



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de maestría y doctorado en arquitectura

Título: PROTOTIPO DE CONTROL DE ILUMINACIÓN PARA MEJORAR EL CONFORT EN
ESPACIOS HABITABLES.

Subtítulo: Sistema de iluminación circadiana, automatizado para reducir trastornos del sueño, mejorar el
confort y la productividad en oficinas.

TESIS

Que para optar por el grado de maestro en arquitectura

Presenta: **Miguel Ángel Arrieta García**

Director de tesis: M. en C. Arturo Ocampo Álvarez. Posgrado de Arquitectura FES-Aragón

Sínodo:

M. en Ing. Fernando Macedo Chagolla. Posgrado de Arquitectura UNAM

M. en Arq. Jorge Rangel Dávalos. Posgrado de Arquitectura UNAM

M. en Arq. Humberto Islas Ramos. Posgrado de Arquitectura UNAM

M. en Arq. Enrique Bonifacio Gallardo Amador. Posgrado de Arquitectura UNAM

Ciudad de México, junio de 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



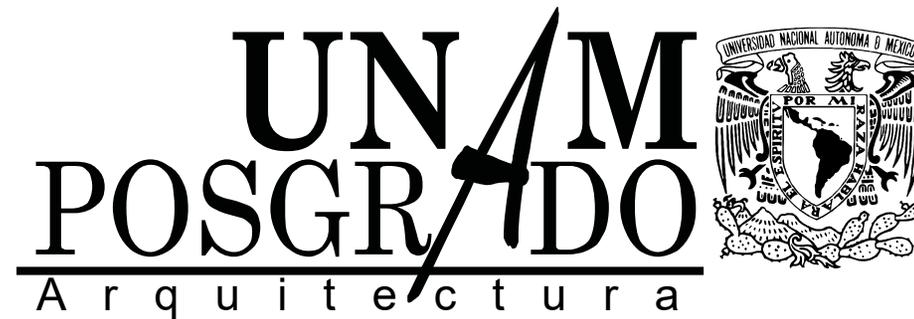
UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Universidad Nacional Autónoma de México



Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS

Agradecimientos

A mi esposa Diana, por todo su amor, apoyo y sacrificio al ceder el tiempo necesario para la conclusión de este proyecto.

A mis padres, quienes han sido un ejemplo de esfuerzo y siempre han respaldado mis aspiraciones.

A mis profesores del posgrado por sus enseñanzas, ánimos y críticas que han contribuido a este trabajo y mi formación.

A mis familiares y amigos por su comprensión y aliento a continuar con mi preparación académica.

A Conec-ta y su gente, por las facilidades y concesiones de tiempo y espacio brindados para esta investigación.

A la UNAM y la FES Aragón por la oportunidad de formar parte de este programa de posgrado de calidad.

Al Lighting Research Center del Instituto Politécnico Rensselaer, por su curso y aportaciones en iluminación saludable.

Al CONACYT por los recursos otorgados para elaboración del prototipo, los instrumentos de medición y el curso en el LRC.

A la UAM Xochimilco por permitirme el uso del laboratorio de materiales y sus instalaciones.

Resumen

La iluminación circadiana comenzó a cobrar relevancia tras el descubrimiento de foto receptores en la retina que captan parte del espectro no-visible de la luz y su relación directa con la sincronización del reloj biológico; un tema ahora más popular tras el premio Nobel de medicina de 2017.

Este estudio busca su aplicación en oficinas ya que estas representan un gran porcentaje de los centros de trabajo del país y por ser uno de los locales donde los reglamentos de construcción en México permiten la ausencia de luz natural; aunque podría aplicarse en otros espacios habitables con escasa iluminación natural.

A través de modelos matemáticos que permiten predecir los efectos de la luz en la segregación de melatonina y la automatización; se construyó un sistema de iluminación artificial que emula el dinamismo de la luz solar, contribuyendo a mejorar el bienestar de las personas, tratar el jetlag social, incrementar la calidad del sueño de las personas expuestas a iluminación comercial estática y aumentar la

productividad en los centros de trabajo.

El sistema es computarizado mediante un microcontrolador y un algoritmo que permite que luminarias led emitan el color e intensidad de luz correcto a cada momento del día en función de las actividades a realizar dentro de los espacios de oficina. La integración de sensores de luz ambiental y de presencia ayudan a ahorrar energía y reducen los contrastes entre zonas oscuras e iluminadas ofreciendo un diseño de iluminación adaptable a las necesidades humanas.

Al revisar el espectro de luz emitido se verificó contra el modelo de transducción circadiana su armonía con el reloj biológico siguiendo las recomendaciones de la OMS y cumpliendo los horarios que la sociedad actual impone.

El prototipo final fue probado matemáticamente a pequeña escala, pero abre el camino para realizar estudios médicos y desarrollar un producto comercial en el mercado nacional, donde no existe una solución de iluminación artificial benéfica para el reloj biológico de este tipo.

Palabras clave:

Sistema de iluminación, humano-céntrica, ciclo circadiano, oficinas, jetlag social.



Índice

Resumen	i
Palabras clave:.....	i
Índice.....	ii
Introducción	v
Planteamiento del problema.....	ix
Justificación.....	xiii
Hipótesis.....	xvii
Objetivo.....	xx
Sinopsis	xxi
I. La importancia de la luz y los sistemas de iluminación en la salud.....	1
I.1 Las estrellas como principal fuente de luz natural.	1
I.2 Iluminación artificial basada en la naturaleza.	3
I.3 La luz, como la percibimos y como se estandarizan sus características.....	7
I.3.1 La distribución de potencia espectral define la huella digital de la luz.....	13
I.3.2 Las longitudes de onda siempre se suman.....	14
I.3.3 Caracterización de las fuentes de luz y sus colores.....	17
I.3.4 Aprovechamiento de las características de la luz.	20

I.4	La iluminación como un factor para la salud.....	21
I.5	Normatividad respecto a la iluminación.....	23
I.6	Diferencias entre los sistemas de iluminación artificial convencionales y automatizados.....	26
I.6.1	Sistemas automatizados de iluminación comerciales.....	27
I.6.2	Estado del arte de los sistemas de iluminación dinámica y circadiana.....	29
II.	El reloj biológico, como influye en el ser humano y como se ajusta.....	33
II.1	Los trastornos del sueño relacionados con los ciclos circadianos.....	34
II.1.1	Un reloj biológico armónico y su influencia en el confort y bienestar.....	40
II.2	La iluminación y sus efectos en los ciclos circadianos.....	41
II.3	El modelo de foto transducción circadiana.....	42
II.4	La medición del estímulo circadiana.....	43
II.4.1	La fototerapia como método de sincronización del reloj biológico para mejorar el bienestar.....	45
III.	Propuesta y desarrollo del prototipo.....	47
III.1	Simulación e interpretación de variables en modelos matemáticos.....	47
III.2	Experimentación.....	49
III.2.1	Variables.....	49
III.2.2	Control de variables.....	49
III.2.3	Extensión.....	49



III.2.4 Laboratorio	49
III.2.5 Campo.....	49
III.3 Instrumentos y técnicas de observación	51
III.3.1 Medición de variables cuantitativas	51
III.4 Desarrollo del prototipo.....	52
III.4.1 Dispositivos de entrada – Sensores.	52
III.4.2 Dispositivos de Salida – Luminaria.....	53
III.4.3 Control.....	54
III.4.4 Lógica – Algoritmo	54
III.4.5 Medio / Protocolo	56
III.4.6 Funciones del sistema.....	58
III.4.7 Diagramas del sistema.....	59
III.4.8 Lógica de operación.....	62
III.4.9 Pruebas en campo	63
III.4.10 Código de programación	65
III.5 Conclusión.....	67
Referencias	69
Anexos.....	79

Introducción

La luz artificial estática a la que estamos expuestos afecta a nuestra salud, ya que los niveles de iluminación dictados por los estándares de construcción estimulan nuestro organismo para reducir la segregación de melatonina.¹ Estas perturbaciones se acrecientan en los espacios de oficinas donde la extensión de las jornadas laborales y la exposición a iluminación artificial fija causa trastornos del sueño² y promueve otras enfermedades,³ por lo que es necesario desarrollar un sistema de iluminación dinámico que sea armónico con reloj biológico humano.

Si bien los gremios encargados de vigilar la salud han tomado medidas respecto a la luz natural como la prevención de enfermedades relacionados con la piel y tratamientos como

la deficiencia de vitamina D o la advertencia de no mirar directamente al sol ni siquiera durante un eclipse.

La relación de la salud con la iluminación artificial se ha dejado un poco de lado o bien se limita a evitar problemas de la vista o accidentes laborales debido a una visibilidad por lo que los reglamentos exigen niveles mínimos de iluminancia para tareas específicas con estos propósitos, lo que muchas veces conduce a una iluminación artificial excesiva a partir de cálculos sobredimensionados para poder cubrir en todos los puntos los valores mínimos. Esta sobreexposición a luz artificial normalmente se ha considerado como inofensiva para la salud, quizá sea por la gran diferencia que hay entre los niveles de iluminación que se ven al comparar los 107,527 lux⁴ que puede alcanzar la luz solar en el exterior contra los 14,000

¹ Basado en la investigación del Dr. Gooley y colaboradores (2011, p. 3) donde se midió la melatonina de 104 voluntarios expuestos a luz blanca comercial (4100 K) a niveles de 200 Lux durante 8 horas la cual revela un retraso de la fase de sueño de hasta 2 horas en comparación con la exposición a 3 Lux durante el mismo periodo.

² En un estudio realizado por Vetter y colaboradores (2011, p. 442) en las oficinas de Osram en Munich, se demostró que la exposición a luz fría (6500 K) durante la jornada laboral aumenta el “jetlag social” que se refleja en despertar cada vez más tarde los fines de semana para

“compensar” el sueño acumulado durante la semana a causa de una desincronización del ciclo circadiano con el horario social.

³ Diversos investigadores como Cheryl Thompson (Redline & Berger, 2014, p. 157) han encontrado evidencia que vincula los trastornos del ciclo circadiano con enfermedades como el cáncer, diabetes y obesidad; apuntando entre las causas predominantes la exposición a la luz artificial durante la noche.

⁴ Nivel máximo de iluminancia de luz solar directa medido durante el cenit, el cual decae rápidamente al cambiar las condiciones ambientales y la hora del día. (Cleveland & Morris, 2013, p. 832)



lux que se requieren en una mesa de operaciones o los 200 a 500 lux que se necesitan en oficinas; cuando en realidad se ha comprobado que la exposición a luz artificial durante la noche puede repercutir en nuestra salud sin que al momento exista alguna regulación al respecto.

La luz tiene características como la longitud de onda y la iluminancia, las cuales pueden medirse y han sido estandarizadas para englobar la percepción de las personas en sus distintas condiciones de salud y edad, lo cual ayuda a establecer la calidad y cantidad de luz promedio necesaria para cada actividad humana.

Como parte de la normalización, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas en francés) en 1970 y 1978 publicó las curvas de sensibilidad espectral para el observador en condición diurna y nocturna que hoy en día siguen vigentes, también estableció parámetros para precisar los colores de acuerdo a la longitud de onda en sistemas de coordenadas para caracterizarlos, con los que se localizó la temperatura de color correlacionada de las fuentes de luz con la que se norman nuestras luminarias actualmente en función de que tan cálida (amarilla) o fría (azul) luce la luz.

La distribución de potencia espectral (SPD por sus siglas en inglés) de las diferentes longitudes de onda que componen la luz, equivale a la huella digital de las fuentes luminosas, pues aun cuando a simple vista dos luminarias luzcan del mismo color su SPD puede ser distinto y esto es gracias a la propiedad de la síntesis aditiva que tiene la luz, debido a que lo que la suma de las diferentes longitudes de onda contribuyen a la percepción del color, como ocurre al combinar luces rojo, verde y azul que sumadas se perciben como blanco.

