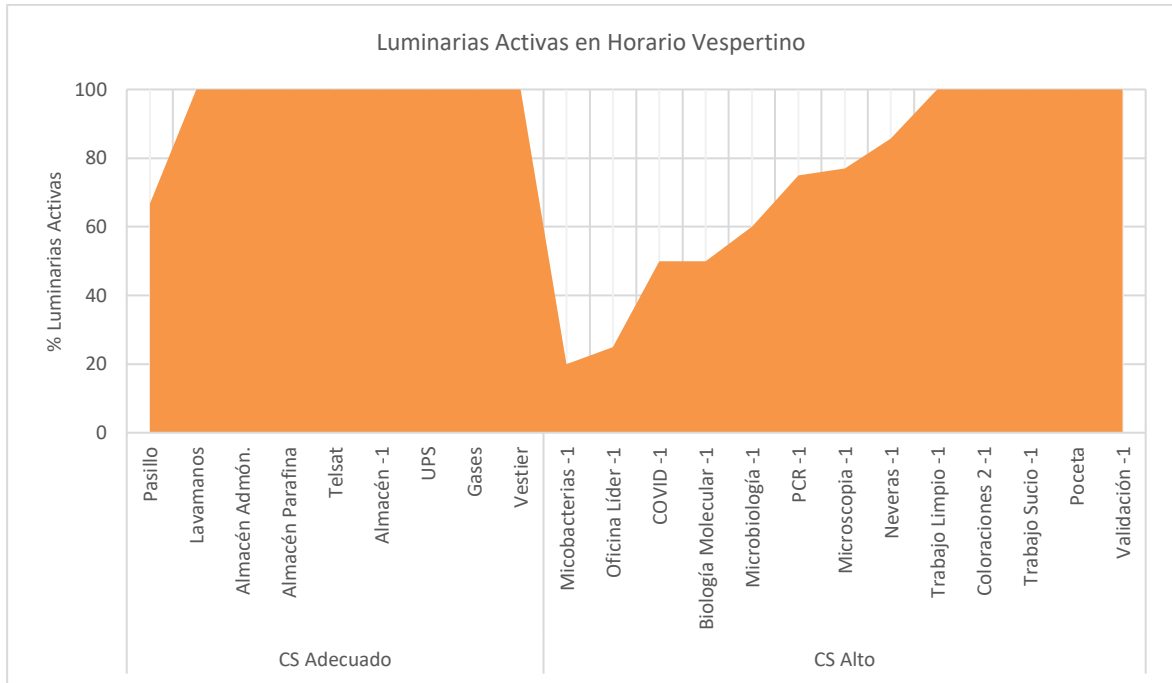
Figura 4-13 :clasificación CS Horario Vespertino. Estímulo circadiano alto en el horario vespertino provoca la producción de Melanopsina, generando el estado de alerta permanente en las personas.



Fuente propia.

La Figura 4-14 muestra que no solamente las áreas con incidencia de luz día tienen valores de CS alto, paralelamente las áreas con iluminación netamente artificial también los tuvieron. El cambio de espectro propuesto en la sección 4.4 promueve la reducción del CS para garantizar la iluminación circadianamente efectiva.

Figura 4-14 :Porcentaje de luminarias activas en horario vespertino por zona. La configuración de escenas de luz para apagado de iluminarias innecesarias en horario vespertino, no logró reducir el estímulo circadiano alto. Zonas con 100% de iluminación artificial, lograron sin embargo garantizar estímulos circadianos adecuados.



Fuente propia.

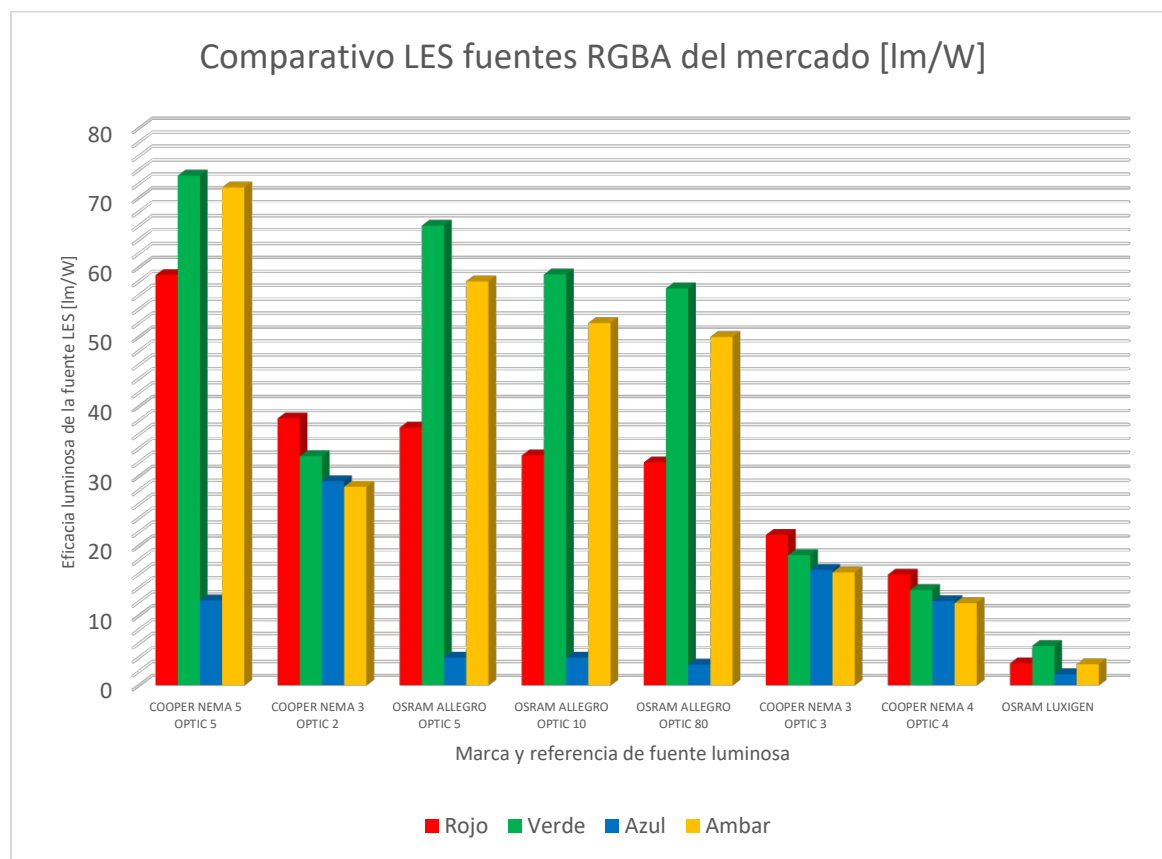
4.4 Cálculo de CS con iluminación dinámica

El diseño de iluminación obtuvo valores de CS aptos y no aptos para el espectro fijo propuesto en las secciones 4.2 y 4.3, teniendo en cuenta la guía UL24480 y cumpliendo con las iluminancias de RETILAP. Esta sección propone un control de iluminación circadiana efectiva con el uso de iluminación 4LED RGBA. Se generaron varios espectros de prueba con la herramienta CQS expuesta en (Davis, 2010) y se usó la herramienta de cálculo para el análisis de CS. El uso de iluminación 4LED garantiza la configuración del espectro para trabajar dentro de los valores de CS requeridos sin necesidad de cambio de luminarias, disposición u otras características del diseño de iluminación.

Una de las razones para elegir 4LED en cambio de 3LED se debe a que los CRIs obtenidos fueron superiores a 90 para los LED de 4 canales, mientras que los LED de 3 canales obtuvieron CRIs por debajo de 70.

Inicialmente se revisaron varias fichas técnicas de luminarias del mercado para el comparativo de LES que muestra la Figura 4-15. Cada una de las luminarias presenta LES similar para los LED verde y ámbar. El Led azul muestra el valor LES más bajo de cada una de las luminarias. Un promedio del valor de LES fue usado más adelante para el cálculo de potencia eléctrica de los espectros elegidos dentro de la iluminación dinámica de acuerdo con Tabla 4-2 y Tabla 4-5.

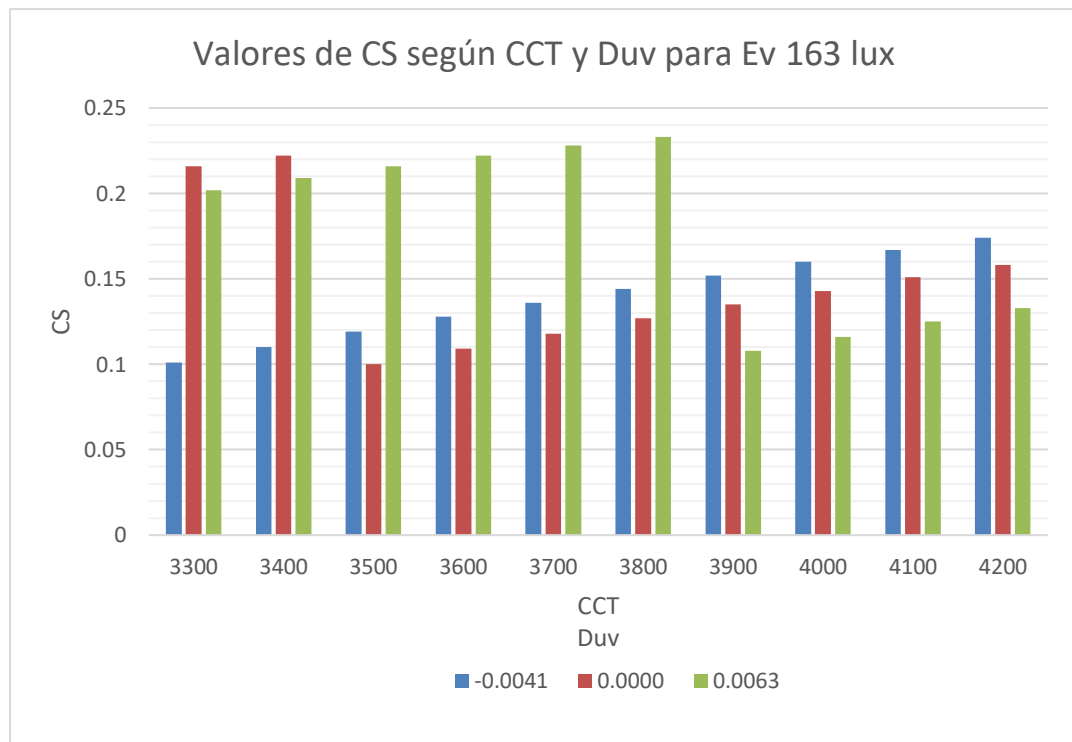
Figura 4-15 valores LES [lm/W] para diferentes luminarias RGBA del mercado. marcas comerciales como COOPER y OSRAM permiten la descarga de fichas técnicas de fuentes de iluminación. Los valores de LES difieren dado el tipo de luminaria, fabricación y potencia.



Fuente: Propia

La Tabla 1-2 recomienda el uso de fuentes de luz con CCTs entre 3300 K y 5000 K para implementación en áreas de trabajo. En la Figura 4-16, se observan algunos de los espectros generados para luminarias 4LED que proporcionaron bajos valores de CS. La fuente de luz elegida para garantizar CS adecuado en horario nocturno fue el 4LED con CCT de 3500 y Duv=0.

Figura 4-16: Valores de CS según CCT y Duv para E_v , 163 lux. Se mantuvo fija una iluminancia de 163 lux con la cual una fuente de luz 4LED de 3500 K y Duv 0 logra generar un CS de 0.1, el CS más bajo en comparación con otros SPD. Se aprecian dos variaciones de CS significativas según configuraciones de espectro de 3400 a 3500 K con Duv de 0 y 3800 a 3900 K con Duv 0.0063.



Fuente propia.

La Tabla 4-1 muestra los espectros 4LED generados a partir de CCT y Duv los cuales reducen el valor de CS. De acuerdo con esta tabla se escogió el espectro de 3500 K y Duv 0 para modificar el CS del 31% de las áreas que tenían CS mayor a 0.1. Dados los resultados se concluye que en el horario nocturno se debe reducir la iluminancia de las áreas con $E_{v,vertical} > 163 \text{ lux}$.

Tabla 4-1: Espectros recomendados para reducción de CS en horario nocturno. Valor CS dado para una iluminancia vertical fija de 163 lux.

| CCT | CERC | Duv | LER | CS |
|------|------|---------|-------|-------|
| 3500 | Frío | 0.0000 | 362.2 | 0.1 |
| 3300 | Frío | -0.0041 | 358.2 | 0.101 |
| 3900 | Frío | 0.0063 | 366.0 | 0.108 |
| 3600 | Frío | 0.0000 | 360.4 | 0.109 |
| 3400 | Frío | -0.0041 | 356.5 | 0.11 |
| 4000 | Frío | 0.0063 | 364.0 | 0.116 |

El ajuste del espectro para cambio en el CCT y Duv de las luminarias para reducir los valores de CS en el horario nocturno, es generado gracias a la configuración de corrientes de alimentación de cada uno de los canales. Según la configuración del espectro CCT 3500 y Duv 0, las corrientes asignadas se relacionan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2 valores de corriente y características de configuración de fuentes de iluminación RGBA para reducción de valores CS en horario nocturno

| | |
|-------------------------------|----------|
| CCT | 3,500.00 |
| Duv | 0.00 |
| Flujo luminoso requerido [lm] | 2,000.00 |

| | Rojo | Verde | Azul | Ámbar |
|----------------------------|--------|--------|-------|--------|
| Radio de contribución [lm] | 0.23 | 0.38 | 0.02 | 0.37 |
| Flujo luminoso [lm] | 461.97 | 754.49 | 44.23 | 739.32 |
| LES [lm/W] | 29.98 | 40.77 | 10.35 | 36.37 |
| Potencia eléctrica [W] | 15.41 | 18.51 | 4.27 | 20.33 |
| Corriente a 120 V [A] | 1.97 | 3.13 | 1.97 | 2.75 |

| | |
|--------|---------------------|
| 58.5 | Potencia Total [W] |
| 23.281 | Corriente Total [W] |

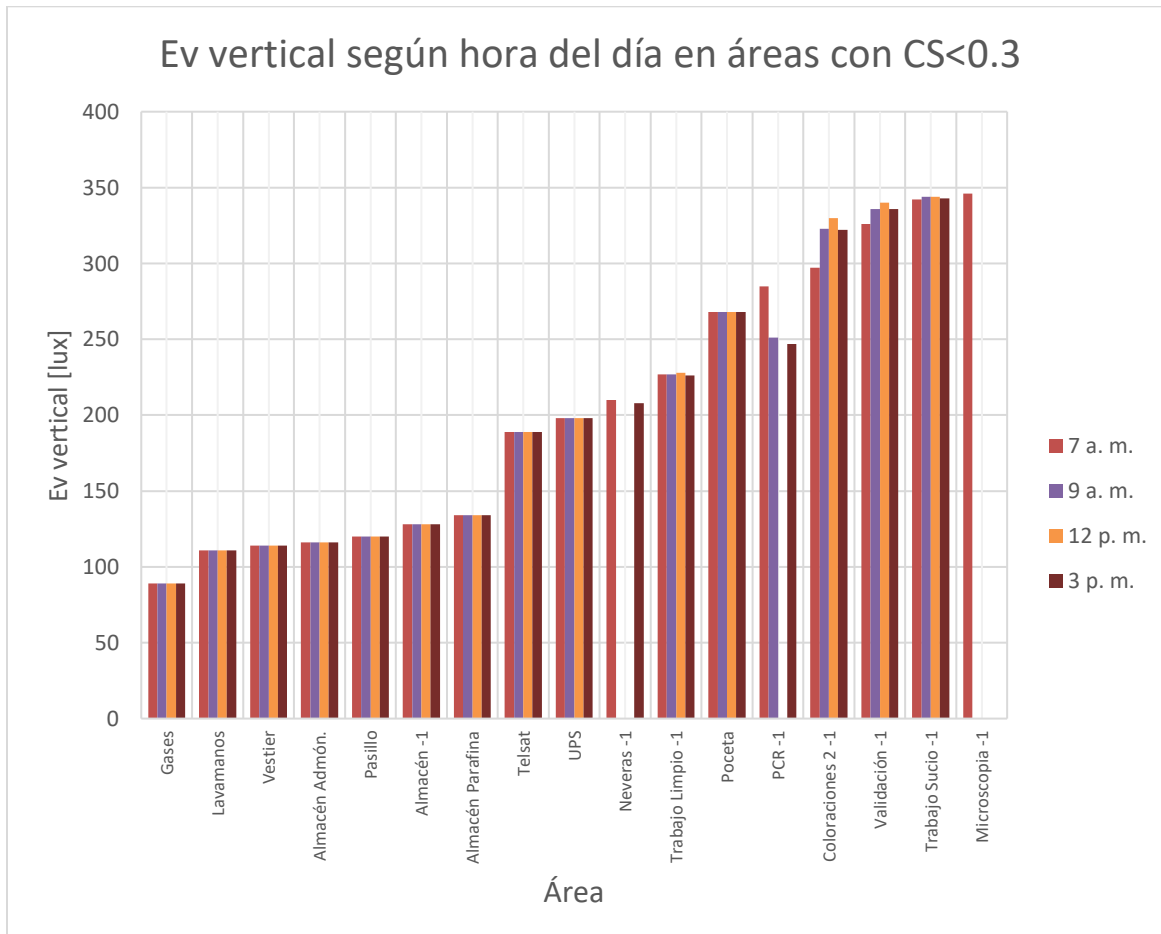
Tabla 4-3: Áreas con mayor Ev Vertical

| Área | Uniformidad | Iluminancia |
|-----------------------|-------------|-------------|
| Validación -2 | 0.65 | 397 |
| Trabajo Limpio -2 | 0.68 | 343 |
| Trabajo Sucio -1 | 0.59 | 333 |
| Microscopía -1 | 0.57 | 310 |
| Validación -1 | 0.65 | 305 |
| Biología Molecular -1 | 0.67 | 294 |
| Trabajo Sucio -2 | 0.59 | 286 |
| Microscopía -2 | 0.57 | 276 |
| Biología Molecular -2 | 0.67 | 270 |
| Poceta | 0.72 | 269 |
| Microbiología -3 | 0.61 | 267 |
| Microscopía -3 | 0.57 | 263 |
| Oficina Líder -1 | 0.57 | 262 |
| Coloraciones 2 -1 | 0.65 | 244 |
| Rack abierto | 0.75 | 232 |
| Trabajo Limpio -1 | 0.53 | 219 |
| COVID -1 | 0.53 | 211 |
| PCR -2 | 0.57 | 209 |
| Neveras -1 | 0.52 | 202 |
| UPS | 0.74 | 198 |
| Telsat | 0.61 | 189 |
| Microbiología -2 | 0.61 | 187 |
| Micobacterias -2 | 0.6 | 176 |
| Preanalítica | 0.58 | 173 |
| Microbiología -1 | 0.61 | 170 |

Para aumento del estímulo circadiano de las áreas con $CS < 0.3$ en el horario diurno de acuerdo con la Figura 4-12, se propone la iluminación dinámica para cambio del espectro en zonas con CS bajo. Las zonas que cuentan con aporte único de iluminación artificial obtuvieron iluminancias bajas y se muestran en la Figura 4-17. Cabe señalar que las zonas

con $CS < 0.3$ obtuvieron CLD cero o muy bajos. Al trabajar con el espectro de luz día representado por el iluminante D65, ver sección 1.8 Iluminantes, se obtiene $CS \geq 0.3$ aun teniendo baja E_v vertical.

Figura 4-17 E_v vertical según hora del día en áreas con $CS < 0.3$ en horario diurno.



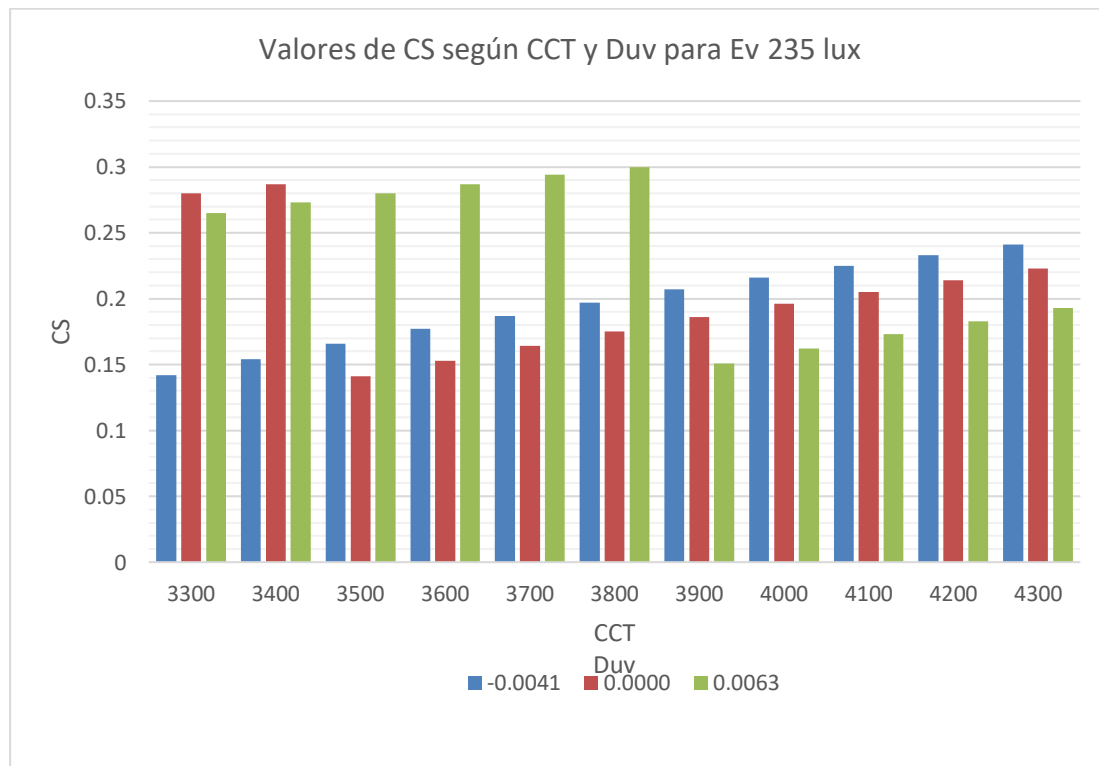
Fuente propia.

Los espectros recomendados para aumento de CS en horario diurno se muestran en la Tabla 4-4. El mejor resultado se obtuvo para el espectro con CCT de 3800K y $Duv=0.0063$ de acuerdo con la Figura 4-18. El valor elegido de Duv , hizo que el espectro tomara tonalidades de color verde ubicándolo dentro del comportamiento de un SPD con *CERC* cálido.

Tabla 4-4 : Espectros recomendados para Aumento de CS en horario diurno. Valor CS dado para una iluminancia vertical fija de 235 lux.

| CCT | CERC | Duv | LER | CS |
|------|--------|--------|-------|-------|
| 3800 | Cálido | 0.0063 | 368.0 | 0.3 |
| 3700 | Cálido | 0.0063 | 370.0 | 0.294 |
| 3400 | Cálido | 0.0000 | 364.0 | 0.287 |
| 3600 | Cálido | 0.0063 | 372.0 | 0.287 |
| 3300 | Cálido | 0.0000 | 365.8 | 0.28 |
| 3500 | Cálido | 0.0063 | 374.0 | 0.28 |
| 3400 | Cálido | 0.0063 | 375.9 | 0.273 |
| 3300 | Cálido | 0.0063 | 377.8 | 0.265 |

Figura 4-18: Valores de CS según CCT y Duv para Ev vertical 235 lux. Una iluminancia mínima de 235 lux garantiza estímulo circadiano adecuado para iluminación diurna con un espectro 4LED de 3800 K y Duv 0.0063.



Fuente propia.

La configuración de corrientes de alimentación de cada uno de los canales RGBA de la luminaria se relacionan en la Tabla 4-5 para el espectro de CCT 3800 y Duv 0.0063.

Tabla 4-5 valores de corriente y características de configuración de fuentes de iluminación RGBA para aumento de valores CS en horario diurno.

| | |
|-------------------------------|--------|
| CCT | 3,800 |
| Duv | 0.0063 |
| Flujo luminoso requerido [lm] | 2,000 |

| Características | Rojo | Verde | Azul | Ambar |
|-----------------------------|--------|--------|-------|--------|
| Radios de contribución [lm] | 0.22 | 0.40 | 0.03 | 0.35 |
| Flujo luminoso [lm] | 442.50 | 798.51 | 50.82 | 708.17 |
| LES [lm/W] | 29.98 | 40.77 | 10.35 | 36.37 |
| Potencia eléctrica [W] | 14.76 | 19.59 | 4.91 | 19.47 |
| Corriente a 120 V [A] | 1.97 | 3.13 | 1.97 | 2.75 |

| | |
|--------|---------------------|
| 58.7 | Potencia Total [W] |
| 23.309 | Corriente Total [A] |

En el caso del horario vespertino, haciendo uso de la Tabla 4-1, se eligió nuevamente el espectro que mejor reduce el valor de CS, el espectro elegido para CS en horario nocturno CCT de 3500K y Duv=0. Dicho espectro garantiza CS menores o iguales a 0.2 para iluminancias verticales hasta de 349 lux. Dados los resultados se concluye que en el horario vespertino se debe reducir la iluminancia de las áreas con $E_v \text{ vertical} > 349 \text{ lux}$ que según la Tabla 4-3 es la zona de validación.

5. Resultados y discusión

5.1 Ajuste de SPD en SDI

Dada la importancia del SPD de la fuente de iluminación para la deducción del estímulo circadiano CS producido, y en vista de que el SDI no tiene en cuenta en sus cálculos de iluminancia esta característica tan importante, en la Tabla 5-1 se muestran algunos factores de corrección del flujo según el espectro $k_{\phi SPD}$ con ayuda de la ecuación 4-3. Con la herramienta desarrollada se calculó el flujo luminoso a partir del espectro seleccionado.