Aparte de la visión existen otros efectos no visuales de la luz que están relacionados con la producción de vitamina D por la fotosíntesis de la piel y con los ciclos circadianos.

El centro de los ciclos circadianos se localiza arriba del cruce de los nervios ópticos en el núcleo supraquiasmático (NSQ) y se encuentra justo ahí porque necesita del estímulo de la luz a las células ganglionares retinales intrínsecamente fotosensibles (ipRGCs) situadas en la retina del ojo para sincronizarse con el entono en función de la luz y la oscuridad.

El NSQ lleva el ritmo central y este a su vez envía señales a los diferentes relojes biológicos del cuerpo para que las funciones biológicas trabajen conjuntamente, como es el

caso de la glándula pineal la cual constantemente frena la segregación de melatonina, pero al recibir instrucciones del NSQ permite la liberación de esta hormona al torrente sanguíneo regulando los ciclos de vigilia y sueño. La melatonina aparte de ser esencial en el reloj biológico también tiene otras funciones relacionadas con el sistema inmunológico y es por ello que su estudio se ha profundizado para mejorar la salud.

Hoy se cuenta con una serie de expresiones matemáticas conocidas como “Modelo de transducción circadiana” basado en los efectos de la luz sobre la supresión de melatonina con el que es posible pronosticar la reacción del cuerpo humano a las diferentes fuentes de luz y aprovecharla como terapia para trastornos relacionados con los ciclos circadianos, con lo que no solo se puede regularizar los ciclos de vigilia y sueño sino que se puede ofrecer bienestar y comodidades y por consiguiente mejorar el confort en los espacios habitables.

El jetlag o alteración del sueño por viajes con cambio de uso horario es el más conocido de los trastornos del sueño relacionado con los ciclos circadianos y recientemente se acuñó el término de jetlag social, donde las actividades nos

obligan a ajustar nuestros ciclos de sueño constantemente con los mismos efectos negativos.

La automatización facilita muchos procesos y hace más cómoda la vida, pero también puede aprovecharse para mejorar el bienestar y la salud de las personas, por lo que las investigaciones sobre la relación entre la iluminación y los ciclos circadianos han permitido la incorporación de sistemas automatizados en algunos aviones trasatlánticos para reducir los efectos del jetlag en los pasajeros, pero esta tecnología aún no se incorpora comercialmente en edificios de oficinas siendo que el jetlag social afecta hoy día a muchas personas que ni siquiera viajan.

La iluminación artificial ha dejado de ser sólo un complemento de la luz natural durante el día o su remplazo durante la noche, pues más allá de que las regulaciones indican los niveles mínimos para cada actividad, la amplia gama de luminarias comerciales y sistemas de control de iluminación proporcionan ambientes ajustables por medio de selección de colores o atenuación de lámparas que permiten adaptar las condiciones de luz y ahorrar energía mediante sensores o temporizadores, sin embargo son pocos los sistemas que ofrecen una verdadera iluminación dinámica y mucho menos

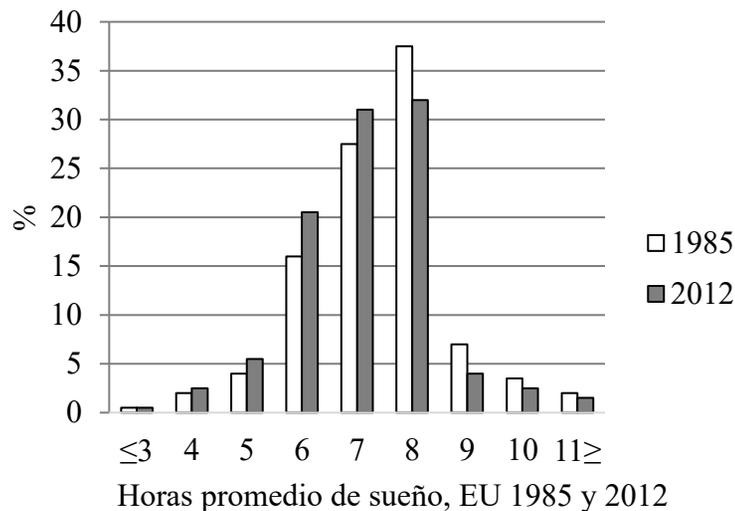


los que realizan de forma automática los ajustes en niveles y características de la iluminación artificial a los requeridos por el ciclo circadiano a lo largo del día.

Este tipo de sistemas conocidos como iluminación céntrico-humana o iluminación circadiana representan la siguiente generación de luminarias comerciales.

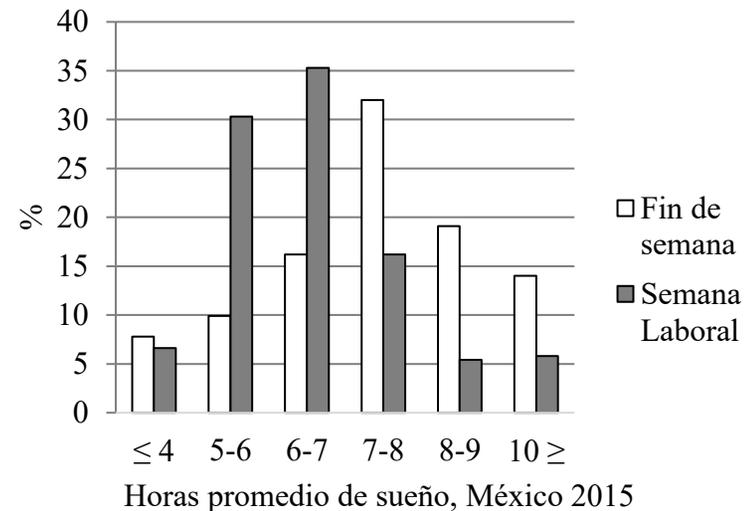
Planteamiento del problema

Los avances tecnológicos y los cambios culturales han modificado nuestros horarios extendiendo las actividades laborales y recreativas para ajustarnos a las exigencias sociales, alterando nuestros patrones de sueño, siendo que cada año dormimos menos horas como puede verse en la Gráfica 1, observando un aumento en el porcentaje de adultos que duermen siete horas o menos y disminuyendo los que duermen ocho o más horas.



Gráfica 1 Proporción de horas de sueño en un periodo de 24 horas 1985 y 2012. Elaboración propia a partir de (Ford, Cunningham, & Croft, 2015, p. 830)

Esto también provoca un incremento en el consumo de cafeína, tabaco u otras sustancias para mantenernos alerta durante los días hábiles y despertando hasta tarde durante los días de descanso, intentando “compensar” las horas de sueño que nuestro cuerpo necesita, marcando así una amplia diferencia entre las horas que dormimos durante días de trabajo y los días libres como puede verse en la Gráfica 2.



Gráfica 2 Diferencias en los hábitos de sueños de los internautas en México. Elaboración propia a partir de (Consulta Mitofsky, 2015, p. 2)



Este fenómeno es conocido como jetlag social⁵ y ocurre principalmente en ciudades y ambientes como hospitales, fábricas u oficinas.⁶

A esta reducción de sueño se añade la tendencia a dormir cada vez más tarde, pues de acuerdo con el doctor Reyes Haro⁷ “alrededor de 40 millones de mexicanos padecen trastornos del sueño, principalmente insomnio, por lo que éste ya es considerado un problema de salud pública”; todas estas alteraciones comparten una base crono-fisiológica cuyo principal síntoma es un desajuste entre el patrón de sueño biológico y el que se considera socialmente normal.

⁵ El Jetlag social relativo (SJLrel) es la diferencia entre las horas de Sueño-medio en día de trabajo (MSW) y los días libres (MSF) y se expresa: $SJLrel = MSF - MSW$ (Till Roenneberg, Allebrandt, Merrow, & Vetter, 2013, p. 10).

⁶ El Jetlag social es común entre trabajadores que se sientan frente a una computadora durante las horas de luz solar, ya que no pueden reiniciar su reloj biológico para adaptarse a despertar temprano o dormir toda la noche provocando una fatiga crónica. (MacRae, 2006, p. 1)

⁷ Director de la Clínica de Trastorno del Sueño de la UNAM quien se ha pronunciado en muchas ocasiones sobre la gravedad del problema como se cita en su entrevista con Gabriel Gutiérrez (2014, p. 96)

⁸ Los investigadores Cheryl L. Thompson y Carolyn D'Ambrosiohan han comparado diversos estudios sobre la relación entre dormir 6 horas o menos y el aumento de riesgo de padecer cáncer y otros padecimientos hallando opiniones encontradas, pero en la mayoría de los estudios se reporta un incremento en el riesgo. (Redline & Berger, 2014, p. 159)

La privación de sueño o cambios constantes en nuestras conductas de descanso tienen consecuencias en la salud como el aumento del riesgo de padecer obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares, muerte prematura y cáncer;⁸ particularmente el insomnio se ha asociado con un aumento en la probabilidad de padecer cáncer tiroideo,⁹ así como se ha encontrado una relación directa entre el nivel de jetlag social y la propensión a una obesidad de grado cada vez mayor entre la población con un índice masa corporal (IMC) de 25 kg/m² o más,¹⁰ lo cual incluye a la mayoría de la población urbana en México.¹¹

⁹ Un estudio de Juhuo Luo y colaboradores (2012, p. 4) realizado con 143 mil mujeres en EUA entre 1993 y 2010 mostró un incremento del 44% de riesgo de padecer cáncer tiroideo en las mujeres con mayor grado de insomnio de acuerdo a la escala de Insomnio de la Iniciativa de Salud de la Mujer (WHIIRS por sus siglas en inglés).

¹⁰ Un estudio de Till Roenneberg y colaboradores realizado a 20,731 personas muestra que a mayor número de horas desfasadas entre el horario social y el reloj biológico, es decir la diferencia de horas de sueño adicionales en los días inhábiles para compensar las pocas horas que se duermen a lo largo de la semana, se reportó que los individuos con un IMC mayor o igual a 25 presentan un mayor grado de obesidad (Till Roenneberg, Allebrandt, Merrow, & Vetter, 2012, p. 941)

¹¹ Las Prevalencias de índice de masa corporal de acuerdo con características sociodemográficas en adultos de 20 años o más en México muestran que la población urbana es la más propensa al sobrepeso y obesidad donde sólo el 26% de sus individuos tiene un IMC<25 adecuado para Organización Mundial de la Salud (normal 18.5-24.9 kg/m², sobrepeso 25.0-29.9 kg/m², obesidad grado I 30.0-34.9 kg/m², obesidad

La privación de sueño también tiene repercusiones económicas, no solo por la cantidad de accidentes de trabajo relacionados con la falta de descanso¹² sino por la reducción en la productividad.¹³

Si analizamos el tiempo que pasamos en distintas tareas veremos que los minutos dedicados a trabajar en México (incluyendo el trabajo no remunerado) de acuerdo a la

Gráfica 3 es el mayor respecto a otros países de la OECD, siendo el primer lugar en horas trabajadas al año (2016a), aun cuando se reportó una reducción respecto a años anteriores en la mayoría de los países, nuestro país se ha mantenido encima de las 43 horas a la semana y dado que el incremento en las jornadas no se refleja en el crecimiento económico nacional es una señal de improductividad, la cual puede estar asociada al “presentismo”¹⁴ común en muchas

empresas, que representa gastos asociados a los insumos, infraestructura y salarios.

grado II 35.0-39.9 kg/m², obesidad grado III \geq 40 kg/m²). (Oropeza Abúndez & Instituto Nacional de Salud Pública (Mexico), 2012, p. 184).

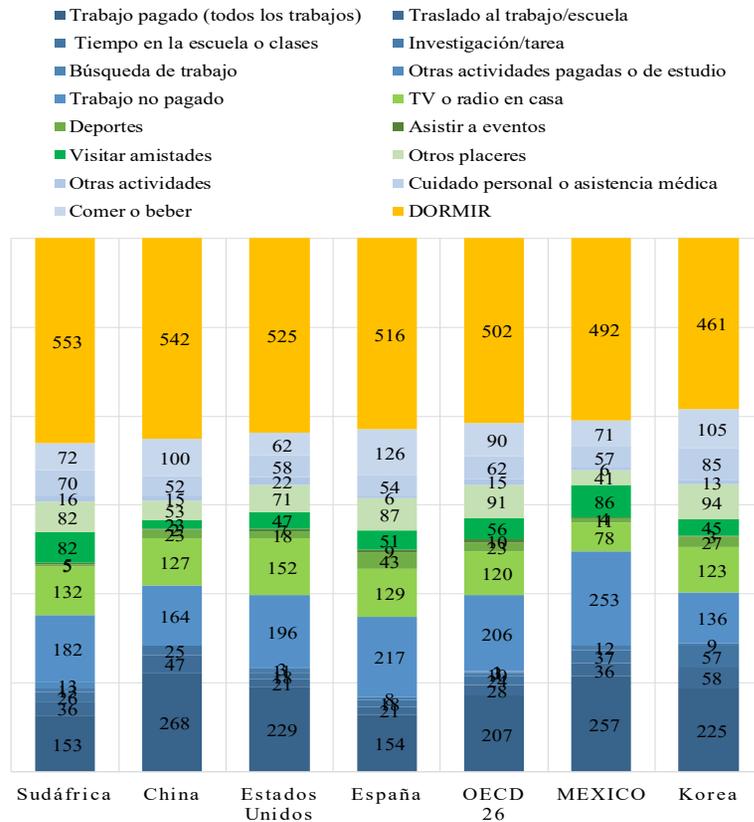
¹² Un estudio realizado por la Sociedad Mexicana para la Investigación y Medicina del Sueño y la empresa Sealy revela que el 50% de los accidentes laborales se vinculan a la falta de descanso (Economista, 2012)

¹³ La productividad está relacionada con el sueño, puesto que dormir 6 horas o menos durante 14 días produce un déficit en el desempeño

cognitivo equivalente a pasar dos noches sin dormir de acuerdo a Un estudio de Harvard Medical School (Baldwin, 2014)

¹⁴ *Presentismo* es cuando los trabajadores acuden a laborar, pero no rinden como deberían, según Horacio Tovalín Ahumada basado en un estudio realizado con 900 trabajadores en 9 empresas del DF y Guanajuato resultando que el 40 por ciento presentó algún nivel de improductividad. (Natalia Vitela, 2014)





Gráfica 3 Minutos al día dedicados a actividades (OECD, 2016b)

Si bien existen diversas causas de la improductividad laboral como un espacio de trabajo insalubre,¹⁵ trastornos del sueño y el estrés por exceso de trabajo, una consecuencia común es la extensión de las jornadas laborales, generando un círculo vicioso que afecta la calidad del sueño, la productividad y la salud.¹⁶

Los espacios de oficinas tienden a formar parte de los espacios causantes del “Síndrome del edificio enfermo” (SEE),¹⁷ más aún en México donde la normatividad permite en estos locales habitables el tener sólo iluminación y ventilación artificial,¹⁸ siendo que en una oficina carente o con escasa iluminación natural contribuye a una menor actividad total y menor tiempo de sueño como se ha manifestado en estudios

¹⁵ El Síndrome del Edificio Enfermo (SEE) fue reconocido como enfermedad por la Organización Mundial de la Salud en 1982, (Collado, 2009, p. 96)

¹⁶ Un estudio con 429 encuestados se encontró que el grupo de personas que trabajaban más horas tenían problemas de ansiedad y mala calidad del sueño. (Afonso, Fonseca, & Pires, 2017, p. 377)

¹⁷ La relación con la iluminación y el SEE se debe a una mala iluminación natural y la calidad de la iluminación artificial cuando sólo se

diseña para cumplir los niveles de iluminación establecidos por las normas (Rostron, 2008, p. 296).

¹⁸ De acuerdo a la sección 3.4.1 de las Normas técnicas complementarias, sobre las generalidades de iluminación y ventilación, (Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal, 2011) los espacios de oficinas forman parte de los locales habitables donde se permite sólo iluminación y ventilación artificial a diferencia otros espacios como aulas de educación básica y recámaras.

con personas que trabajan en espacios de oficinas sin ventanas y que están expuestos a luz artificial blanca estática.¹⁹

Los espacios de oficinas están presentes en el 40% de las unidades económicas en México, al dedicarse esta porción de centros de trabajo a servicios no industriales ni comerciales,²⁰ por lo que, ya sea que se utilice un solo cuarto con un escritorio o se trate de un edificio completo de oficinas; el tiempo que se permanece en estos espacios es mayor a ocho horas aumentando así la propensión a padecer jetlag social causado principalmente por la exposición a luz artificial inadecuada para el reloj biológico.

¹⁹ En un estudio con 49 trabajadores de oficina a través de encuestas y registros de actividad, sueño y exposición a la luz se encontró que los participantes que laboran en espacios sin iluminación natural no solo presentan menores niveles de actividad y calidad de sueño, sino que describieron mayores dolencias físicas en sus encuestas. (Boubekri, Cheung, Reid, Wang, & Zee, 2014, p. 607)

²⁰ De acuerdo con el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del INEGI, en 2012 se registraron 961,535 unidades económicas que se dedican a Servicios corporativos, financieros, de seguros, profesionales, científicos, técnicos y otros servicios incluyendo actividades gubernamentales; las cuales comúnmente utilizan desde despachos particulares hasta complejos de edificios de oficinas para desempeñar sus funciones.

²¹ En el estudio de Appleman, Figueiro, y Rea (2013, p. 8) los voluntarios con patrones de sueño similares fueron expuestos en distintos

Justificación

Al tratarse de un tema crono-fisiológico la iluminación artificial tiene un mayor peso en el problema principalmente por la cantidad de tiempo a la que estamos expuestos a ella, pero también la hace parte de la solución para ajustar nuestro reloj biológico al reloj social de una forma mucho más efectiva que el sólo hecho de sugerir un ajuste en la agenda y hábitos, ya que de acuerdo a recientes investigaciones, se ha demostrado que el controlar la exposición a luz circadiana modifica los patrones de sueño más eficazmente de lo que lo hace la imposición de horarios²¹ e incluso puede ser más estimulante que la cafeína.²²

horarios durante un periodo a luz azul y en otro momento al uso de anteojos naranjas que filtran la luz azul, después se les pidió despertar 90 minutos antes de lo normal conservando el patrón de luz/oscuridad; el grupo expuesto a luz azul por la tarde tuvo problemas para despertar temprano y el grupo expuesto a luz azul por la mañana se adaptó fácilmente, comprobando que la luz percibida por el ojo puede modificar la fase circadiana más efectivamente que el sólo cambio en los patrones de sueño/actividad.

²² Un estudio a 24 voluntarios experimentando con pastillas de 240mg de cafeína o placebo en combinación con la exposición durante 1 hora a luz azul (~40 lx de $\lambda_{max}=470nm$) o luz blanca comercial (~100 lx) reveló que la luz azul es más efectiva para activar que la cafeína sola. (Ekström & Beaven, 2014, p. 3679).

Lo anterior corrobora la teoría de que la luz es el principal “zeitgeber”,²³ esto es el mejor “sincronizador del reloj biológico” por encima de la actividad social, el ruido, la comida, la temperatura y el ejercicio.

En la Ciudad de México contamos con un clima templado y una incidencia solar muy uniforme a lo largo del año a diferencia de otras latitudes, donde la restricción de luz solar durante el invierno puede provocar trastornos estacionales; sin embargo, de acuerdo al doctor Reyes Haro “Una tercera parte de la población mexicana padece algún trastorno del sueño, de ella, el 40 por ciento presenta insomnio, que en la actualidad es subdiagnosticado, ignorado y mal manejado” (2014, p. 1) y puesto que “la luz tiene un efecto agudo sobre las respuestas neuroendocrinas, el rendimiento y el estado de alerta” (Sahin & Figueiro, 2013, p. 6)

Como arquitectos somos responsables de contribuir con el diseño y construcción de espacios que fomenten el

confort, el bienestar y la salud y mediante el uso de una correcta iluminación artificial tenemos la oportunidad poder influir sobre el estado de ánimo y sueño de las personas.

El contribuir en el tratamiento de trastornos de sueño, también ayuda a mejorar la salud de las personas e impacta también en la economía debido a que el insomnio representa una pérdida de 11.3 días de productividad al año en un trabajador promedio.²⁴

No hay dudas de que la iluminación artificial puede mejorar la productividad, no sólo al optimizar el desempeño visual sino al aprovechar los efectos biológicos y psicológicos comprobados con el uso de luminarias que se adecua a nuestras necesidades,²⁵ especialmente en el caso de trabajo en interiores, donde es posible emplear la iluminación artificial como una fototerapia continua que permitiría ajustar el reloj biológico y mejorar la productividad.

²³ El término viene del alemán que significa dador-de-tiempo (Grandin, Alloy, & Abramson, 2006, p. 682) La luz es un zeitgeber físico que regula la fisiología humana como lo hacen los alimentos y la actividad sexual y existen otros de carácter social como son los horarios de trabajo, la hora de dormir y ver televisión.

²⁴ Basado en un estudio con 7,428 trabajadores en Estados Unidos aplicando la America Insomnia Survey (Kessler et al., 2011, p. 1161)

²⁵ En un estudio en con iluminación artificial de trabajo controlable por el usuario realizado en una fábrica, se demostró que los empleados que ajustaban los niveles de iluminación a sus necesidades presentaron un 4.5% de mayor productividad que el grupo de referencia (Juslén, Wouters, & Tenner, 2007, p. 40)

Los controles de iluminación disponibles en México pueden tener la capacidad de ofrecer una iluminación ajustable por zonas o incluso para cada usuario, contribuyendo parcialmente en la productividad y especialmente en el buen estado anímico que brinda un espacio más confortable y adecuado para cada tarea.

Sin embargo, el principal objetivo de los sistemas de control de iluminación comerciales en la actualidad es la reducción del consumo eléctrico a través de estrategias como incorporar sensores para apagar las luces cuando está vacía la habitación o atenuar las luminarias cuando la aportación de luz solar es adecuada obteniendo ahorros de hasta el 50% sobre iluminación no controlable (Erice-Oronoz & Ibérica, 2010, p. 204), pero los efectos biológicos asociados a la calidad de la iluminación artificial son poco aprovechados en los sistemas de control de iluminación, dejando de lado la gran oportunidad para reducir el tiempo de retorno de inversión que representa actualizar las luminarias por unas más eficientes o integrar un sistema de control de iluminación.

²⁶ La empresa inmobiliaria Jones Lang LaSalle desarrolló este concepto en 2016 y una aplicación para calcular los costos inmobiliarios por pie cuadrado (Jones Lang LaSalle & Michael Case, 2017)

En la industria inmobiliaria existe un término conocido como “regla 3-30-300”²⁶ que revela que, por cada pie cuadrado ocupado para oficinas, las empresas en Estados Unidos de Norteamérica gastan al año \$3 dólares en servicios e insumos, \$30 dólares en la renta del espacio y \$300 dólares en el costo de capital humano. Aunque en México el ingreso es menor, las rentas y servicios también lo son, por lo que la regla se puede seguir aplicando en forma proporcional; siendo así que cualquier aumento en la productividad representa una utilidad económica que podría cubrir el mantenimiento de la infraestructura en la que se labora, sumando los beneficios en la salud y estado de ánimo del personal, repercutiendo en los benéficos económicos que pueden obtener las empresas que invierten en un espacio más armónico con el ser humano.