Tabla 5-1: Factor de corrección de flujo luminoso $k_{\phi SPD}$ para diferentes espectros con 4LED.

| CCT [K] | Duv | $k_{\phi SPD}$ |
|---------|---------|----------------|
| 3300 | -0.0041 | 1.18 |
| 3500 | 0.0000 | 1.09 |
| 3700 | 0.0063 | 1.00 |
| 3800 | 0.0000 | 1.03 |
| 3900 | 0.0063 | 0.97 |
| 4000 | 0.0000 | 1.00 |

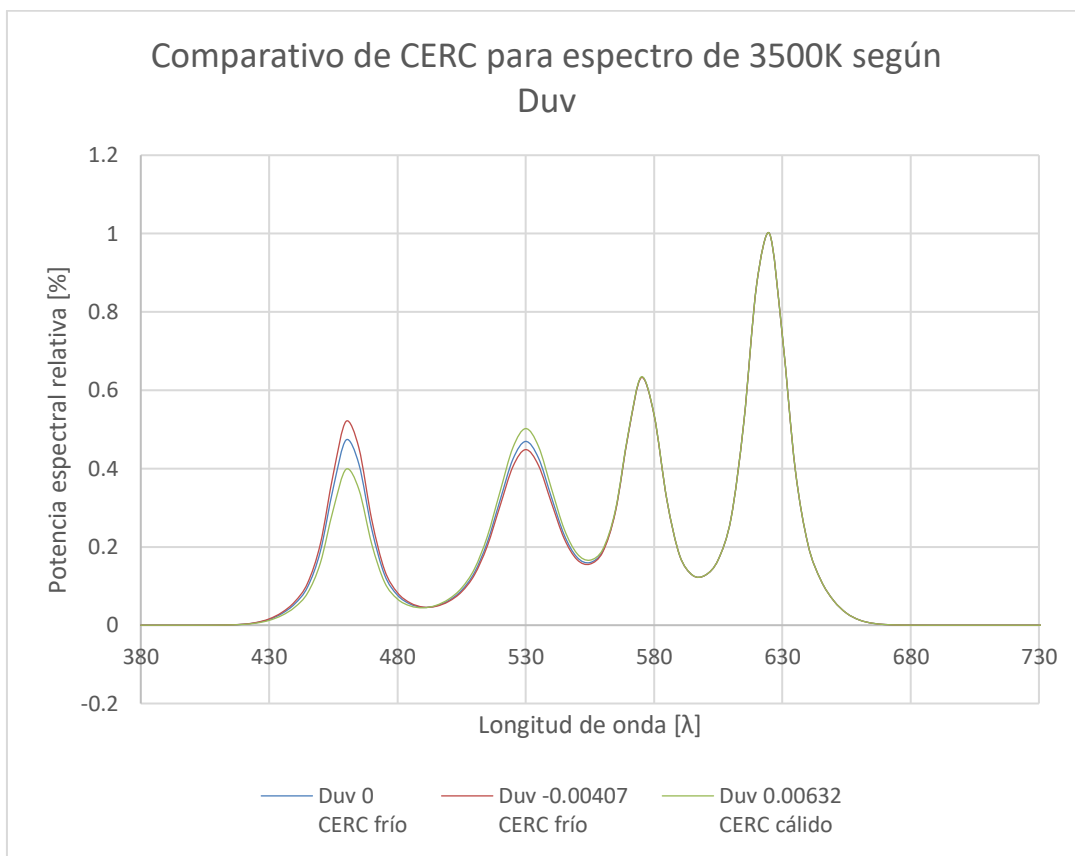
Gracias al factor de corrección de flujo, podremos garantizar los cálculos de iluminancia adecuados teniendo en cuenta el espectro de la fuente de luz. Los SDI implementarán el espectro como factor de importancia en el diseño de iluminación circadiana efectiva garantizando cálculos adecuados y acordes a la necesidad.

5.2 CERC dados CCT y Duv de la fuente de iluminación

Con las pruebas de variación de características de espectros para fuentes de iluminación 4LED, se encontró que el valor Duv influye fuertemente en la caracterización de la contribución espectral relativa de la respuesta circadiana *CERC*. Un *CCT* puede tener las dos clasificaciones *CERC* frío o cálido, según sea su valor Duv como se ilustra en la Figura

5-1 . La caracterización de *CERC* frío o cálido depende del resultado de la operación del mecanismo espectralmente opONENTE de la ecuación 1-20.

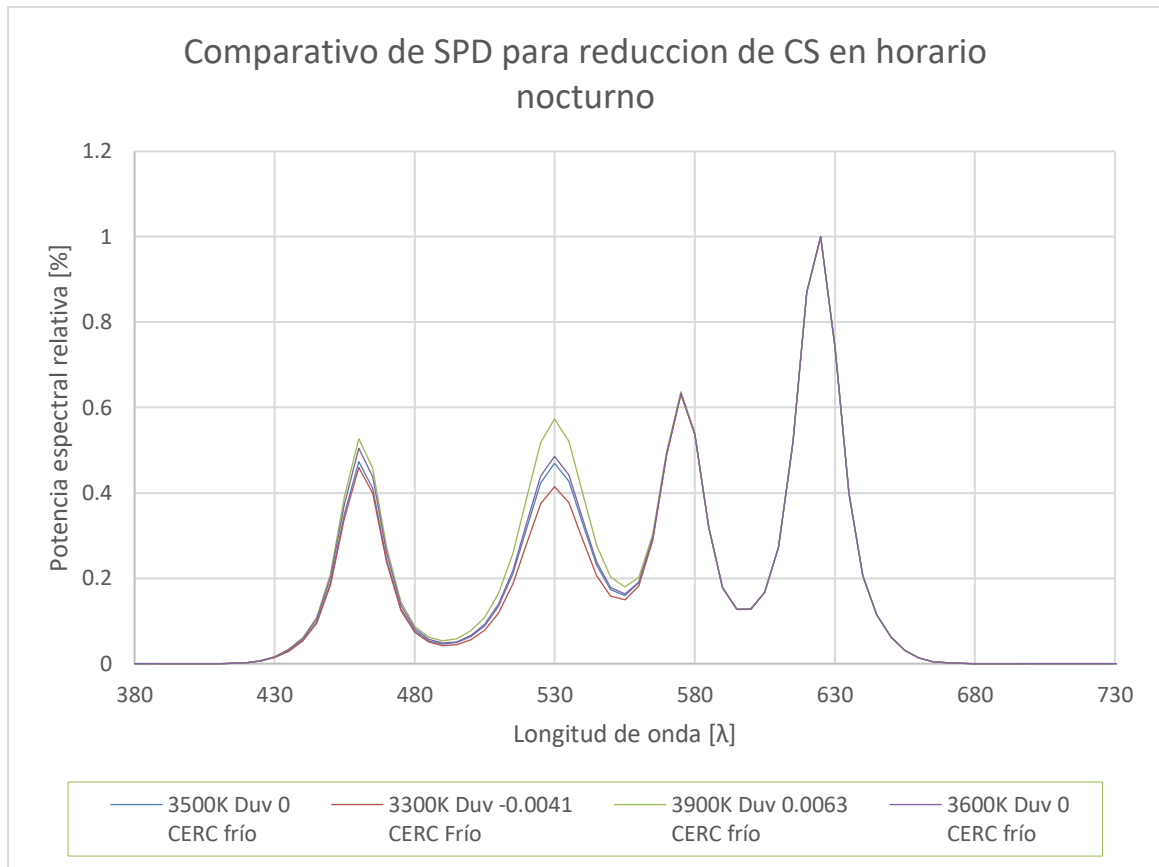
Figura 5-1: Análisis de cambio de *CERC* frío y cálido con pequeñas variaciones de *Duv*. Comparativo de clasificación de *CERC* para un 4LED RGB de 3500 K con valores de *Duv* de 0, 0.00632 y -0.00407. Los cambios de *CERC* se debieron al cambio del contenido de longitudes de onda media y corta.



Fuente propia.

La Figura 5-2 hace el comparativo de los espectros de 4LED que reducen el CS . Los espectros analizados tienen clasificación *CERC* fría a pesar de tener buen contenido de longitudes de onda larga. El estímulo circadiano disminuyó con estos espectros pues el CS dependerá de la respuesta de todos los fotorreceptores de acuerdo con la ecuación 1-16. La clasificación de *CERC* frío con bajos contenidos de longitudes de onda corta y mayor contenido de onda larga, provoca en el modelo de la ecuación 1-16, que cada una de las respuestas de los fotorreceptores tengan un valor bajo, de ahí la reducción del CS.

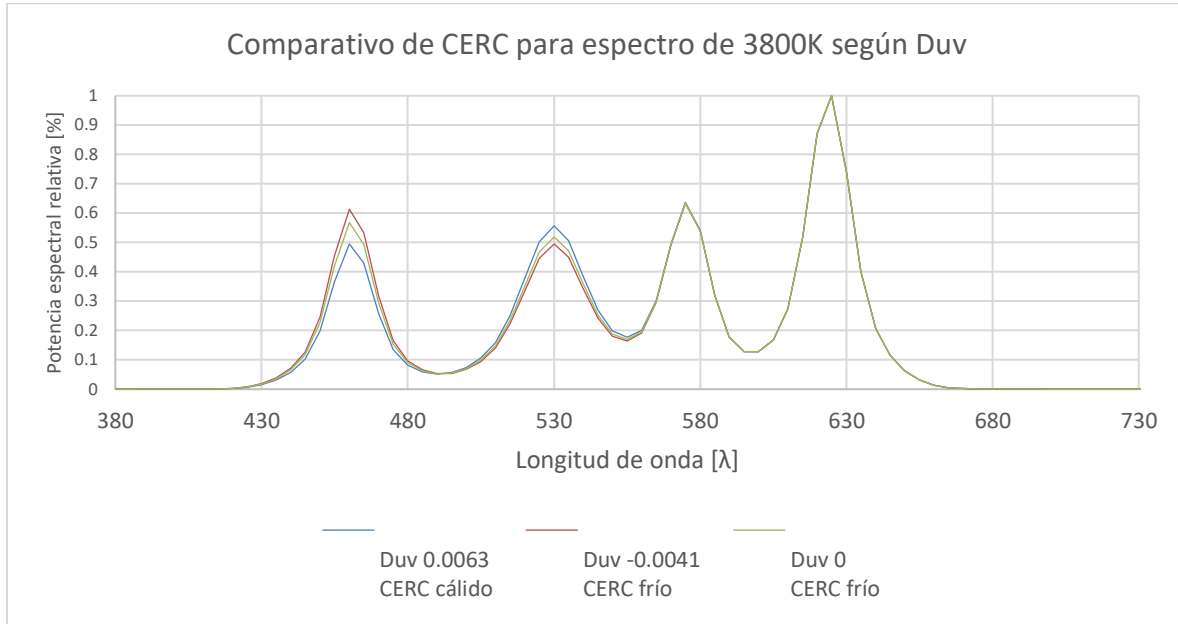
Figura 5-2 : Comparativo de espectros con mayor reducción de CS en el horario nocturno según Tabla 4-1. Espectros de CERC frío lograron aportar valores de estímulo circadiano menores a 0.1 con mayor facilidad que espectros de CERC cálido. Las diferencias de SPD se vieron más pronunciadas en el aporte de longitudes de onda media.



Fuente propia

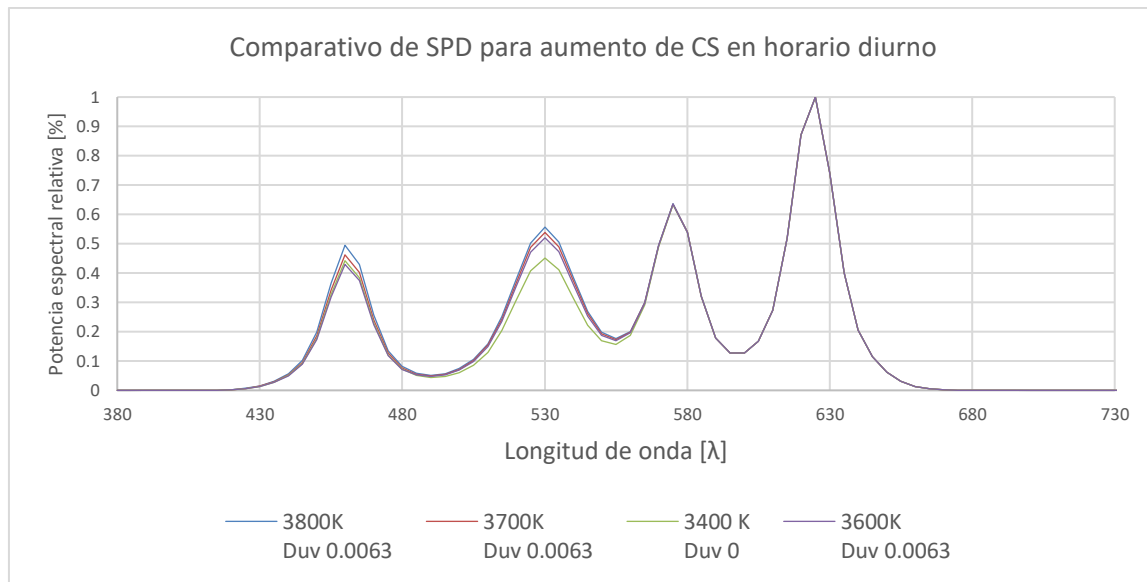
Por otra parte el espectro con CCT 3800 K, obtuvo las dos clasificaciones CERC frío y cálido con una pequeña variación de su contenido espectral de ondas largas, medias y cortas como se aprecia en la Figura 5-3.

Figura 5-3 Comparativo de CERC para espectro de 3800K según Duv. Variaciones pequeñas del Duv permitieron el cambio de CERC frío y cálido. El espectro que garantizó la obtención de CS adecuados para el horario diurno fue un SPD de CERC cálido.



Fuente propia.

Figura 5-4 : Comparativo de espectros con mayor aumento de CS para el horario diurno según Tabla 4-4

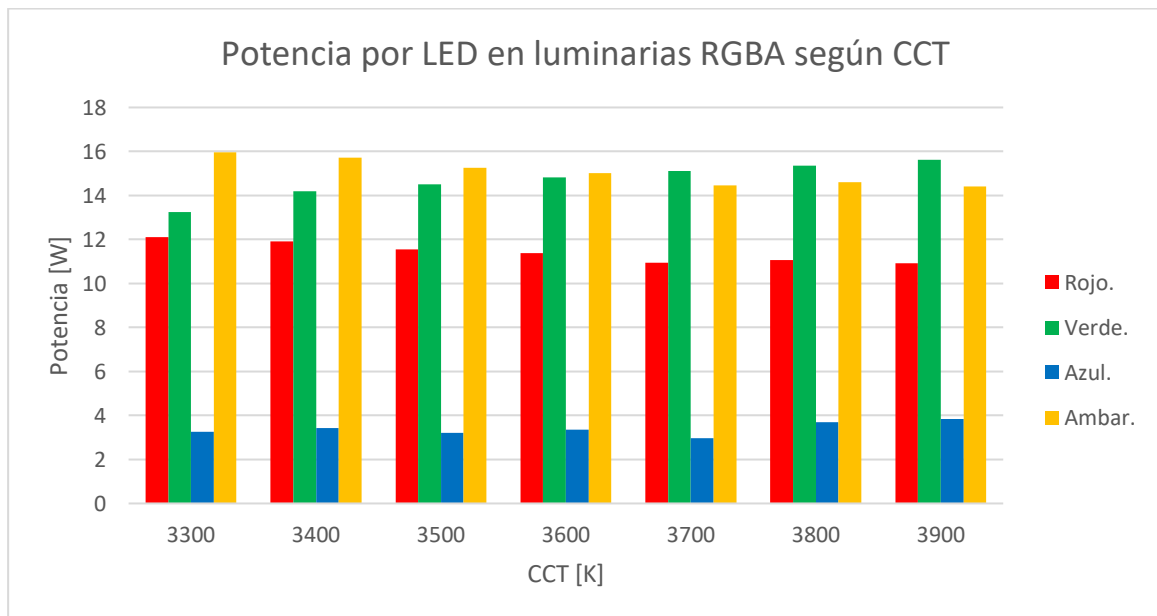


Fuente propia

En la Figura 5-4 se muestra el comparativo de los espectros que aumentan el CS para el horario diurno. Es de resaltar que todos los espectros que generaron aumento de CS tienen CERC cálido. Comparando con la Figura 5-2, en esta ocasión según el modelo de la ecuación 1-17, el valor de CS depende únicamente de la respuesta de las ipRCGS, cuyo valor es grande debido a que el espectro de la fuente tiene buen contenido de longitudes de onda corta y media.

En la Figura 5-5 se muestra un comparativo de la potencia en Watios según los espectros 4LED generados a partir de CCT y Duv; teóricamente el cambio de espectro no afecta el consumo de energía total de la fuente de iluminación ya que mantuvo un promedio de consumo de 42.23 W para las fuentes analizadas según lo recomendado por la Tabla 4-1 y Tabla 4-4. El aumento en el CCT mostró además un incremento en la potencia de los LEDs verde y azul; además de una reducción de la potencia consumida por los LEDs cálidos, rojo y ámbar.

Figura 5-5 Potencia por LED en luminarias RGBA según CCT. Aumento en el CCT produce disminución en el consumo de potencia de los colores cálidos, rojo y amarillo. Los mayores consumos de potencia se tienen para los LED amarillo y verde, seguidos por rojo y por último el azul. La potencia consumida dependerá de varios factores como LES, aporte de cada LED al espectro 4 LED, etc.

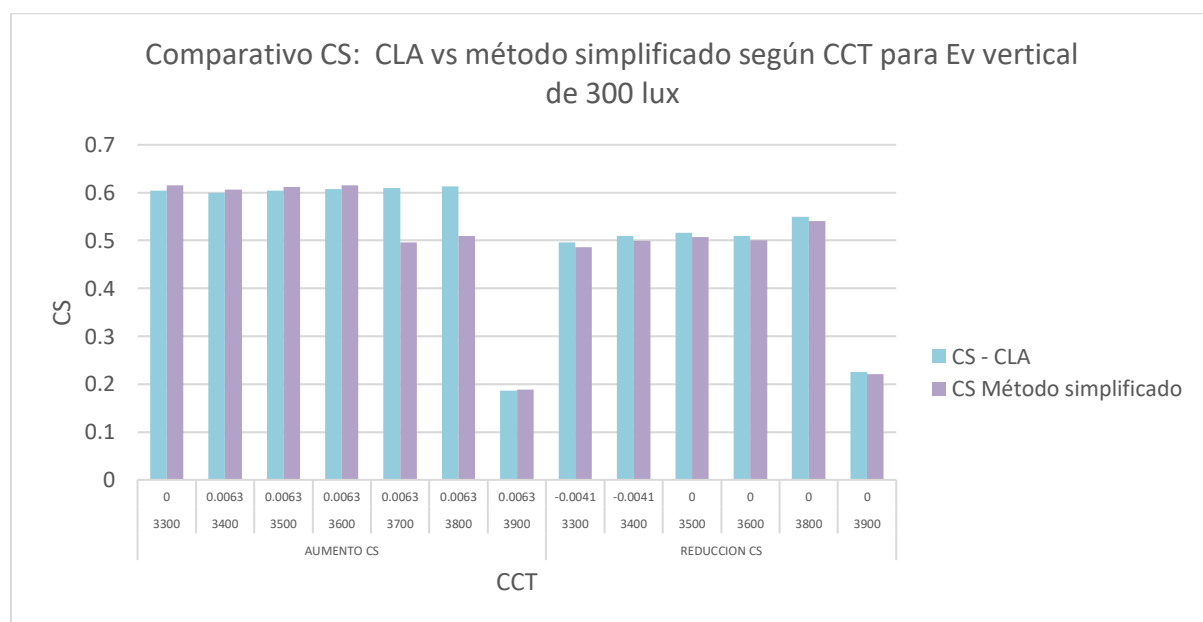


Fuente propia

5.3 Comparativo de métodos

La Figura 5-6 muestra la diferencia de valores de estímulo circadiano calculados por el método de CLA y por el método simplificado para cierta configuración de espectro. Existe un error porcentual grande en el comparativo de métodos de cálculo CS para la configuración de espectro entre 3680 K y 3810 K aproximadamente. Esta diferencia se debe a los valores referencia que tiene el método simplificado que condicionan el uso de las ecuaciones 1-33 y 1-34.

Figura 5-6 Comparativo CS: CLA vs método simplificado según CCT

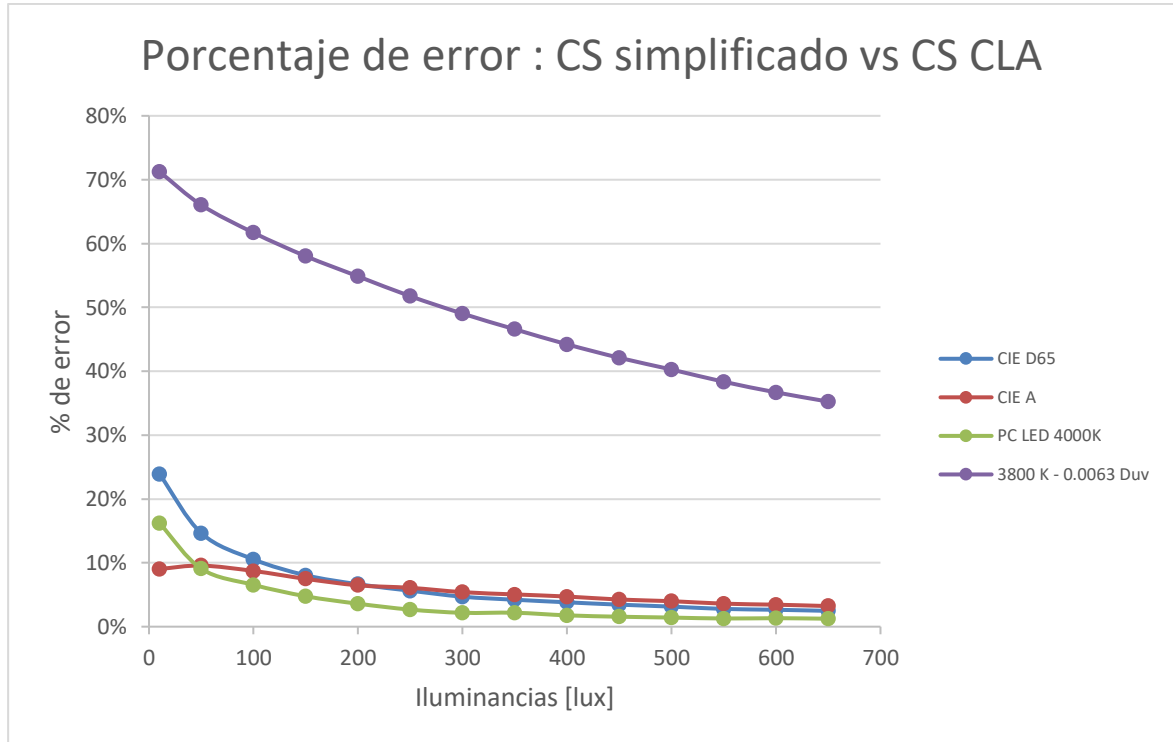


Fuente propia.

Por otra parte, para el balance de los valores de CS obtenidos por los modelos CL_A y $CS Simplificado$ en espectros fijos, vemos que el método simplificado, aunque es una alternativa más liviana de cálculo según se mostró en la sección 1.12, puede tener errores porcentuales grandes según el SPD de la fuente de luz. La Figura 5-7 nos muestra que el error porcentual en la comparación con el método de CS por CLA, cambió según el SPD

utilizado. El espectro de un LED de 4 canales de 3800 K y Duv 0.0063, tuvo el mayor error porcentual, que al igual que otros SPD, disminuyó a medida que se incrementó el valor de E_v vertical.

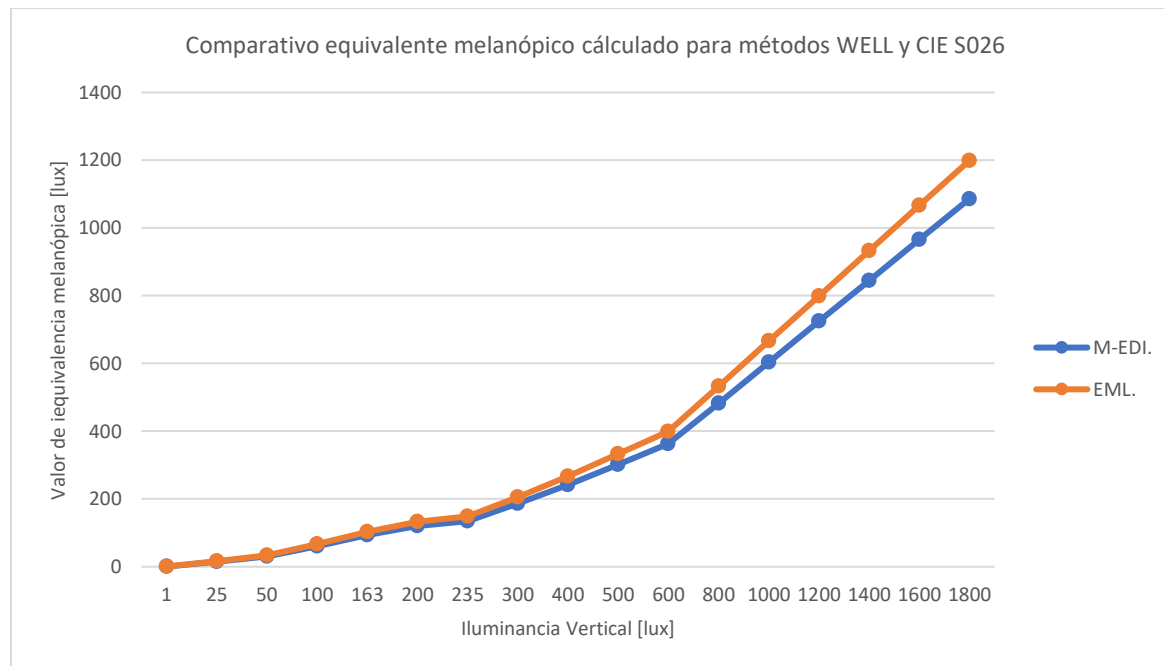
Figura 5-7 Comparativo de cálculos de CS por CLA y por método simplificado



Fuente Propia

Descartando el error porcentual obtenido para un rango específico de CCT usando fuentes de luz RGBA, el error porcentual máximo se obtuvo para el iluminante D65. Con el aumento de la iluminancia se aprecia que el porcentaje de error descendió para los dos *SPD* analizados. Dada la incertidumbre de los valores de error porcentual del método simplificado en comparación con el método CLA, se infiere que el *CS simplificado* debe ser reevaluado numéricamente y que no debe usarse aún para cálculos de iluminación circadiana efectiva.