Este tipo de sistemas de iluminación están siendo cada vez más estudiados y desarrollados, en algunos casos se le conocen como iluminación-céntrico-humana (HCL por sus siglas en inglés)²⁷ la cual hace referencia al humano como eje de diseño, concepto que puede ser aplicado a otros campos

²⁷ HCL es el acrónimo de Human Centric Lighting, cuyo principal objetivo es atenuar y “afinar” la temperatura de color correlacionado de la luz artificial para mejorar las condiciones de las personas y sincronizar los

como la antropometría, la cual es inherente a la arquitectura, el diseño industrial y otras disciplinas.

En otros casos y particularmente en esta investigación, este tipo de sistemas de iluminación se le conocen como iluminación circadiana,²⁸ concepto que, a pesar de ser menos empleado en la industria y los nuevos desarrollos, expresa claramente la función de dichos sistemas de iluminación artificial y sus efectos sobre el reloj biológico.

Estos nuevos desarrollos ya han comenzado a ser comercializados por algunas marcas reconocidas, sin embargo, no están del todo disponibles en nuestro país y mucho menos se les da la difusión que se merecen a pesar de sus múltiples beneficios.

Siendo este prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables una oportunidad para tener en México un sistema de iluminación que aproveche los efectos no visuales de la luz incorporándolos a los avances y tecnologías utilizados en los sistemas de control

ritmos circadianos mediante iluminación dinámica. (Stan Walerczyk, 2012, p. 20)

²⁸ El concepto de iluminación circadiana implica comprender la luz como una radiación óptica capaz de producir sensaciones visuales y no-

convencionales, para ofrecer no solo ahorros energéticos sino mejores condiciones de iluminación que fomente la salud y productividad en las personas que laboran en espacios de oficinas.

visuales en los humanos como el estímulo circadiano. Involucra la relación matemática entre el espectro de luz su intensidad y sus efectos en los ritmos circadianos. (M. S. Rea, Figueiro, Bierman, & Bullough, 2010a, p. 6)

Hipótesis

Analizando la problemática y la teoría vista hasta el momento, se puede pronunciar la siguiente hipótesis principal:

Con un sistema de iluminación circadiana para oficinas que emule las características de la luz natural como son el ritmo, la temperatura de color e intensidad y dinamismo a lo largo del día, utilizando un controlador y un algoritmo que produzca variaciones en las longitudes de onda de la luz artificial de forma armónica con el ciclo circadiano humano, se puede lograr sincronizar el reloj biológico de los usuarios de forma controlada y complementaria a la iluminación natural, reduciendo el estrés sensorial provocado por la iluminación artificial constante, además de que tendrá la capacidad de no afectar la segregación natural de melatonina para tratar los trastornos de sueño relacionados con los ciclos circadianos como lo es el jetlag social. Derivando este prototipo de control de iluminación en mejorar el confort en espacios habitables, un mayor bienestar, comodidades y salud de los usuarios, lo que significa una mejora en el confort, calidad del sueño y productividad.

De esta hipótesis central se desprenden suposiciones secundarias que complementan la idea central de esta

investigación ofreciendo funciones que pueden añadirse al sistema a fin de procurar una mejor indagación y prototipo.

Dentro de las hipótesis secundarias tenemos las siguientes:

- 1) Un sistema de iluminación que tenga la capacidad de modular su temperatura de color e intensidad de acuerdo a las condiciones ambientales, será mucho más adaptable a los espacios independientemente de sus acabados y otras características, permitiendo además el cumplimiento de la normatividad aplicable y pudiendo emplear los mismos métodos de cálculo de iluminación que la iluminación artificial estática comercial, esto debido a que su dinamismo equivaldrá a tener instaladas diferentes tipos de luminarias las cuales se atenúan en función de la cantidad de luz necesaria para cubrir los niveles mínimos calculados y adecuados a cada tarea a realizar, además de que se adaptarían al mobiliario y acabados aumentando la intensidad de la iluminación en caso de que no sean de colores claros y absorban la luz, de modo que siempre se cumplan los niveles establecidos en la norma



independientemente de las condiciones ambientales.

- 2) Al construir luminarias que permitan combinar distintas longitudes de onda como es el caso de las luminarias led RGB²⁹ que tienen la capacidad de generar prácticamente cualquier color mediante la combinación de los colores primarios: rojo verde y azul, al concentrar en un solo chip las tres fuentes de luz de estado sólido, será posible controlar la generación de las longitudes de onda que son armónicas con el reloj biológico a lo largo del día a la vez que se regulará la intensidad de la luz artificial considerando la máxima capacidad de cada luminaria y la cantidad de lámparas necesarias para cubrir los requerimientos de cada espacio.
- 3) Con la integración de sensores de luz al prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, como son las resistencias dependientes de luz (LDR por sus siglas en inglés),

²⁹ Los diodos emisores de luz (led por sus siglas en inglés) son ampliamente utilizados por su bajo consumo de energía, bajo costo, tamaño compacto y cada día mejorada eficiencia energética; la combinación de tres Ledes de colores rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés) en un

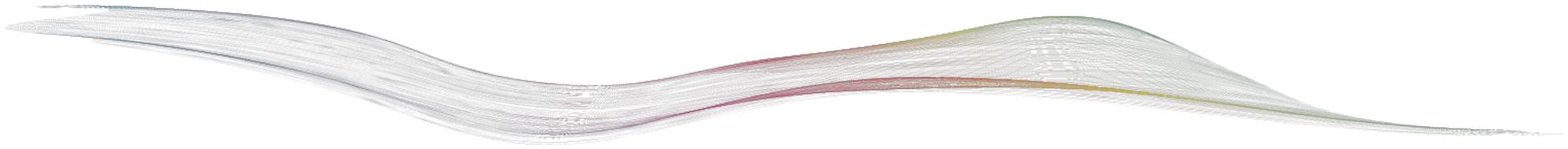
será posible medir la luz ambiental presente en los espacios y encender las luminarias a los niveles necesarios para compensar los requerimientos de iluminación para cada tarea, cumpliendo en este caso la doble función de ahorro energético y evitar la disminución en la segregación de melatonina provocada por la sobre exposición a iluminación artificial.

- 4) Añadiendo sensores de presencia al prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, como son los sensores infrarrojos, será posible detectar la presencia de usuarios y encender solo las luminarias necesarias de forma automática ofreciendo una estrategia adicional para el ahorro de energía y permitiendo la obtención de información sobre el uso de cada espacio.
- 5) Incorporando un sistema de comunicación mediante cables entre las distintas luminarias y

solo chip o cápsula los cuales comparten uno de sus polos (ánodo o cátodo) se lo conoce como RGB-LED (Mouli, Palaniappan, & Sillitoe, 2015, p. 247)

sensores se ofrecerá un prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables integral que permitirá encender las distintas lamparas considerando luminarias de trabajo ambientales y de acento en su caso, mediante el control de la intensidad de las luces aledañas a las luminarias que reporten presencia de usuarios, reduciendo así los contrastes y deslumbramientos; cumpliendo con un mejor diseño de iluminación interior y prometiendo espacios más confortables.

- 6) Si se dota de medios para introducir manualmente datos a través de un grupo de botones o una aplicación para modificar la programación de forma que el prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, se adapte a las necesidades específicas de los usuarios sin que se altere el algoritmo que reproduce las longitudes de onda armónicas con el reloj biológico a lo largo del día, podrá ofrecerse una iluminación dinámica capaz de ajustarse a la cronobiología humana y a la percepción visual de cada individuo.



Objetivo

El propósito principal de esta investigación es verter los conocimientos actuales sobre los efectos de la luz artificial sobre el reloj biológico para construir un prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, basado en los modelos matemáticos que permiten pronosticar dicho influjo a fin de sincronizar el reloj biológico con el social, de modo que este sistema pueda ser utilizado en espacios de oficina como una fototerapia continua para los ciclos circadianos.

Si bien el tema de los ciclos circadianos lleva más de treinta años en estudio, recientemente se ha popularizado tras el galardón del Nobel en fisiología y medicina 2017 otorgado a Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash, Michael W. Young por sus descubrimientos de mecanismos moleculares que controlan el ritmo circadiano.³⁰

Sin embargo, hace falta desarrollar un verdadero sistema de iluminación circadiana, viable, comercializable,

hecho en México, adaptable y de fácil aceptación y empleo por parte de los usuarios.

De forma similar que los aparatos de iluminación comerciales que se ostentan como “iluminación circadiana” que son actualmente fabricados en el extranjero, este prototipo tendrá la capacidad de regular la intensidad y temperatura de color de las luminarias, además de la integración de sensores de presencia e iluminación ambiental; pero su principal diferencia será la comunicación entre luminarias y una verdadera automatización centralizada basada en los modelos de foto transducción circadiana y las características de la longitud de onda adecuadas para cada hora del día cumpliendo los niveles de iluminación requeridos en la normatividad mexicana.

La intención final es que este prototipo ayude a reducir los trastornos de sueño como el jetlag social y mejorar la productividad de los usuarios. Aportando una alternativa en materia de iluminación comercial para oficinas que ofrezca

³⁰ Sus descubrimientos explican cómo las plantas, los animales y los seres humanos adaptan su ritmo biológico para que se sincronice con las revoluciones de la Tierra (Nobel Media AB, 2017)

beneficios en la salud y la economía de los empleadores y usuarios de este tipo de locales.

También pretende abrir la posibilidad de incorporar los actuales y futuros avances tecnológicos respecto a iluminación, permitiendo adaptar los patrones de luz y oscuridad controlados por el algoritmo desarrollado en esta investigación utilizando fuentes de luz cada día más eficientes, limpias y saludables, así como sensores cada vez más precisos.

Además, este prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables tras la comprobación matemática de sus efectos, intenta abrir una nueva forma de utilizar la iluminación artificial no sólo como complemento a la luz natural sino como parte esencial de nuestro estilo de vida

al brindar una terapia continua contra los padecimientos relacionados a los ciclos circadianos sin ser intrusiva para los usuarios. Lo cual puede dar paso a nuevas investigaciones y comprobación médica y psicológica de sus efectos.

Sinopsis

Finalmente y a manera de sinopsis, esta investigación trata de integrar parte de los conocimientos en torno a la iluminación, los ciclos circadianos y la automatización tal como se muestra en la Figura 1 donde el mapa mental resume la interrelación entre los tres conceptos principales en los que se basa el prototipo dedicando un capítulo a cada uno de ellos y al desarrollo del mismo.