Figura 5-8 Comparativo equivalente melanópico calculado para métodos WELL y CIE S026 (valores máximos para CCTs de 3300 a 3900 K)



Fuente propia

La Figura 5-8 muestra el aumento del error entre los valores de EDI melanópico y el equivalente melanópico en luxes debido al aumento de iluminancia para un espectro dado con valores CCT y Duv fijos. Se puede observar que el valor calculado de EML siempre será más grande que el valor de M-EDI; es por esto que los valores adaptados y sugeridos por la WELL contemplan estas diferencias. Sin embargo, los valores de iluminancia melanópica para ambos métodos serán muy similares.

La Tabla 5-2 muestra el comparativo del estímulo circadiano calculado a partir de los métodos vistos en las secciones 1.10, 1.11 y 1.12. De acuerdo con la sección 2.3 se clasificaron los resultados como estímulo apto y estímulo no apto para el horario diurno en la Tabla 5-2. Los resultados obtenidos indican una diferencia marcada en la clasificación del estímulo circadiano. La norma WELL y CIE, no precisan el estímulo circadiano adecuado para el horario nocturno en áreas de trabajo por lo que solo se enfoca en la generación del estado de alerta. Para obtener valores más precisos se recomienda el trabajo con la norma UL24480 que requiere de la iluminación dinámica para garantizar una adecuada iluminación circadiana.

Tabla 5-2 : Comparativo de valores de estímulo circadiano para diferentes espectros 4LED RGB

| E_v vertical | CCT | Duv | CS - CLA | CS simplificado | EML |
|----------------|------|---------|----------|-----------------|-------|
| 608.1 | 3500 | 0.0000 | 0.30 | 0.30 | 369.8 |
| 602.8 | 3300 | -0.0041 | 0.30 | 0.30 | 356.5 |
| 421.0 | 4000 | 0.0000 | 0.30 | 0.29 | 295.7 |
| 353.4 | 3500 | 0.0000 | 0.20 | 0.20 | 214.9 |
| 161.1 | 3300 | -0.0041 | 0.20 | 0.20 | 206.8 |
| 242.1 | 4000 | 0.0000 | 0.20 | 0.19 | 170.0 |
| 235.6 | 3800 | 0.0063 | 0.30 | 0.14 | 148.9 |
| 163.2 | 3500 | 0.0000 | 0.10 | 0.10 | 99.2 |
| 349.6 | 3300 | -0.0041 | 0.10 | 0.10 | 95.3 |
| 133.2 | 3800 | 0.0063 | 0.20 | 0.08 | 84.2 |
| 110.8 | 4000 | 0.0000 | 0.10 | 0.09 | 77.8 |
| 60.2 | 3800 | 0.0063 | 0.10 | 0.03 | 38.1 |

Tabla 5-3: Clasificación de estímulo circadiano según E_v y espectro dado por la configuración de CCT y Duv.

| E_v vertical | CCT | Duv | Horario | Estímulo Apto | Estímulo No apto |
|----------------|------|---------|------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 161.1 | 3300 | -0.0041 | Vespertino | EML | CS - CLA CS simplificado |
| 349.6 | 3300 | -0.0041 | Nocturno | | CS - CLA CS simplificado EML |
| 602.8 | 3300 | -0.0041 | Diurno | CS - CLA CS simplificado EML | |

| E_v vertical | CCT | Duv | Horario | Estímulo Apto | Estímulo No apto |
|-------------------|------|--------|------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| 163.2 | 3500 | 0.0000 | Nocturno | | CS - CLA CS simplificado EML |
| 353.4 | 3500 | 0.0000 | Vespertino | EML | CS - CLA CS simplificado |
| 608.1 | 3500 | 0.0000 | Diurno | CS - CLA CS simplificado EML | |
| 60.2 | 3800 | 0.0063 | Nocturno | | CS - CLA CS simplificado EML |
| 133.2 | 3800 | 0.0063 | Vespertino | | CS - CLA CS simplificado EML |
| 235.6 | 3800 | 0.0063 | Diurno | CS - CLA | CS simplificado EML |
| 110.8 | 4000 | 0.0000 | Nocturno | | CS - CLA CS simplificado EML |
| 242.1 | 4000 | 0.0000 | Vespertino | EML | CS - CLA CS simplificado |
| 421.0 | 4000 | 0.0000 | Diurno | CS - CLA EML | CS simplificado |

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

No basta solamente con garantizar buenas condiciones de iluminación fotópica, es necesario definir los diseños de iluminación a partir de criterios de efectividad circadiana. Promover la efectividad circadiana a partir de la luz, depende de las características del espectro e intensidad de la misma. Diseñar sobre la distribución de potencia espectral de la fuente de luz nos permitirá alcanzar la estimulación circadiana efectiva. Adicionalmente el Diseño basado en distribución de potencia espectral de la fuente de luz y su ajuste dinámico, disminuye el consumo de energía y la eficiencia del sistema gracias al trabajo con iluminación 4LED y sus beneficios.

No es necesario trabajar con espectros de *CERC* cálida para reducir el CS, se puede hacer también con espectros de *CERC* frío. Los ensayos realizados mostraron que no solo los espectros de *CERC* cálido disminuyen el CS, la necesidad recae en el balance de las longitudes de onda, esto es, incluir longitudes de onda larga y corta según la necesidad. Así, para trabajar con espectros de *CERC* frío, se puede aumentar la contribución del espectro entre las longitudes de onda de 550 y 600 nm. Para poder disminuir el CS en horarios nocturnos se requiere trabajar SPD dirigidos hacia colores rojos trabajando con espectros de *CERC* cálido, así se tiene menor aporte en el filtro Melanópico evitando activar el fotorreceptor de Melanopsina durante la noche. De forma contraria, se puede trabajar en un espectro con *CERC* frío disminuyendo el contenido de azules para hacer que el CS disminuya.

Se concluyó que los programas de diseño de iluminación computacional, no tienen en cuenta el SPD de la fuente de luz para los cálculos de iluminancia. El Diseño con cambios en el SPD de la fuente de luz, se ejecutó con la ayuda de la herramienta de cálculo de CS

desarrollada en esta tesis, mediante la cual se verificó si el espectro usado contribuyó o no al estímulo circadiano. De aquí la importancia del desarrollo de la herramienta de cálculo pues contempló el espectro como una característica adicional en el diseño de iluminación.

El flujo luminoso con el cual los SDI realizan las mediciones, es el configurado en la fotometría de la fuente de luz seleccionada. El cálculo de la iluminancia depende del flujo luminoso y de la intensidad luminosa de la distribución de luz, para lo cual la fotometría debe ser correctamente analizada. Se sugiere considerar aspectos de prioridad para el diseño de iluminación tales como: cielo local dado por la correcta ubicación geográfica del área, arquitectura circundante externa e interna, acristalamiento, materiales de las superficies internas y ubicación del ocupante.

Se evidenció que la iluminación natural ayuda a reducir el consumo de energía en los edificios y provee la obtención de mejor confort para los ocupantes. Se debe configurar de forma adecuada el factor de mantenimiento de las fuentes de luz, ya que este reduce los valores de iluminancia de diseño. Las condiciones de luz artificial para el caso en estudio fueron insuficientes desde el diseño fotópico para provocar adecuada estimulación circadiana en los ocupantes. La condición de luz insuficiente requiere control automatizado ya que las zonas con CS inadecuado conllevarían a enfermedades o manifestaciones adversas de salud y bienestar en los ocupantes.

6.2 Recomendaciones y trabajos futuros

Se recomienda la mejora y análisis numérico del cálculo de *CS simplificado*. Este método muestra una buena predicción del valor de CS con ciertos iluminantes, sin embargo se observó que la categorización del CERC de las fuentes de iluminación, afectó los resultados del método simplificado con ciertas configuraciones del espectro en CCT y Duv. Con el aumento de la iluminancia se aprecia que el porcentaje de error descendió para todos los *SPD* analizados.

Se aconseja el diseño de áreas de trabajo con suficiente aporte de luz diurna. En las escenas en las que solo influye la luz día, se calcula el estímulo circadiano con el iluminante D65 de la CIE, espectro que puede aumentar los valores de iluminancia.

Para futuros diseños de iluminación, se recomienda tener en cuenta el aporte de la iluminancia de las pantallas de los computadores y la distribución de muebles y el espectro de la reflectancia de los materiales. Se pudo observar que estos factores, dada la ubicación de áreas de trabajo, afectaron notablemente los niveles de iluminancia y demás características del diseño. La implementación de fuentes de luz que garanticen condiciones de luz circadiana efectiva en cualquier situación reducirá el trabajo de cálculo.

La herramienta de cálculo propuesta en esta tesis sugiere la mejora de la presentación gráfica de resultados y la inclusión del control de iluminación en cualquier instalación.

Bibliografía

American national standard practice on lighting for educational facilities, 19 (2013).

Babilon, S., Beck, S., & Khanh, T. Q. (2021). A field test of a simplified method of estimating circadian stimulus. *Lighting Research and Technology*, 1–15. <https://doi.org/10.1177/14771535211044664>

Belenky, M. A., Smeraski, C. A., Provencio, I., Sollars, P. J., & Pickard, G. E. (2003). Melanopsin retinal ganglion cells receive bipolar and amacrine cell synapses. *Journal of Comparative Neurology*, 460(3). <https://doi.org/10.1002/cne.10652>

Berson, D. M., Dunn, F. A., & Takao, M. (2002). Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 295(5557), 1070–1073. <https://doi.org/10.1126/science.1067262>

Brown, T. M., Brainard, G. C., Cajochen, C., Czeisler, C. A., Hanifin, J. P., Lockley, S. W., Lucas, R. J., Münch, M., OHagan, J. B., Peirson, S. N., Price, L. L. A., Roenneberg, T., Schlangen, L. J. M., Skene, D. J., Spitschan, M., Vetter, C., Zee, P. C., & Wright, K. P. (2022). Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. *PLoS Biology*, 20(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571>

Bullough, J. D., Van Derlofske, J., & Yan, H. (2001). Evaluation of automotive stop lamps using incandescent and sweeping neon and LED light sources. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2001-01-0301>

Cajochen, C., Zeitzer, J. M., Czeisler, C. A., & Dijk, D. J. (2000). Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behavioural Brain Research*, 115(1). [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(00\)00236-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(00)00236-9)

- CIE. (2005). *Lighting of outdoor work places* (p. 30). CIE Central Bureau. [https://doi.org/CIE S 015/E:2005](https://doi.org/CIE%20S%20015/E:2005)
- CIE Central Bureau. (2018). *CIE. S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC- Influenced Responses to Light*. CIE Central Bureau.
- CIE TC 1-48. (2004). CIE 015:2004 Colorimetry, 3rd Edition. *CIE 015:2004 Colorimetry, 3rd Edition*.
- Davis, W. (2010). Color quality scale. *Optical Engineering*, 49(3). <https://doi.org/10.1117/1.3360335>
- Figueiro, M. G., Kalsher, M., Steverson, B. C., Heerwagen, J., Kampschroer, K., & Rea, M. S. (2019). Circadian-effective light and its impact on alertness in office workers. *Lighting Research and Technology*, 51(2), 171–183. <https://doi.org/10.1177/1477153517750006>
- Figueiro, M. G., Plitnick, B., & Rea, M. S. (2016). Research Note: A self-luminous light table for persons with Alzheimer's disease. *Lighting Research and Technology*, 48(2). <https://doi.org/10.1177/1477153515603881>
- Figueiro, Mariana G., Hunter, C. M., Higgins, P. A., Hornick, T. R., Jones, G. E., Plitnick, B., Brons, J., & Rea, M. S. (2015). Tailored lighting intervention for persons with dementia and caregivers living at home. *Sleep Health*, 1(4). <https://doi.org/10.1016/j.sleh.2015.09.003>
- Figueiro, Mariana G., Sahin, L., Wood, B., & Plitnick, B. (2016). Light at Night and Measures of Alertness and Performance: Implications for Shift Workers. *Biological Research for Nursing*, 18(1). <https://doi.org/10.1177/1099800415572873>
- Gooley, J. J., Mien, I. H., St. Hilaire, M. A., Yeo, S. C., Chua, E. C. P., van Reen, E., Hanley, C. J., Hull, J. T., Czeisler, C. A., & Lockley, S. W. (2012). Melanopsin and Rod-cone photoreceptors play different roles in mediating pupillary light responses during exposure to continuous light in humans. *Journal of Neuroscience*, 32(41). <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1321-12.2012>
- Gooley, J. J., Rajaratnam, S. M. W., Brainard, G. C., Kronauer, R. E., Czeisler, C. A., & Lockley, S. W. (2010). Spectral responses of the human circadian system depend on

- the irradiance and duration of exposure to light. *Science Translational Medicine*, 2(31). <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3000741>
- Hattar, S., Liao, H. W., Takao, M., Berson, D. M., & Yau, K. W. (2002). Melanopsin-containing retinal ganglion cells: Architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science*, 295(5557), 1065–1070. <https://doi.org/10.1126/science.1069609>
- Hattar, S., Lucas, R. J., Mrosovsky, N., Thompson, S., Douglas, R. H., Hankins, M. W., Lem, J., Biel, M., Hofmann, F., Foster, R. G., & Yau, K. W. (2003). Melanopsin and rod—cone photoreceptive systems account for all major accessory visual functions in mice. *Nature*, 424(6944), 76–81. <https://doi.org/10.1038/nature01761>
- Houser, K. W., & Esposito, T. (2021). Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process. *Frontiers in Neurology*, 12(January), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.630553>
- Kolb, H. (1995). Simple Anatomy of the Retina. In *Webvision: The Organization of the Retina and Visual System*.
- Laboratories, U. (2019). *Design Guideline for Promoting Circadian Entrainment with Light for Day-Active People* (underwriters Laboratories (ed.); 1st ed.). <https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?UniqueKey=36592&ShowFreeviewModal=1&ShowFreeviewModal=1>
- Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D. M., Brown, T. M., Cooper, H. M., Czeisler, C. A., Figueiro, M. G., Gamlin, P. D., Lockley, S. W., O'Hagan, J. B., Price, L. L. A., Provencio, I., Skene, D. J., & Brainard, G. C. (2014). Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences*, 37(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>
- Malacara, D. (2011). Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications, Second Edition. In *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications, Second Edition*. <https://doi.org/10.1117/3.881172>
- Nowozin, C., Wahnschaffe, A., Rodenbeck, A., Zeeuw, J. de, Hädel, S., Kozakov, R., Schöpp, H., Münch, M., & Kunz, D. (2017). Applying Melanopic Lux to Measure Biological Light Effects on Melatonin Suppression and Subjective Sleepiness. *Current*

- Alzheimer Research*, 14(10). <https://doi.org/10.2174/1567205014666170523094526>
- Panda, S., Provencio, I., Tu, D. C., Pires, S. S., Rollag, M. D., Castrucci, A. M., Pletcher, M. T., Sato, T. K., Wiltshire, T., Andahazy, M., Kay, S. A., Van Gelder, R. N., & Hogenesch, J. B. (2003). Melanopsin is required for non-image-forming photic responses in blind mice. *Science*, 301(5632). <https://doi.org/10.1126/science.1086179>
- Penders, T. M., Stanciu, C. N., Schoemann, A. M., Ninan, P. T., Bloch, R., & Saeed, S. A. (2016). Bright light therapy as augmentation of pharmacotherapy for treatment of depression: A systematic review and meta-analysis. In *Primary Care Companion to the Journal of Clinical Psychiatry* (Vol. 18, Issue 5). <https://doi.org/10.4088/PCC.15r01906>
- Perera, S., Eisen, R., Bhatt, M., Bhatnagar, N., de Souza, R., Thabane, L., & Samaan, Z. (2016). Light therapy for non-seasonal depression: systematic review and meta-analysis. *BJPsych Open*, 2(2). <https://doi.org/10.1192/bjpo.bp.115.001610>
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., & Hamner, R. (2012a). Erratum: Modeling the spectral sensitivity of the human circadian system (*Lighting Research and Technology* (2012) 44:4 (386-396) DOI: 10.1177/1477153511430474). *Lighting Research and Technology*, 44(4), 516. <https://doi.org/10.1177/1477153512467607>
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., & Hamner, R. (2012b). Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Research and Technology*, 44(4), 386–396. <https://doi.org/10.1177/1477153511430474>
- Rea, Mark S., Figueiro, M. G., Bullough, J. D., & Bierman, A. (2005). A model of phototransduction by the human circadian system. *Brain Research Reviews*, 50(2), 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.07.002>
- Rogério dos Santos Alves; Alex Soares de Souza, et all. (2014). Light and Human Health: An Overview of the Impact of Optical Radiation on Visual, Circadian, Neuroendocrine, and Neurobehavioral Responses. *Igarss 2014*, 1, 1–5.
- Rüger, M., Gordijn, M. C. M., Beersma, D. G. M., De Vries, B., & Daan, S. (2006). Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology: Comparison of daytime and nighttime exposure. *American Journal of Physiology* -

- Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 290(5).
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.00121.2005>
- Sahin, L., & Figueiro, M. G. (2013). Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiology and Behavior*, 116–117.
<https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2013.03.014>
- Schmidt, T. M., Do, M. T. H., Dacey, D., Lucas, R., Hattar, S., & Matynia, A. (2011). Melanopsin-positive intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: From form to function. *Journal of Neuroscience*, 31(45). <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4132-11.2011>
- Sciences, N. I. of G. M. (2011). A Light on Life's Rhythm. In *Findings* (11th ed., p. 20).
- Sciences, N. I. of G. M. (2020). *circadian-rhythms*. Bethesda.
<https://www.nigms.nih.gov/education/fact-sheets/Pages/circadian-rhythmsspanish.aspx>
- Skeldon, A. C., Phillips, A. J. K., & Dijk, D. J. (2017). The effects of self-selected light-dark cycles and social constraints on human sleep and circadian timing: A modeling approach. In *Scientific Reports* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1038/srep45158>
- Snodderly, D. M., Brown, P. K., Delori, F. C., & Auran, J. D. (1984). The macular pigment. I. Absorbance spectra, localization, and discrimination from other yellow pigments in primate retinas. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 25(6), 660–673.
- Souman, J. L., Borra, T., de Goijer, I., Schlangen, L. J. M., Vlaskamp, B. N. S., & Lucassen, M. P. (2018). Spectral Tuning of White Light Allows for Strong Reduction in Melatonin Suppression without Changing Illumination Level or Color Temperature. *Journal of Biological Rhythms*, 33(4). <https://doi.org/10.1177/0748730418784041>
- Stockman, A., MacLeod, D. I. A., & Johnson, N. E. (1993). Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of the Optical Society of America A*, 10(12).
<https://doi.org/10.1364/josaa.10.002491>
- te Kulve, M., Schlangen, L. J. M., & van Marken Lichtenbelt, W. D. (2019). Early evening light mitigates sleep compromising physiological and alerting responses to subsequent late evening light. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52352->

w

- Truong, W., Trinh, V., & Khanh, T. Q. (2020). Circadian stimulus – A computation model with photometric and colorimetric quantities. *Lighting Research and Technology*, 52(6). <https://doi.org/10.1177/1477153519887423>
- Truong, William, Zandi, B., Trinh, V. Q., & Khanh, T. Q. (2020). Circadian metric – Computation of circadian stimulus using illuminance, correlated colour temperature and colour rendering index. *Building and Environment*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107146>
- US DOE. (2016). Solid-State Lighting R&D Plan. In *Electronic Publishing* (Issue June).
- Wagiman, K. R., Abdullah, M. N., Hassan, M. Y., Mohammad Radzi, N. H., Abu Bakar, A. H., & Kwang, T. C. (2020). Lighting system control techniques in commercial buildings: Current trends and future directions. *Journal of Building Engineering*, 31, 101342. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101342>
- Yosten, G. L. C. (2020). AJP-Regulatory, integrative and comparative physiology: Looking toward the future. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 319(1). <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00104.2020>

A. Anexo: Tablas de sensibilidad espectral de los fotoreceptores y otras

| λ [nm] | S_{λ} (Stockman et al., 1993) | Mel_{λ} (M. S. Rea et al., 2012b) | $Mel_{2\lambda}$ | V'_{λ} (CIE 1994) | V_{λ} (CIE 1994) | $V_{2\lambda}$ | \bar{x} (CIE 1931) | \bar{y} (CIE 1931) | \bar{z} (CIE 1931) |
|----------------|---------------------------------------|---|------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 380 | 0 | 0.00120918 | 0.0009 | 0.000589 | 0 | | | | |
| 382 | 0 | 0.00187701 | 0.0011 | 0.000752 | 0 | 0.000039 | 0.0014 | 0 | 0.0065 |
| 384 | 0 | 0.00271061 | 0.0015 | 0.000972 | 0 | 0.000046915 | 0.001576 | 0.000052 | 0.007428 |
| 386 | 0 | 0.00374442 | 0.0019 | 0.001268 | 0 | 0.000057176 | 0.001944 | 0.000088 | 0.009252 |
| 388 | 0 | 0.0048808 | 0.0024 | 0.001668 | 0 | 0.000072344 | 0.0025008 | 0.0001048 | 0.0119576 |
| 390 | 0.0029 | 0.00609217 | 0.0031 | 0.002209 | 0.0001 | 0.000093508 | 0.0032416 | 0.0000976 | 0.0155232 |
| 392 | 0.0153 | 0.00909936 | 0.004 | 0.002939 | 0.0001 | 0.00012 | 0.0042 | 0.0001 | 0.0201 |
| 394 | 0.0277 | 0.01259313 | 0.0051 | 0.003921 | 0.0002 | 0.00015149 | 0.0053008 | 0.000128 | 0.0253232 |
| 396 | 0.0401 | 0.01661071 | 0.0067 | 0.00524 | 0.0002 | 0.00019182 | 0.0066864 | 0.000172 | 0.0318776 |
| 398 | 0.0526 | 0.02107014 | 0.0086 | 0.00698 | 0.0003 | 0.00024691 | 0.0086936 | 0.0002336 | 0.041372 |
| 400 | 0.1088 | 0.02594744 | 0.0114 | 0.00929 | 0.0007 | 0.00031852 | 0.0113032 | 0.0003152 | 0.053708 |
| 402 | 0.1349 | 0.03543285 | 0.015 | 0.01231 | 0.0008 | 0.000396 | 0.0143 | 0.0004 | 0.0679 |
| 404 | 0.1619 | 0.04589885 | 0.0197 | 0.01619 | 0.001 | 0.00047302 | 0.0171544 | 0.0004608 | 0.0814216 |
| 406 | 0.1898 | 0.05730692 | 0.0266 | 0.02113 | 0.0013 | 0.00057222 | 0.0206552 | 0.0005344 | 0.0980568 |
| 408 | 0.2188 | 0.0701016 | 0.0356 | 0.0273 | 0.0017 | 0.00072456 | 0.0263096 | 0.000688 | 0.1250592 |
| 410 | 0.2488 | 0.08443035 | 0.0462 | 0.03484 | 0.0022 | 0.00094116 | 0.0338392 | 0.000912 | 0.1610824 |
| 412 | 0.2947 | 0.10466962 | 0.0576 | 0.0439 | 0.0028 | 0.00121 | 0.0435 | 0.0012 | 0.2074 |
| 414 | 0.3423 | 0.12620281 | 0.0711 | 0.0545 | 0.0036 | 0.0015308 | 0.0550568 | 0.0015328 | 0.2628584 |
| 416 | 0.3935 | 0.14884959 | 0.0896 | 0.0668 | 0.0047 | 0.0019353 | 0.0691064 | 0.0019424 | 0.3303872 |
| 418 | 0.4494 | 0.17402786 | 0.1135 | 0.0808 | 0.0061 | 0.0024548 | 0.0871296 | 0.0024848 | 0.4171872 |
| 420 | 0.5086 | 0.20209406 | 0.1372 | 0.0966 | 0.0081 | 0.0031178 | 0.1088912 | 0.0031336 | 0.5219984 |
| 422 | 0.5655 | 0.23361424 | 0.1569 | 0.1141 | 0.0108 | 0.004 | 0.1344 | 0.004 | 0.6456 |
| 424 | 0.6265 | 0.26635175 | 0.1762 | 0.1334 | 0.0142 | 0.0051593 | 0.1654032 | 0.005164 | 0.7966736 |
| 426 | 0.6884 | 0.29985039 | 0.1994 | 0.1541 | 0.0181 | 0.0065462 | 0.1990656 | 0.006552 | 0.9615008 |
| 428 | 0.7502 | 0.33516111 | 0.2264 | 0.1764 | 0.0225 | 0.0080865 | 0.2297352 | 0.0080816 | 1.1131536 |
| 430 | 0.8155 | 0.37241057 | 0.2539 | 0.1998 | 0.0275 | 0.0097677 | 0.2585664 | 0.0097672 | 1.2571112 |
| 432 | 0.8458 | 0.40395125 | 0.2799 | 0.2243 | 0.0327 | 0.0116 | 0.2839 | 0.0116 | 1.3856 |
| | | | | | | 0.013583 | 0.3046944 | 0.0135672 | 1.4938536 |