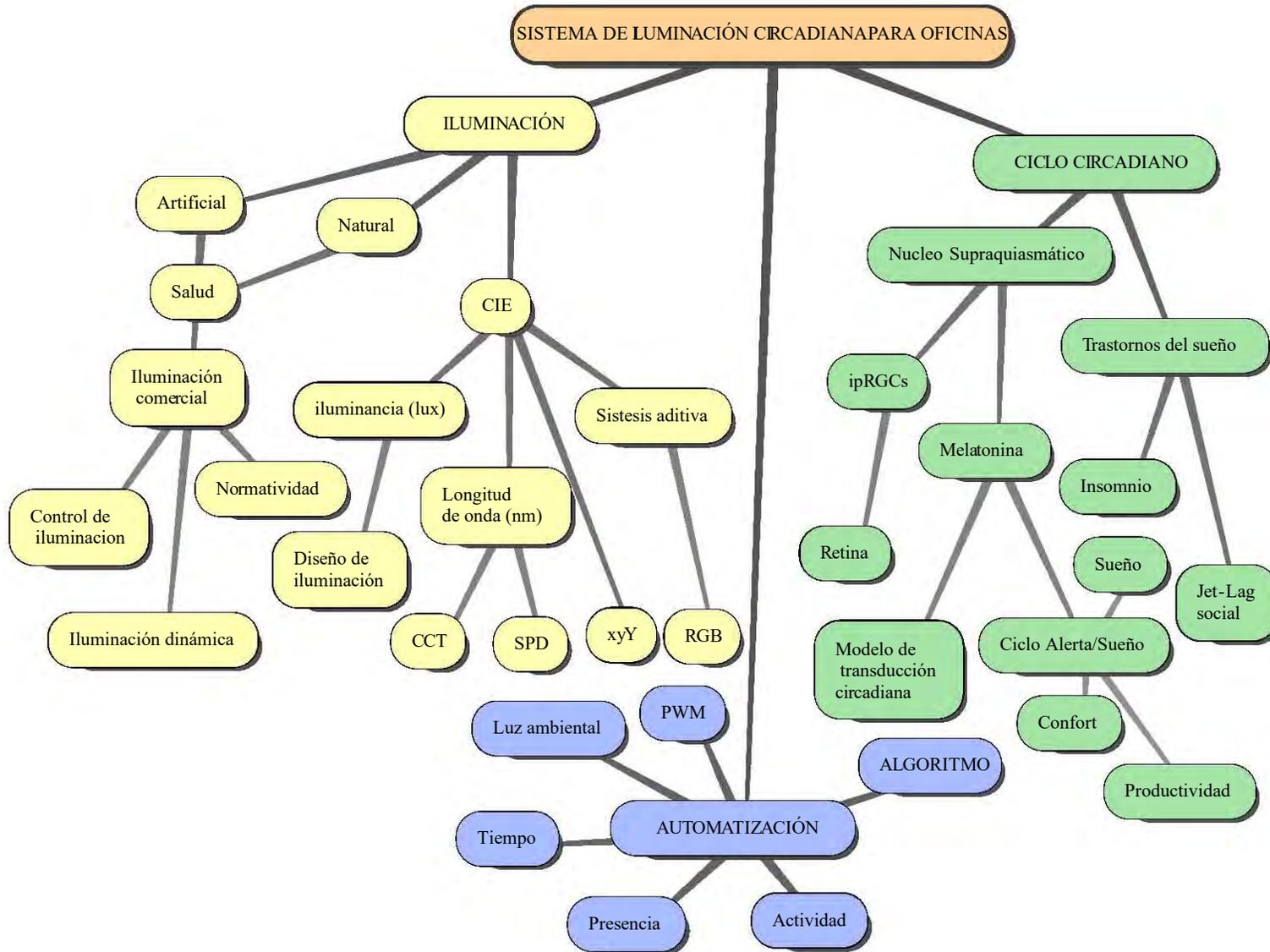


Figura 1 Mapa mental del prototipo. Elaboración propia usando Espresso Mind Map Light (espressoApps, 2017)

I. La importancia de la luz y los sistemas de iluminación en la salud

En el principio, cuando Dios creó los cielos y la tierra, todo era confusión y no había nada en la tierra. Las tinieblas cubrían los abismos mientras el espíritu de Dios aleteaba sobre la superficie de las aguas. Entonces dijo Dios: 'Haya luz', y hubo luz. Dios vio que la luz era buena; y separó la luz de las tinieblas. Dios llamó a la luz "Día" y a las tinieblas "Noche". Atardeció y amaneció: fue el día Primero.
Gen. 1:1-5 (Biblia Latinoamericana)

Mas allá del significado metafórico de la luz respecto al bien y el mal, expresados en este pasaje bíblico; vale la pena subrayar la realidad sobre las bondades de la luz, su importancia en la humanidad y su evidente necesidad para la vida de nuestro planeta.

El sol es sin duda la fuente de luz por excelencia, sin embargo, la iluminación artificial es un complemento indispensable para la actividad humana actual ya sea para alumbrarnos en las noches o para compensar la insuficiente luz durante días nublados o bien para usarse en espacios donde la

orientación o posición dentro de un edificio dificulta la penetración de luz natural.

I.1 Las estrellas como principal fuente de luz natural.

En la naturaleza existen varias fuentes de luz; algunas menos conocidas como las auroras polares que son causadas por chorros de electrones en espiral que ocurren cerca del polo norte (Aurora Boreal) y el polo sur (Aurora Austral) a 100 o 200 Km por encima de la tierra dentro de la atmósfera generalmente vistas como bandas verdosas de luz.



Figura 2 Aurora Boreal (Beverly & Pack, 2011)

La bioluminiscencia es otro ejemplo de fuente luminosa que es producida por procesos químicos, cuyo espécimen más característico es la luciérnaga, aunque otros organismos como bacterias, hongos, insectos, crustáceos, moluscos y peces comparten esta capacidad. La reacción se denomina quimioluminiscencia y permite la emisión de luz sin producir calor, para los organismos que la producen tiene distintas funciones como la defensa, la comunicación, la reproducción y la atracción de presas. (BBC, 2013, p. 1). Su intensidad es muy baja lo cual lo hace poco útil para la actividad humana, aunque sus procesos químicos son estudiados para tratar de imitar su gran eficiencia energética.

Las descargas eléctricas son otra fuente de luz natural que se generan cuando la diferencia de potencial entre una nube y la tierra u otro objeto excede los 2 millones de V/m provocando un arco eléctrico. (Ritenour, Morton, McManus, Barillo, & Cancio, 2008, p. 587) La energía asociada a un rayo es muy alta pero es liberada en pulsos de muy corta duración (en el orden de 10^{-4} a 10^{-5} segundos) y su integral a lo largo de este corto periodo es de 10^9 J que equivale a 360 kilowatt hora lo cual también se ve reflejado en un gran flujo luminoso concentrado en un breve espacio de tiempo y aunque pareciera

mucha energía y una posible fuente de energía limpia aún si se pudiera captar y usar uno de sus pulsos, apenas serviría para el consumo continuo de cinco focos de 100W durante un mes (Rakov & Uman, 2003, p. 12) aunado a la gran inversión que se requeriría para aumentar la probabilidad de captar un rayo y los riesgos asociados, las descargas eléctricas son descartadas como una fuente de luz y energía aprovechable para las tareas humanas en la actualidad.



Figura 3 Relámpagos azules-rojos en la isla Kos, Grecia (Chris Kotsiopoulos, 2013)

Otras fuentes de luz natural tienen como principio la incandescencia, que de acuerdo a Dionysius Lardner es “el estado en que un cuerpo calentado, naturalmente incapaz de emitir luz, se vuelve luminoso” (1833, p. 341) este tipo de emisión lumínica puede verse en la lava de los volcanes, donde la roca expuesta a un calor suficiente emite radiación

electromagnética en el espectro visible a partir de una cierta temperatura. También el fuego es el ejemplo más común de la incandescencia, donde a partir de una reacción química se emite energía calorífica y lumínica, en particular el fuego; aunque puede generarse de forma natural, es común su uso controlado como iluminación artificial.

Existen otras fuentes de luz basadas en la radioactividad donde parte de energía radiante está dentro del espectro visible.

La iluminación natural es luz recibida en la tierra desde el sol ya sea de forma directa o reflejada por la luna, su principal característica es su variabilidad no sólo a lo largo del día y del año, sino que cambia por las condiciones climatológicas y la ubicación geográfica ofreciendo diferentes magnitudes y contenido espectral a lo largo del tiempo.

La luz de día se puede dividir en luz solar directa y luz ambiental difusa, la directa produce sombras bien definidas y al incidir sobre la tierra puede ofrecer una iluminancia desde 1000 lux hasta 150 000 lux a diferencia de la luz ambiental difusa la cual proviene de la bóveda celeste donde la luz solar se dispersa y llega a tierra produciendo una iluminación más uniforme y sombras poco definidas. El balance entre la luz

directa y la ambiental está determinado por la naturaleza de la atmosfera y la cantidad de vapor de agua contenida. (Boyce, 2014, p. 28)

La luz natural es considerada una característica especial en muchos edificios, en especial en latitudes donde la luz de día es limitada en algunas estaciones del año, además de que su exigencia siempre está incluida en los códigos que rigen el diseño de edificación sin importar el clima o región.

Esta requiere ser complementada por fuentes de luz artificial esto debido a su variabilidad y ausencia durante la noche, además de otras condiciones espaciales de los edificios que en ocasiones imposibilitan la disponibilidad de luz solar directa en alguna de las fachadas ya sea por orientación o por que algún otro edificio más alto o muy próximo proyecta su sombra directamente sobre otro recibiendo únicamente luz ambiental difusa.

I.2 Iluminación artificial basada en la naturaleza.

De acuerdo con la Real Academia de la lengua española, la palabra artificial del latín *Artificiālis*, significa “producido por el ingenio humano”, que en el caso de la iluminación como en otras áreas, están inspiradas o son replicadas de la naturaleza.



La primera iluminación artificial conocida por el hombre fue el fuego, creado a partir de la combustión de la madera, con el tiempo los desarrollos en tecnologías básicas llevaron a la creación de la lámpara de aceite, la vela y la lámpara de gas y aunque aún existen han caído en desuso por tres razones: peligro de incendio, contaminación del aire en espacios confinados y por su baja eficiencia lumínica inferior a 1 lumen por watt. (Boyce, 2014, p. 30)

Gracias a la electricidad, la industria de la iluminación ofrece hoy muchos tipos de lámparas eléctricas cada una con diferentes características y eficiencias lumínicas las cuales se pueden resumir en la Figura 4, donde se observa que algunas aprovechan la incandescencia para generar energía lumínica a partir de calentar un filamento, aunque son poco eficientes por la gran cantidad de energía desperdiciada en calor como las lámparas halógenas que siguen siendo muy comunes por su bajo costo. Las lámparas electroluminiscentes de descarga se clasifican según el gas utilizado (vapor de mercurio o sodio) y la presión a la que se encuentre, siendo las más comunes las lámparas fluorescentes llamadas “ahorradoras”.

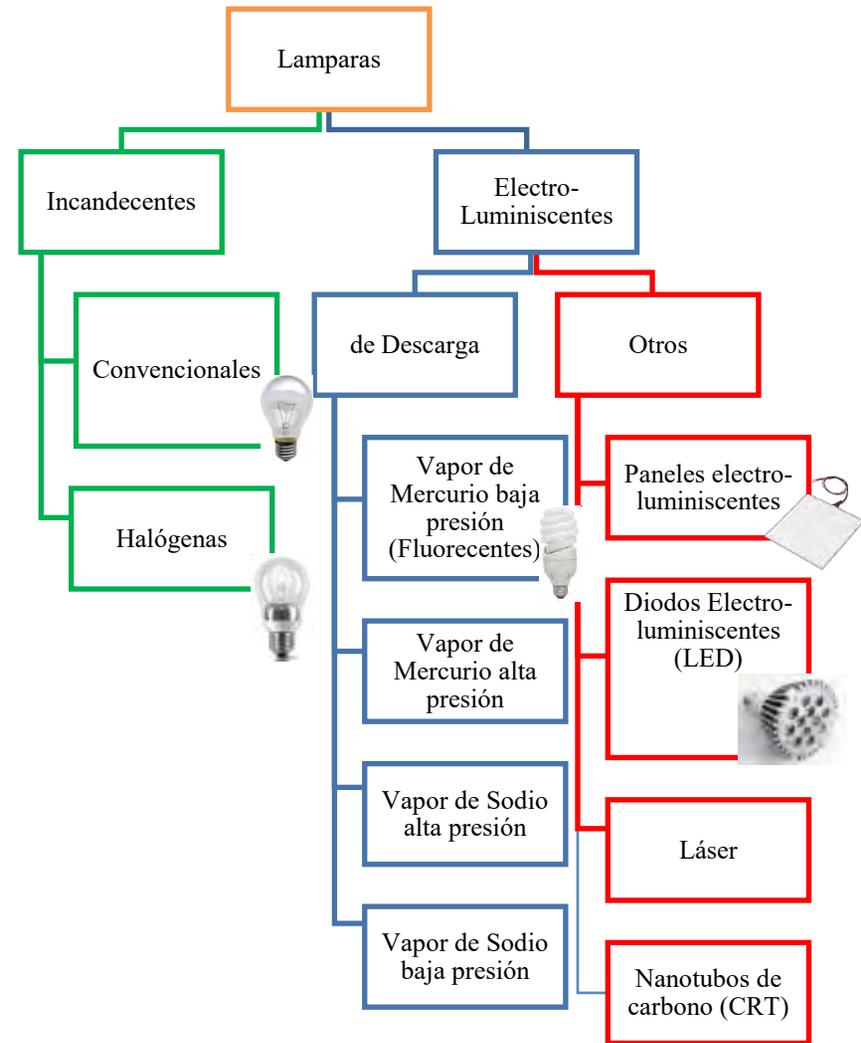


Figura 4 Tipos de lámparas eléctricas (elaboración propia)

Por último, como parte de las lámparas electroluminiscentes están los diodos emisores de luz (led por sus siglas en inglés) con una gran eficiencia energética y larga duración, pero su costo aún es elevado en comparación al resto.