| λ [nm] | S_{λ} (Stockman et al., 1993) | Mel_{λ} (M. S. Rea et al., 2012b) | $Mel_{2\lambda}$ | V_{λ} (CIE 1994) | V_{λ} (CIE 1994) | $V_{2\lambda}$ | \bar{x} (CIE 1931) | \bar{y} (CIE 1931) | \bar{z} (CIE 1931) |
|----------------|---------------------------------------|---|------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 434 | 0.8769 | 0.43599541 | 0.3064 | 0.2496 | 0.0384 | 0.015715 | 0.3215592 | 0.0156816 | 1.5845168 |
| 436 | 0.9088 | 0.46841267 | 0.3361 | 0.2755 | 0.0447 | 0.018007 | 0.3343672 | 0.0179664 | 1.6564888 |
| 438 | 0.9415 | 0.50201156 | 0.3692 | 0.3017 | 0.0516 | 0.020454 | 0.3430104 | 0.0204288 | 1.7092776 |
| 440 | 0.9751 | 0.53804842 | 0.4016 | 0.3281 | 0.0589 | 0.023 | 0.3483 | 0.023 | 1.7471 |
| 442 | 0.979 | 0.56428598 | 0.4308 | 0.3543 | 0.067 | 0.02561 | 0.3502216 | 0.0256096 | 1.7698872 |
| 444 | 0.983 | 0.5907576 | 0.4592 | 0.3803 | 0.0758 | 0.028351 | 0.3492088 | 0.0283408 | 1.7798616 |
| 446 | 0.9879 | 0.61867074 | 0.4895 | 0.406 | 0.0856 | 0.031311 | 0.3465584 | 0.0313216 | 1.783724 |
| 448 | 0.9938 | 0.64727359 | 0.5217 | 0.431 | 0.0966 | 0.034521 | 0.3419248 | 0.0345232 | 1.779768 |
| 450 | 1 | 0.67601857 | 0.5537 | 0.455 | 0.109 | 0.038 | 0.3362 | 0.038 | 1.7721 |
| 452 | 0.9965 | 0.70130784 | 0.5843 | 0.479 | 0.1224 | 0.041768 | 0.3301024 | 0.0417744 | 1.7644112 |
| 454 | 0.9928 | 0.72728523 | 0.6144 | 0.502 | 0.1374 | 0.045843 | 0.3229552 | 0.0458432 | 1.7529816 |
| 456 | 0.9822 | 0.75396194 | 0.6452 | 0.524 | 0.153 | 0.050244 | 0.3139744 | 0.0502416 | 1.7331808 |
| 458 | 0.9646 | 0.78155964 | 0.6766 | 0.546 | 0.1689 | 0.054981 | 0.3033088 | 0.0549672 | 1.7061776 |
| 460 | 0.9466 | 0.80964614 | 0.708 | 0.567 | 0.1861 | 0.06 | 0.2908 | 0.06 | 1.6692 |
| 462 | 0.9064 | 0.83360861 | 0.7391 | 0.588 | 0.1992 | 0.065278 | 0.2765376 | 0.0652696 | 1.6222976 |
| 464 | 0.8675 | 0.85729034 | 0.7699 | 0.61 | 0.2131 | 0.070911 | 0.2602528 | 0.0708848 | 1.5637408 |
| 466 | 0.828 | 0.88004605 | 0.8006 | 0.631 | 0.2274 | 0.077016 | 0.2409456 | 0.0770432 | 1.4864448 |
| 468 | 0.788 | 0.90117541 | 0.8316 | 0.653 | 0.2423 | 0.083667 | 0.2182752 | 0.0836824 | 1.3889456 |
| 470 | 0.7496 | 0.92138918 | 0.8603 | 0.676 | 0.2585 | 0.09098 | 0.1954 | 0.091 | 1.2876 |
| 472 | 0.6858 | 0.94062421 | 0.885 | 0.699 | 0.2752 | 0.099046 | 0.1735808 | 0.0990856 | 1.188888 |
| 474 | 0.6248 | 0.95720581 | 0.9071 | 0.722 | 0.2932 | 0.10788 | 0.1522864 | 0.1079008 | 1.090048 |
| 476 | 0.5721 | 0.97205065 | 0.9283 | 0.745 | 0.3158 | 0.11753 | 0.1322224 | 0.1175104 | 0.9945312 |
| 478 | 0.526 | 0.98409192 | 0.9485 | 0.769 | 0.3436 | 0.12799 | 0.1132328 | 0.1279288 | 0.9014424 |
| 480 | 0.48 | 0.9937646 | 0.9656 | 0.793 | 0.3729 | 0.13902 | 0.0956 | 0.139 | 0.813 |
| 482 | 0.4402 | 0.99895326 | 0.978 | 0.817 | 0.4032 | 0.15047 | 0.0793624 | 0.150436 | 0.7297704 |
| 484 | 0.4006 | 1 | 0.987 | 0.84 | 0.4357 | 0.16272 | 0.0646352 | 0.16264 | 0.6521152 |
| 486 | 0.3596 | 0.99909577 | 0.9938 | 0.862 | 0.4697 | 0.17624 | 0.0519184 | 0.176312 | 0.5824432 |
| 488 | 0.3179 | 0.9951561 | 0.9982 | 0.884 | 0.5055 | 0.19127 | 0.0412168 | 0.19126 | 0.5205864 |
| 490 | 0.2768 | 0.98918222 | 1 | 0.904 | 0.5453 | 0.20802 | 0.032 | 0.208 | 0.4652 |
| 492 | 0.2489 | 0.98055057 | 0.9989 | 0.923 | 0.5817 | 0.22673 | 0.0240936 | 0.2267208 | 0.416156 |
| 494 | 0.2222 | 0.96864585 | 0.995 | 0.941 | 0.6217 | 0.24748 | 0.0175408 | 0.2474064 | 0.373096 |
| 496 | 0.1935 | 0.95425428 | 0.9882 | 0.957 | 0.6547 | 0.27018 | 0.0121432 | 0.2702784 | 0.334736 |
| 498 | 0.1644 | 0.9371475 | 0.9785 | 0.97 | 0.6805 | 0.29505 | 0.0079344 | 0.2951448 | 0.301496 |
| 500 | 0.138 | 0.91738094 | 0.966 | 0.982 | 0.7107 | 0.323 | 0.0049 | 0.323 | 0.272 |
| 502 | 0.1183 | 0.89508497 | 0.9505 | 0.99 | 0.7305 | 0.35469 | 0.0029232 | 0.35474 | 0.246296 |
| 504 | 0.101 | 0.87068475 | 0.9323 | 0.997 | 0.7536 | 0.38929 | 0.0021816 | 0.389392 | 0.223536 |
| 506 | 0.0853 | 0.84403619 | 0.9117 | 1 | 0.7735 | 0.42563 | 0.002972 | 0.4255584 | 0.201 |
| 508 | 0.071 | 0.81571098 | 0.8887 | 1 | 0.7899 | 0.46339 | 0.00516 | 0.4634888 | 0.179024 |
| 510 | 0.0584 | 0.78560144 | 0.8629 | 0.997 | 0.8074 | 0.503 | 0.0093 | 0.503 | 0.1582 |

| λ [nm] | S_λ (Stockman et al., 1993) | Mel_λ (M. S. Rea et al., 2012b) | $Mel_{2\lambda}$ | V'_λ (CIE 1994) | V_λ (CIE 1994) | $V_{2\lambda}$ | \bar{x} (CIE 1931) | \bar{y} (CIE 1931) | \bar{z} (CIE 1931) |
|----------------|-------------------------------------|---|------------------|-------------------------|------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 512 | 0.0496 | 0.75276141 | 0.8335 | 0.99 | 0.8259 | | | | |
| 514 | 0.0418 | 0.71884291 | 0.8015 | 0.981 | 0.8439 | 0.54451 | 0.0156 | 0.5445592 | 0.1384288 |
| 516 | 0.0346 | 0.68439886 | 0.7687 | 0.968 | 0.8569 | 0.58697 | 0.024012 | 0.5872256 | 0.1200464 |
| 518 | 0.028 | 0.65011357 | 0.7346 | 0.953 | 0.8646 | 0.62935 | 0.0348248 | 0.6290752 | 0.1039664 |
| 520 | 0.0221 | 0.61444693 | 0.6996 | 0.935 | 0.8685 | 0.67088 | 0.0480576 | 0.6707824 | 0.0900688 |
| 522 | 0.0195 | 0.57956151 | 0.6638 | 0.915 | 0.8882 | 0.71 | 0.0633 | 0.71 | 0.0782 |
| 524 | 0.0171 | 0.54524279 | 0.6275 | 0.892 | 0.9033 | 0.74546 | 0.080488 | 0.7453104 | 0.0686544 |
| 526 | 0.0148 | 0.51079715 | 0.5913 | 0.867 | 0.9146 | 0.77784 | 0.099532 | 0.7777792 | 0.0609072 |
| 528 | 0.0126 | 0.47683149 | 0.5551 | 0.84 | 0.9223 | 0.80811 | 0.1200968 | 0.808136 | 0.0538656 |
| 530 | 0.0105 | 0.44392215 | 0.5193 | 0.811 | 0.9269 | 0.83631 | 0.1423696 | 0.836316 | 0.0477672 |
| 532 | 0.0093 | 0.4123641 | 0.4841 | 0.781 | 0.9415 | 0.862 | 0.1655 | 0.862 | 0.0422 |
| 534 | 0.0082 | 0.38145728 | 0.4494 | 0.749 | 0.9531 | 0.88496 | 0.1890544 | 0.8849672 | 0.0369064 |
| 536 | 0.007 | 0.35189757 | 0.4158 | 0.717 | 0.9621 | 0.90544 | 0.2133032 | 0.9054576 | 0.0320512 |
| 538 | 0.0059 | 0.32359897 | 0.3831 | 0.683 | 0.9686 | 0.92373 | 0.2382784 | 0.923808 | 0.0276728 |
| 540 | 0.0048 | 0.29655967 | 0.3517 | 0.65 | 0.9729 | 0.93992 | 0.2639728 | 0.939944 | 0.0237736 |
| 542 | 0.0043 | 0.27094328 | 0.3216 | 0.616 | 0.9815 | 0.954 | 0.2904 | 0.954 | 0.0203 |
| 544 | 0.0037 | 0.24677175 | 0.2929 | 0.581 | 0.988 | 0.96601 | 0.3175776 | 0.9659984 | 0.0172472 |
| 546 | 0.0032 | 0.22403306 | 0.2657 | 0.548 | 0.9925 | 0.97602 | 0.3454848 | 0.9759872 | 0.0145976 |
| 548 | 0.0026 | 0.20271627 | 0.2399 | 0.514 | 0.9951 | 0.98409 | 0.3740784 | 0.9841376 | 0.012292 |
| 550 | 0.0021 | 0.18289771 | 0.2157 | 0.481 | 0.9961 | 0.99031 | 0.4033488 | 0.9903752 | 0.010352 |
| 552 | 0.0018 | 0.16447172 | 0.1931 | 0.448 | 0.9988 | 0.99495 | 0.4334 | 0.995 | 0.0087 |
| 554 | 0.0016 | 0.1474327 | 0.172 | 0.417 | 1 | 0.9981 | 0.4643424 | 0.9981784 | 0.00732 |
| 556 | 0.0014 | 0.13179067 | 0.1526 | 0.3864 | 0.9996 | 0.99975 | 0.4960432 | 0.9997952 | 0.006196 |
| 558 | 0.0011 | 0.1174456 | 0.1348 | 0.3569 | 0.9977 | 0.99986 | 0.5283192 | 0.9998224 | 0.0052536 |
| 560 | 0.0009 | 0.10434701 | 0.1185 | 0.3288 | 0.9939 | 0.99833 | 0.5612544 | 0.9983008 | 0.0045192 |
| 562 | 0.0008 | 0.09242841 | 0.1037 | 0.3018 | 0.9873 | 0.995 | 0.5945 | 0.995 | 0.0039 |
| 564 | 0.0008 | 0.08163025 | 0.0904 | 0.2762 | 0.9789 | 0.98974 | 0.6279616 | 0.9897504 | 0.003348 |
| 566 | 0.0007 | 0.07190743 | 0.0785 | 0.2519 | 0.969 | 0.98272 | 0.6616088 | 0.9827152 | 0.002892 |
| 568 | 0.0006 | 0.06317259 | 0.068 | 0.2291 | 0.9575 | 0.97408 | 0.6952056 | 0.9740928 | 0.0025368 |
| 570 | 0.0006 | 0.0553741 | 0.0587 | 0.2076 | 0.9444 | 0.96386 | 0.7288672 | 0.9638496 | 0.0022896 |
| 572 | 0.0005 | 0.04843861 | 0.0505 | 0.1876 | 0.9306 | 0.952 | 0.7621 | 0.952 | 0.0021 |
| 574 | 0.0005 | 0.04229267 | 0.0433 | 0.169 | 0.9152 | 0.9385 | 0.7948144 | 0.9385024 | 0.0019488 |
| 576 | 0.0004 | 0.03684654 | 0.037 | 0.1517 | 0.8985 | 0.92346 | 0.8268952 | 0.9234432 | 0.0018424 |
| 578 | 0.0004 | 0.03202569 | 0.0316 | 0.1358 | 0.8805 | 0.90701 | 0.8578664 | 0.907016 | 0.0017704 |
| 580 | 0.0003 | 0.02778945 | 0.0269 | 0.1212 | 0.8611 | 0.8892 | 0.8879248 | 0.88918 | 0.0017448 |
| 582 | 0.0003 | 0.02405221 | 0.0229 | 0.1078 | 0.8391 | 0.87 | 0.9163 | 0.87 | 0.0017 |
| 584 | 0.0003 | 0.02077827 | 0.0194 | 0.0956 | 0.8161 | 0.84939 | 0.9427488 | 0.8493864 | 0.0015944 |
| 586 | 0.0003 | 0.01792299 | 0.0165 | 0.0845 | 0.7921 | 0.82758 | 0.9672584 | 0.8275312 | 0.0014632 |
| 588 | 0.0003 | 0.01543434 | 0.014 | 0.0745 | 0.7675 | 0.80479 | 0.9893512 | 0.8048432 | 0.0013368 |
| 590 | 0.0003 | 0.01327332 | 0.0118 | 0.0655 | 0.7423 | 0.78119 | 1.0091664 | 0.7811904 | 0.0012056 |
| | | | | | | 0.757 | 1.0263 | 0.757 | 0.0011 |