Aunque los ledes existen comercialmente desde 1962 con la invención del led infrarrojo usado para comunicación inalámbrica a corta distancia tal como los conocemos en controles remotos actuales y más adelante se comercializaron en color rojo y verde, principalmente para señalización, no fue hasta 1994 que se desarrolló el led azul con una intensidad suficiente para ser comercializado y por el que se otorgó el Premio Nobel de Física en 2014 conjuntamente a Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura "por la invención

de eficientes diodos emisores de luz azul que ha permitido fuentes de luz blanca brillantes y de ahorro de energía".³¹

La adopción de los ledes en el mercado mexicano ha sido menor en comparación con otros países, pero la disminución de costos y la gran producción de estas fuentes de luz en países asiáticos han popularizado su utilización en nuestro país teniendo que en 2009 las lámparas led representaron sólo el 4 por ciento de las ventas globales de iluminación y para 2013 aumentó al 15 por ciento (Axel Sánchez, 2014) lo que alienta un panorama optimista donde para el 2020 esta tecnología podría alcanzar el 70 por ciento del mercado nacional.

Los avances más recientes en cuanto lámparas eléctricas utilizan tubos de rayos catódicos como los de las televisiones antiguas pero empleando nanotubos de carbono³²

³¹ El primer reporte de emisión de luz a partir de un semiconductor fue de Henry Round en Marconi Labs en 1907, a quien junto con el ruso Oleg Losev que en 1927 publicó sus descubrimientos, se les atribuye la invención del led. Hoy día encontramos distintos colores de ledes dependiendo de su composición química y cada uno ha tenido su propio inventor; sin embargo, el premio Nobel reconoce sólo el desarrollo del led azul pues su incorporación permitió el auge y eficiencia de la luz blanca que encontramos instalada en muchos espacios en la actualidad. (Nobel Media AB, 2014)

³² Los nanotubos de carbono (NTC) están compuestos por láminas de grafeno enrollado en cilindros huecos sin costura con diámetros que van desde 1 nm hasta 50 nm aproximadamente, existen dos tipos: Nanotubos de pared múltiple y de pared simple. Su capacidad de emitir electrones con muy poca corriente a altos voltajes les permite integrarlos a distintos desarrollos para generar nuevas formas de iluminación artificial como son los tubos de rayos catódicos (CRT) y pantallas de fluorescencia al vacío (VFD). Los primeros experimentos han demostrado estabilidad, alta eficiencia energética y bajo costo, con lo que su aplicación parece viable en un futuro cercano. (Saito & Uemura, 2000, p. 177)



como cátodo y una pantalla de fósforo como ánodo, permitiendo una eficiencia lumínica mayor que la de los ledes aunque su desarrollo aún no llega a una fase comercial, es probable que algún día puedan llegar a ser una fuente de iluminación artificial común y el desarrollo de esta investigación pueda ser adaptado para aprovechar esta nueva tecnología.

A pesar de la eficiencia energética y bajo mantenimiento que ofrecen los ledes o los futura incursión en nanotubos de carbono como fuente de luz artificial, la realidad es que nuestro mercado opera a un ritmo más lento que otros, inicialmente por temas comerciales como el costo y disponibilidad de nuevas tecnologías, además añade que la actualización tecnológica en muchos casos implica cambios en la infraestructura eléctrica de los edificios y esperar a consumir las existencias de luminarias obsoletas; tal como ocurrió con los focos incandescentes donde a pesar de la prohibición comercial a partir de 2014 y múltiples campañas de sustitución, aún es posible encontrar este tipo de luminarias para uso doméstico, por lo que resulta acertado mirar por el momento a los ledes como una tecnología viable para el

desarrollo de esta investigación la cual puede sumarse al auge que muestra este tipo de iluminación.

Antes de hacer una comparativa entre las características de las distintas fuentes de luz, es importante describir sus características para poder ponderar y evaluar cada una de ellas.

I.3 La luz, como la percibimos y como se estandarizan sus características.

La luz, de acuerdo con la física, es parte del espectro electromagnético que se extiende desde los rayos cósmicos con longitudes de onda diminutas hasta las ondas de radio con longitudes de onda que se miden en kilómetros, tal y como está esquematizado en la Figura 6.

La luz puede ser percibida a través de la piel ya sea en forma de calor o bien mediante la fotosíntesis cutánea que produce vitamina D a partir de los rayos ultravioleta B que oscila entre los 290 y 320 nm. O mediante el sistema visual de los humanos que está conformado por el ojo, cuyas estructuras

internas filtran y permiten el paso de la luz hasta la retina donde distintos fotorreceptores, conocidos como conos y bastones por su forma, transforman las diferentes longitudes de onda de la luz en impulsos nerviosos.

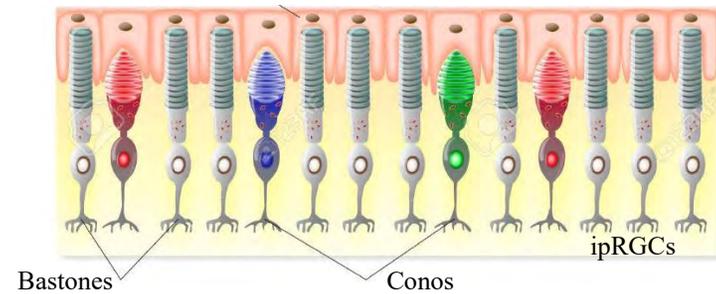


Figura 5 Estructura de la retina (123RF Limited, 2017)



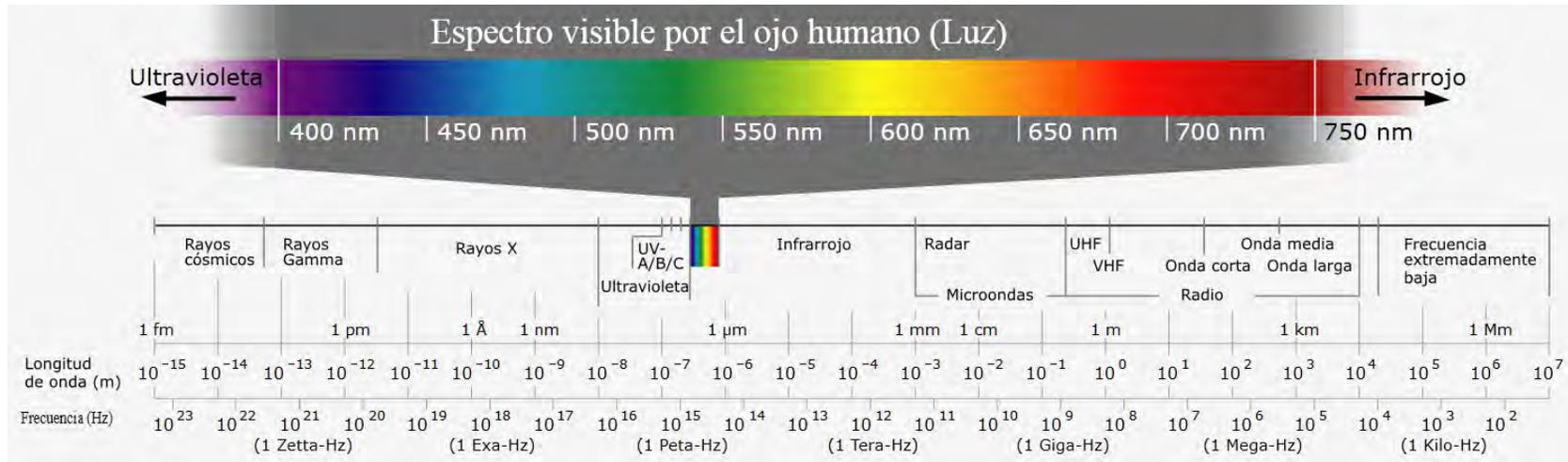


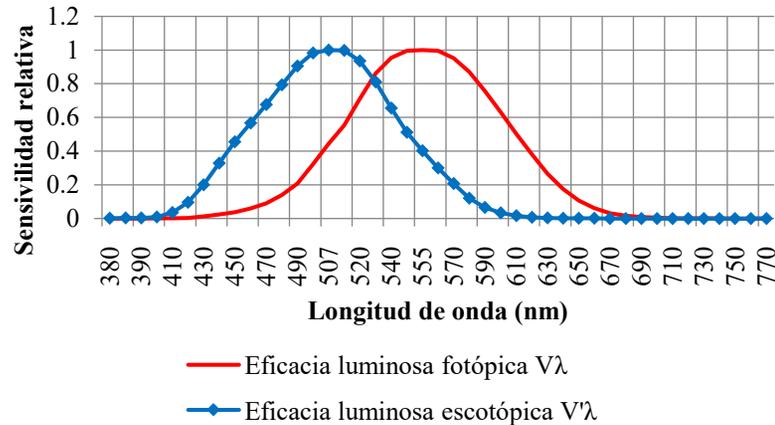
Figura 6 Espectro electromagnético (Horst Frank, 2006)

La luz por sí misma no puede ser vista de forma directa, sino que debe ser reflejada o transmitida, recibida por el ojo e interpretada como una imagen visual en el cerebro.

Dentro del espectro existe una región comprendida entre los 380 y los 780 nm que es el rango al que responde la visión humana y aunque la sensibilidad a cada longitud de onda puede variar dependiendo la edad o el estado de salud del observador, se ha estandarizado por la *Comisión Internacional d'Eclairage* (CIE) para homogenizar los cálculos y especificaciones de la iluminación. Con esta homologación tenemos lo que se conoce como curva de sensibilidad espectral cuyo máximo valor en estado fotópico (visión de día)

corresponde a los 555 nm y para el estado escotópico (visión nocturna) es de 507 nm tal como se muestra en la Gráfica 4.

Las ondas electromagnéticas poseen una energía que se propaga por el vacío por medio de fotones, es llamada **energía radiante** (Q) y su unidad de medida es el Joule (J) la cual depende de la longitud de onda y la fuente. La mejor manera de medir la radiación electromagnética de una fuente es mediante su **flujo radiante** (Φ_{rad}) que es la cantidad de energía radiante emitida por unidad de tiempo cuya unidad de media es el watt (W) que equivale a un joule por segundo (1J/s) siendo ampliamente utilizada en todo tipo de ondas incluyendo las de radio.



Gráfica 4 Curvas de sensibilidad espectral para el observador CIE (Elaboración propia a partir de datos de CIE 1970 y 1978)

Para el caso de la luz visible es más común medir el **flujo luminoso** (Φ) que es la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo multiplicada por la sensibilidad espectral e integrada sobre el rango de longitudes de onda de nuestro espectro visible, este flujo se mide en lúmenes (lm). Para esto la CIE estandarizó que una fuente monocromática a 555 nm tiene un flujo radiante de 1 watt de potencia emitida por un cuerpo negro le corresponde un flujo luminoso 683 lm, a esta relación se le conoce como equivalente luminoso de la energía (K_λ).