| λ [nm] | S_λ (Stockman et al., 1993) | Mel_λ (M. S. Rea et al., 2012b) | $Mel_{2\lambda}$ | V_λ (CIE 1994) | V_λ (CIE 1994) | $V_{2\lambda}$ | \bar{x} (CIE 1931) | \bar{y} (CIE 1931) | \bar{z} (CIE 1931) |
|----------------|-------------------------------------|---|------------------|------------------------|------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 592 | 0.0003 | 0.01138935 | 0.0099 | 0.0574 | 0.7182 | 0.73242 | 1.0409008 | 0.732448 | 0.0010504 |
| 594 | 0.0003 | 0.00975958 | 0.0084 | 0.0502 | 0.6938 | 0.7075 | 1.0524904 | 0.70748 | 0.0010232 |
| 596 | 0.0003 | 0.00835278 | 0.0071 | 0.0438 | 0.669 | 0.68222 | 1.0597472 | 0.68224 | 0.0009664 |
| 598 | 0.0003 | 0.0071472 | 0.006 | 0.0382 | 0.644 | 0.65667 | 1.0627864 | 0.656668 | 0.0008848 |
| 600 | 0.0003 | 0.00611511 | 0.0051 | 0.03315 | 0.6188 | 0.631 | 1.0622 | 0.631 | 0.0008 |
| 602 | 0.0002 | 0.00522445 | 0.0043 | 0.02874 | 0.5936 | 0.60531 | 1.0584184 | 0.6053224 | 0.0007248 |
| 604 | 0.0002 | 0.00445954 | 0.0036 | 0.02487 | 0.5684 | 0.57964 | 1.0509632 | 0.5796192 | 0.0006464 |
| 606 | 0.0001 | 0.00380466 | 0.003 | 0.02147 | 0.5432 | 0.55396 | 1.0390288 | 0.5539824 | 0.0005432 |
| 608 | 0.0001 | 0.00324543 | 0.0026 | 0.01851 | 0.5181 | 0.52835 | 1.0225936 | 0.5283568 | 0.0004104 |
| 610 | 0 | 0.00276767 | 0.0022 | 0.01593 | 0.4933 | 0.503 | 1.0026 | 0.503 | 0.0003 |
| 612 | 0 | 0.00235957 | 0.0018 | 0.01369 | 0.4688 | 0.47803 | 0.9793968 | 0.4780592 | 0.0002408 |
| 614 | 0 | 0.00201196 | 0.0015 | 0.01175 | 0.4446 | 0.4534 | 0.9528464 | 0.4534256 | 0.0002104 |
| 616 | 0 | 0.0017159 | 0.0013 | 0.01007 | 0.4208 | 0.42908 | 0.9231712 | 0.4290544 | 0.0001952 |
| 618 | 0 | 0.00146425 | 0.0011 | 0.00862 | 0.3972 | 0.40503 | 0.8903184 | 0.4049888 | 0.0002024 |
| 620 | 0 | 0.00125059 | 0.0009 | 0.00737 | 0.3736 | 0.381 | 0.8544 | 0.381 | 0.0002 |
| 622 | 0 | 0.00106748 | 0.0008 | 0.0063 | 0.3499 | 0.35683 | 0.814856 | 0.3567936 | 0.0001672 |
| 624 | 0 | 0.00091154 | 0.0007 | 0.00538 | 0.3264 | 0.33282 | 0.772688 | 0.3327408 | 0.0001216 |
| 626 | 0 | 0.00077928 | 0.0006 | 0.00459 | 0.3033 | 0.30934 | 0.729848 | 0.309416 | 0.0000784 |
| 628 | 0 | 0.00066692 | 0.0005 | 0.003913 | 0.281 | 0.28659 | 0.685676 | 0.286632 | 0.0000328 |
| 630 | 0 | 0.00057137 | 0.0004 | 0.003335 | 0.2599 | 0.265 | 0.6424 | 0.265 | 0 |
| 632 | 0 | 0.00049001 | 0.0004 | 0.002842 | 0.2401 | 0.24489 | 0.601276 | 0.244936 | 0.0000072 |
| 634 | 0 | 0.00042043 | 0.0004 | 0.002421 | 0.2217 | 0.22605 | 0.561448 | 0.226088 | -1.6E-06 |
| 636 | 0 | 0.00036107 | 0.0004 | 0.002062 | 0.2041 | 0.20816 | 0.5225736 | 0.2081328 | 0 |
| 638 | 0 | 0.00031056 | 0.0003 | 0.001757 | 0.1875 | 0.19116 | 0.4846912 | 0.1911376 | 0 |
| 640 | 0 | 0.00026751 | 0.0002 | 0.001497 | 0.1716 | 0.175 | 0.4479 | 0.175 | 0 |
| 642 | 0 | 0.00023039 | 0.0001 | 0.001276 | 0.1566 | 0.15965 | 0.4120928 | 0.1596368 | 0 |
| 644 | 0 | 0.00019863 | 0.0001 | 0.001088 | 0.1423 | 0.14513 | 0.3774824 | 0.1451184 | 0 |
| 646 | 0 | 0.00017142 | 0.0001 | 0.000928 | 0.129 | 0.1315 | 0.3445128 | 0.1315088 | 0 |
| 648 | 0 | 0.000148 | 0.0001 | 0.000792 | 0.1165 | 0.11878 | 0.3130496 | 0.1187936 | 0 |
| 650 | 0 | 0.00012795 | 0.0001 | 0.000677 | 0.1049 | 0.107 | 0.2835 | 0.107 | 0 |
| 652 | 0 | 0.00011069 | 0.0001 | 0.000579 | 0.0943 | 0.096189 | 0.256152 | 0.096192 | 0 |
| 654 | 0 | 9.5831E-05 | 0.0001 | 0.000496 | 0.0846 | 0.086265 | 0.230756 | 0.08628 | 0 |
| 656 | 0 | 8.3042E-05 | 0.0001 | 0.000425 | 0.0756 | 0.077121 | 0.2070744 | 0.0771056 | 0 |
| 658 | 0 | 7.2007E-05 | 0 | 0.0003645 | 0.0674 | 0.06871 | 0.1851648 | 0.0687072 | 0 |
| 660 | 0 | 6.2525E-05 | 0 | 0.0003129 | 0.0598 | 0.061 | 0.1649 | 0.061 | 0 |
| 662 | 0 | 5.4262E-05 | 0 | 0.0002689 | 0.0529 | 0.053955 | 0.1462176 | 0.0539552 | 0 |
| 664 | 0 | 4.7135E-05 | 0 | 0.0002313 | 0.0466 | 0.04755 | 0.1291448 | 0.0475696 | 0 |
| 666 | 0 | 4.1001E-05 | 0 | 0.0001991 | 0.041 | 0.041759 | 0.1136464 | 0.041776 | 0 |
| 668 | 0 | 3.5683E-05 | 0 | 0.0001716 | 0.0359 | 0.036564 | 0.0997248 | 0.036584 | 0 |

| λ [nm] | S_λ (Stockman et al., 1993) | Mel_λ (M. S. Rea et al., 2012b) | $Mel_{2\lambda}$ | V'_λ (CIE 1994) | V_λ (CIE 1994) | $V_{2\lambda}$ | \bar{x} (CIE 1931) | \bar{y} (CIE 1931) | \bar{z} (CIE 1931) |
|----------------|-------------------------------------|---|------------------|-------------------------|------------------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 670 | 0 | 3.1071E-05 | 0 | 0.000148 | 0.0314 | 0.032 | 0.0874 | 0.032 | 0 |
| 672 | 0 | 2.7082E-05 | 0 | 0.0001277 | 0.0275 | 0.028077 | 0.076824 | 0.0280816 | 0 |
| 674 | 0 | 2.362E-05 | 0 | 0.0001104 | 0.0242 | 0.024708 | 0.067752 | 0.0247328 | 0 |
| 676 | 0 | 2.0618E-05 | 0 | 0.0000954 | 0.0214 | 0.021801 | 0.0597456 | 0.021776 | 0 |
| 678 | 0 | 1.8017E-05 | 0 | 0.0000826 | 0.0189 | 0.019281 | 0.0529752 | 0.019276 | 0 |
| 680 | 0 | 1.5748E-05 | 0 | 0.0000715 | 0.0167 | 0.017 | 0.0468 | 0.017 | 0 |
| 682 | 0 | 1.3777E-05 | 0 | 0.000062 | 0.0145 | 0.014837 | 0.0408536 | 0.0148136 | 0 |
| 684 | 0 | 1.2066E-05 | 0 | 0.0000538 | 0.0126 | 0.012835 | 0.0353968 | 0.0128128 | 0 |
| 686 | 0 | 1.057E-05 | 0 | 0.0000467 | 0.0109 | 0.011068 | 0.0305704 | 0.0110512 | 0 |
| 688 | 0 | 9.2684E-06 | 0 | 0.0000406 | 0.0093 | 0.0095333 | 0.0263648 | 0.0095264 | 0 |
| 690 | 0 | 8.1349E-06 | 0 | 0.00003533 | 0.0081 | 0.00821 | 0.0227 | 0.0082 | 0 |
| 692 | 0 | 7.1401E-06 | 0 | 0.00003075 | 0.0069 | 0.0070854 | 0.0195824 | 0.0070704 | 0 |
| 694 | 0 | 6.277E-06 | 0 | 0.00002679 | 0.006 | 0.0061385 | 0.0169672 | 0.0061232 | 0 |
| 696 | 0 | 5.5207E-06 | 0 | 0.00002336 | 0.0052 | 0.0053431 | 0.0147424 | 0.005316 | 0 |
| 698 | 0 | 4.8559E-06 | 0 | 0.00002038 | 0.0046 | 0.0046764 | 0.0129608 | 0.004668 | 0 |
| 700 | 0 | 4.2779E-06 | 0 | 0.0000178 | 0.004 | 0.004102 | 0.0114 | 0.0041 | 0 |
| 702 | 0 | 3.7702E-06 | 0 | 0.00001556 | 0.0035 | 0.0035891 | 0.0099528 | 0.003572 | 0 |
| 704 | 0 | 3.3245E-06 | 0 | 0.0000136 | 0.0031 | 0.0031341 | 0.0086784 | 0.003108 | 0 |
| 706 | 0 | 2.9331E-06 | 0 | 0.00001191 | 0.0027 | 0.0027381 | 0.0075664 | 0.0027112 | 0 |
| 708 | 0 | 0 | 0 | 0.00001043 | 0.0023 | 0.0023932 | 0.0066288 | 0.0023864 | 0 |
| 710 | 0 | 0 | 0 | 0.00000914 | 0.0021 | 0.002091 | 0.0058 | 0.0021 | 0 |
| 712 | 0 | 0 | 0 | 0.00000802 | 0.0018 | 0.0018246 | 0.0050528 | 0.0018408 | 0 |
| 714 | 0 | 0 | 0 | 0.00000704 | 0.0016 | 0.0015902 | 0.0043984 | 0.0016104 | 0 |
| 716 | 0 | 0 | 0 | 0.00000618 | 0.0014 | 0.0013845 | 0.0038232 | 0.0013904 | 0 |
| 718 | 0 | 0 | 0 | 0.00000544 | 0.0012 | 0.0012041 | 0.0033344 | 0.0011808 | 0 |
| 720 | 0 | 0 | 0 | 0.00000478 | 0.001 | 0.001047 | 0.0029 | 0.001 | 0 |
| 722 | 0 | 0 | 0 | 0.00000421 | 0.0009 | 0.00091111 | 0.002504 | 0.0008608 | 0 |
| 724 | 0 | 0 | 0 | 3.709E-06 | 0.0008 | 0.00079324 | 0.002156 | 0.0007504 | 0 |
| 726 | 0 | 0 | 0 | 0.00000327 | 0.0007 | 0.00069008 | 0.0018576 | 0.000652 | 0 |
| 728 | 0 | 0 | 0 | 2.884E-06 | 0.0006 | 0.0005995 | 0.0016112 | 0.000568 | 0 |
| 730 | 0 | 0 | 0 | 2.546E-06 | 0.0005 | 0.00052 | 0.0014 | 0.0005 | 0 |