Debido a que la sensibilidad relativa del observador cambia por cada longitud de onda, se puede calcular la eficacia

espectral luminosa para las fuentes de luz distintas a los 555nm con la ecuación:

$$K_\lambda = K_m V_\lambda$$

Ecuación 1 Eficacia espectral luminosa

O bien calcularla para todo el espectro visible usando:

$$\Phi = K_m \int_{380}^{760} V_\lambda \Phi_{rad} d\lambda$$

Ecuación 2 Flujo luminoso

Donde $\Phi_{rad} d\lambda$ es el flujo radiante de un pequeño intervalo de longitud de onda $d\lambda$ medido en watt, y Φ es el flujo luminoso expresado en lúmenes. El valor de V_λ depende de la curva de sensibilidad espectral y K_m es una constante que equivale a 683 lm/W para estado fotópico y 1699 lm/W para el estado escotópico; el flujo luminoso representa la cantidad total de luz emitida por una fuente luminosa en todas las direcciones.

En la práctica es más útil cuantificar la **intensidad luminosa** (I) que es el flujo luminoso emitido en un pequeño cono que contiene una dirección dada dividido por el ángulo sólido del cono, su unidad de medición es la candela (cd) y es equivalente a un lumen/estereorradián y se expresa con la ecuación:



$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Ecuación 3 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa permanece a pesar de la distancia y una sola fuente de luz puede tener distintas intensidades luminosas para cada dirección, como se observa en la Figura 7.

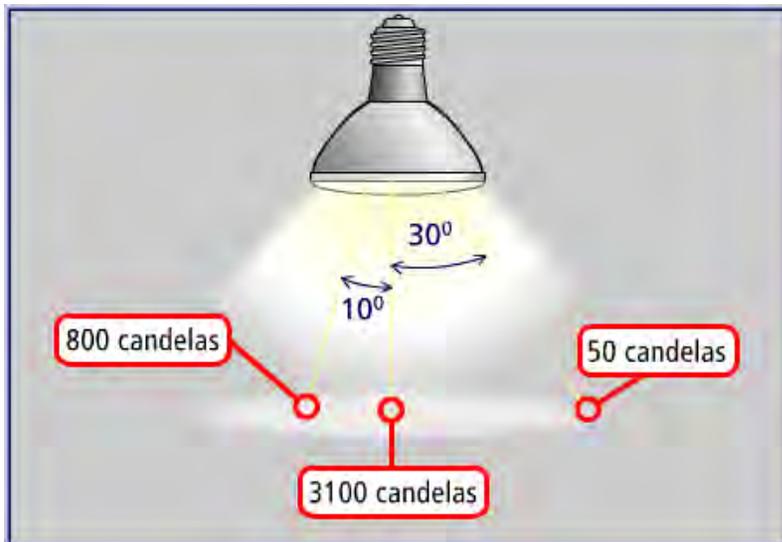


Figura 7 Intensidad luminosa, (Lighting Research Center, RPI, 2009)

Si sumamos todas las intensidades luminosas de una luminaria podemos calcular el flujo luminoso, siendo que, si se tiene una fuente de luz con una intensidad constante de 1cd en todas las direcciones y visualizamos una esfera de un metro de radio, la cantidad total de luz proyectada en un ángulo sólido sobre la superficie proyectada en la esfera que es de 1m^2 (estereorradián) equivaldría a un flujo luminoso de 1lm como se muestra en la Figura 8.

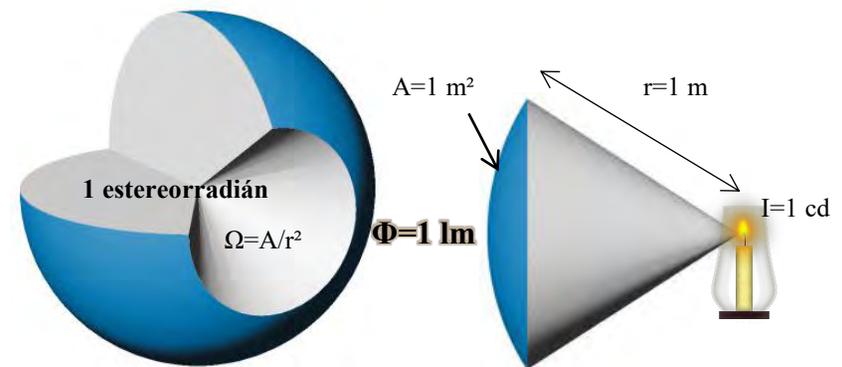


Figura 8 Estereorradián y Lumen. Elaboración propia a partir de (Ryer, 1997, p. 29) y (Taylor, 2000, p. 19)

La luz también puede cuantificarse por su potencia incidente por unidad de superficie lo cual se conoce como **irradiancia** y se mide en W/m^2 que puede contener radiación

electromagnética de distintas longitudes de onda de forma simultánea.³³

Debido a la relación directa entre watt y lumen por las constantes definidas por la CIE, a partir de la irradiancia se deriva una magnitud fotométrica que es fundamental en el diseño de iluminación y en la normatividad, se trata de la **iluminancia** (E) que es la medida del flujo luminoso por unidad de área y ya sea que se mida en lux (lm/m²) para el Sistema Internacional de Medidas o en pie-candela (lm/pie²) para el sistema inglés.

La iluminancia es afectada por la distancia y el ángulo de inclinación entre la fuente luminosa y la superficie que recibe la luz por la ley inversa del cuadrado, aunque normalmente se considera una medición perpendicular omitiendo el ángulo, su ecuación es la siguiente:

$$E = \left(\frac{\Phi}{d^2}\right) \cos\theta$$

Ecuación 4 iluminancia o Ley inversa del cuadrado

Se observa en la Figura 9 que al conservar el ángulo sólido de un estereorradián cuando se aumenta la distancia, la

superficie aumenta al cuadrado y por tanto la cantidad de luz es distribuida en un área mayor reduciendo la iluminancia, cabe mencionar que también funciona al reducir la distancia con lo que se obtiene una mayor iluminancia al acercarnos a la fuente.

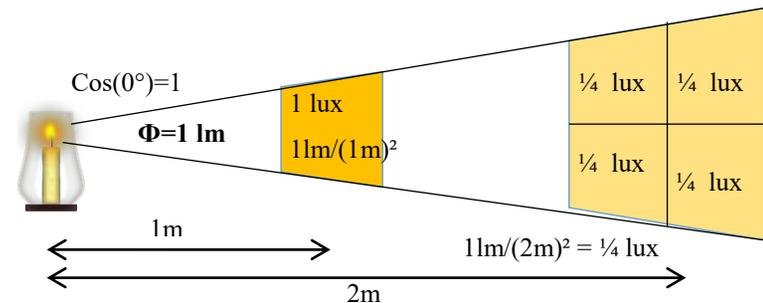


Figura 9 Ley inversa del cuadrado. Elaboración propia

La iluminancia es aditiva, lo que significa que puede incrementarse añadiendo más luminarias, siendo que los lux totales en un punto son la suma de las iluminancias recibidas por todas las fuentes de luz que alcanzan dicho punto como se muestra en la Figura 10.

³³ La relación de la irradiancia espectral es de un watt por centímetro cuadrado (W/cm²) a 555 nm que se encuentra en el medio de la curva de eficacia luminosa fotópica; con este valor se realiza es la unidad

del sistema internacional derivada de iluminancia y emitancia luminosa, que mide el flujo luminoso por unidad de área y equivale a 6,830,000 lux.

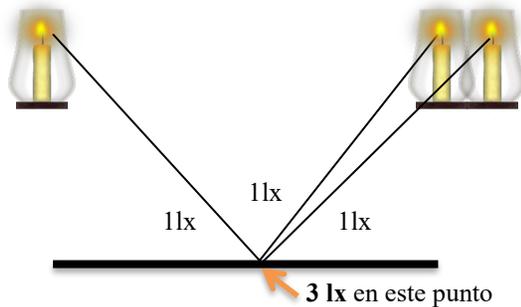


Figura 10 iluminancia aditiva. Elaboración propia

Otra magnitud fotométrica donde en lugar de lo más relevante es la dirección del observador, es la **luminancia** (L) que es la intensidad luminosa emitida o reflejada por una superficie, en la dirección de un observador y su unidad de medida es la candela por metro cuadrado (cd/m^2).

La luminancia en la dirección del observador y se calcula mediante la ecuación:

$$L_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{A \cos \alpha}$$

Ecuación 5 Luminancia

Esta medida es usada comúnmente para especificar el brillo de pantallas con un estándar de $120 \text{ cd}/\text{m}^2$ para la mayoría de los monitores de trabajo y hasta $1500 \text{ cd}/\text{m}^2$ para televisiones de alta definición donde realmente se omite el ángulo al considerar la pantalla como una “superficie difusora

perfecta”. En la arquitectura o el diseño de iluminación es importante su consideración en las superficies de los espacios tanto en mobiliario como en muros y plafones para evitar contrastes y deslumbramientos. Prácticamente todas las superficies tienen una luminancia la cual dependerá de las fuentes de iluminación, los materiales y el ángulo de observación.

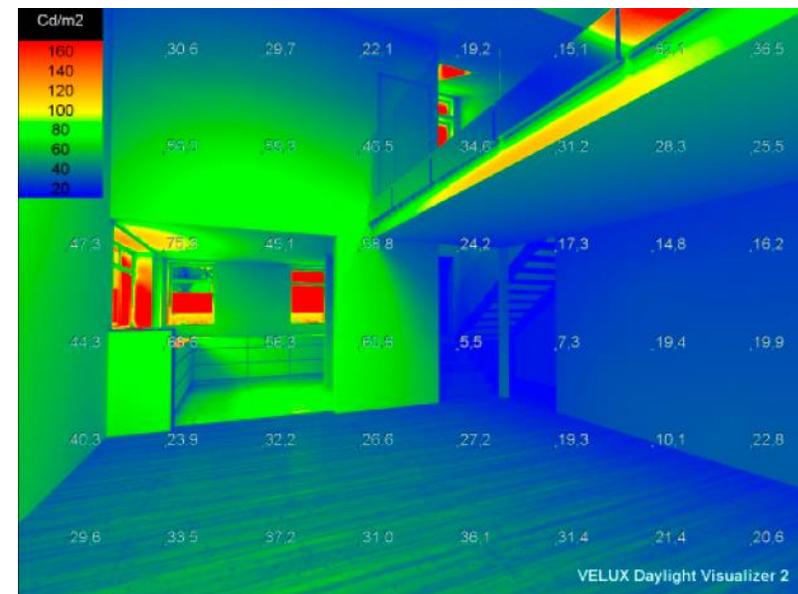


Figura 11 Representaciones de luminancia de Maison Air et Lumière, (VELUX Group, 2013)

En general las magnitudes mencionadas se refieren a luces monocromáticas, o bien a su integración mediante la

ecuación del flujo luminoso, pero es importante conocer la percepción de las distintas longitudes de onda en lo que llamamos color.

I.3.1 La distribución de potencia espectral define la huella digital de la luz.

La distribución de potencia espectral (SPD) de acuerdo a la Sociedad de Ingeniería en Iluminación de Norteamérica (IESNA), ambas abreviaciones por sus siglas en inglés, se define como la representación gráfica de la potencia radiante emitida por una fuente de luz para cada longitud de onda dentro del espectro visible y con dicha curva es posible saber qué colores lucirán mejor bajo dicha fuente de luz o bien saber el color que la luz tendrá al reflejarse o difundirse sobre una superficie blanca.

Un ejemplo de una curva SPD que irradia energía en todas las longitudes de onda del espectro visible es la luz del sol a medio día, que se ha estandarizado como CIE D65 y es usada para calibrar el color blanco en muchos monitores, cuyo espectro tiene su pico de irradiancia en los 460 nm como se muestra en la Figura 12 y su combinación de longitudes de onda (incluyendo en esta representación en color negro, longitudes de onda fuera del rango de la visión humana) le

permite ser percibida como luz blanca a pesar de contener todos los colores, esto debido a que en el ojo humano existen fotorreceptores en la retina que responden a diferentes longitudes de onda, los cuales al ser estimulados por la energía lumínica emiten impulsos nerviosos que se traducen en los colores primarios rojo, verde y azul que al sumarse forman el blanco.

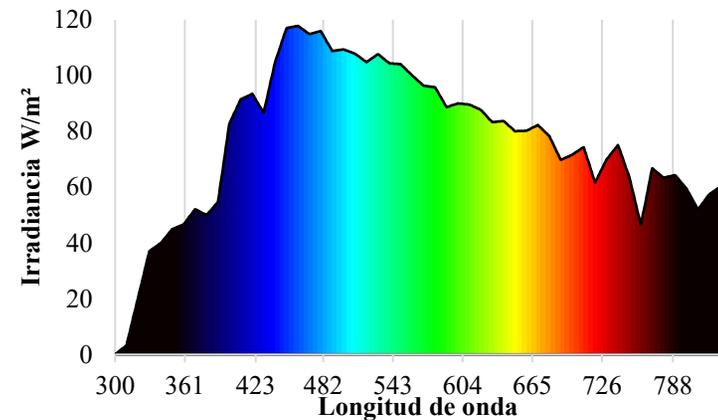


Figura 12 SPD de la luz natural de acuerdo al estándar CIE D65.
Elaboración propia a partir de (Quantotec, 2016)

La combinación de estos estímulos da origen a la característica de la luz llamada Síntesis Aditiva, que no es otra cosa más que la propiedad de las longitudes de onda para sumarse conformando una sola curva de distribución espectral,

por ejemplo, sumando los tres colores primarios se obtiene una SPD equivalente al color blanco.

I.3.2 Las longitudes de onda siempre se suman.

En la síntesis aditiva distintas luces de colores con sus respectivas curvas SDP la irradiancia se suma por cada longitud de onda obtenido un nuevo valor de irradiancia, el cual puede ser interpretado por el ojo como otro color o bien por el mismo color, pero más brillante.

La Figura 13 ejemplifica este fenómeno donde podemos ver: (a) luz azul, (b) luz verde y (c) luz roja; en (d) la mezcla aditiva de verde y rojo dando amarillo, (e) mezcla aditiva de azul y verde, dando cian, (f) mezcla aditiva de rojo y azul, dando magenta; por último en (g) la mezcla aditiva azul, verde y rojo, obteniendo el blanco.

En las curvas espectrales podemos ver que una fuente de luz tiene un pico el cual se asocia con el color percibido; sin embargo, al considerar las curvas de sensibilidad contra las SDP de una fuente de luz podemos conocer que tan brillante es esta luz, siendo los tonos cercanos al verde (507 y 555 nm) los que parecen más brillantes pues con menos irradiancia estimulan mejor a los bastones y los conos de la retina.

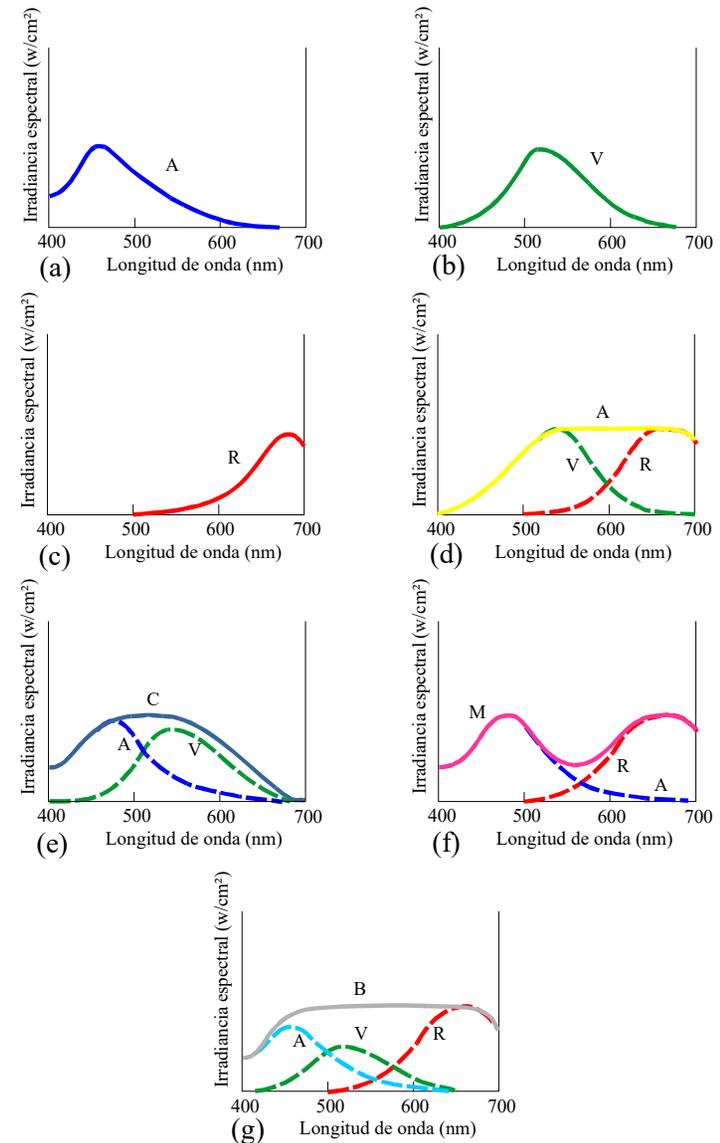


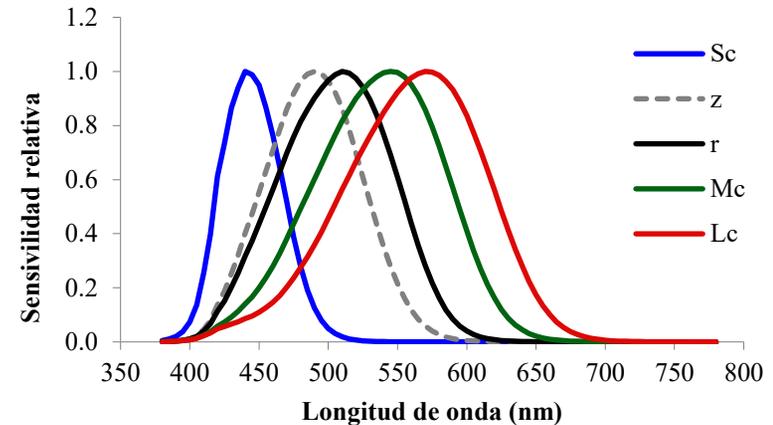
Figura 13 Síntesis aditiva (Colombo & O'Donell, 2006, p. 10)

En la Gráfica 4 se mostró la sensibilidad a los colores en general y a la visión nocturna, sin embargo, es importante conocer que cada uno de los fotorreceptores de la retina tienen foto pigmentos que se decoloran al ser excitados por la luz y se re-coloran al estar en reposo, los cuales se resumen en la Tabla 1 indicando que el pigmento en los bastones se llama (r) rodopsina, mientras que los conos tienen tres diferentes: (L) eritrolabe: sensible al color rojo, (M) clorolabe, sensible al color verde y, (S) cianolabe, sensible al color azul.³⁴ Existe un quinto foto pigmento llamado (z) melanopsina para los efectos no visuales que se encuentra en las células ganglionares retinales intrínsecamente foto sensibles.

Simbología	Foto pigmento	Fotorreceptor	λ Pico
Sc	Cianolabe	Cono S	419.0
z	Melanopsina	ipRGCs	480.0
r	Rodopsina	Bastón	496.3
Mc	Clorolabe	Cono M	530.8
Lc	Eritrolabe	Cono L	558.4

Tabla 1 longitud de onda pico de los foto pigmentos. Elaboración propia a partir de (Lucas et al., 2013, p. 7)

³⁴ La mayoría de las personas contamos con tres tipos de conos llamados L, M y S (por las siglas en inglés de las longitudes de onda que captan para Short, Medium and Long) para la percepción de color y distinguimos alrededor de un millón de tonos; sin embargo, existe una condición llamada “tetracromatismo” presente en el 1% de las mujeres que



Gráfica 5 Curvas de sensibilidad estándar. Elaboración propia a partir de datos de Irradiance Toolbox (Price et al., 2014, p. 19)

En la última columna de la tabla se muestra la longitud de onda pico de cada curva de respuesta espectral que se representan en la Gráfica 5 para cada fotorreceptor.

Para estandarizar y utilizar esta información con fines prácticos; la CIE definió lo que llamamos espacios de color que a partir de sistemas de coordenadas se puede estandarizar el color que la mayoría de las personas percibimos a partir de las relaciones matemáticas entre la sensibilidad de los conos a

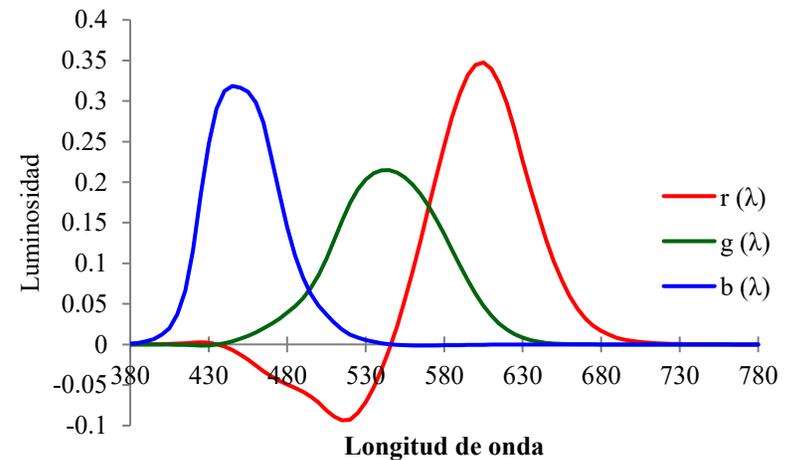
debido a una mutación genética tienen una cuarta variedad de cono cuya sensibilidad se encuentra entre el verde y el rojo (M-L), permitiéndoles la posibilidad de distinguir cientos de millones de colores. (McCrone, 2002, p. 136)

cada longitud de onda y su equivalencia al sistema Rojo, Verde y Azul de los colores primarios de la luz (RGB por sus siglas en inglés).

En 1931 los científicos W. D. Wright y J. Guild, realizaron experimentos para tratar de caracterizar la respuesta del ojo humano, cada uno por su cuenta utilizó una pequeña pantalla donde la mitad se iluminaba con el "color de prueba" conociendo su longitud de onda, mientras que la otra mitad se iluminó con luz compuesta de tres colores primarios con longitudes de onda de 700 nm, 546.1 nm, y 435.8 nm para el rojo, verde y azul respectivamente,³⁵ la luminosidad de dichas lamparas era ajustada por los observadores hasta igualar la percepción de ambas partes de la pantalla.

En algunos casos resultaba imposible la igualación por lo que tuvieron que recurrir a modificar el "color de prueba" añadiendo luz de algunos de los primarios a la mitad de referencia, registrando dichos valores como negativos, estas observaciones se resumen en las curvas de funciones de coincidencia de color mostradas en la Gráfica 6 que aunque

parece no tener una relación directa con las curvas de sensibilidad de los conos, pues en realidad muestran la relación matemática de estos colores primarios para entender la percepción del color.



Gráfica 6 funciones de coincidencia de color CIE RGB 1931. Elaboración propia a partir de (Marcelo Gattass, 2016)

Tras esta primera aproximación y las dificultades para igualar algunas longitudes de onda con estos colores, la CIE continuó estudiando hasta encontrar los primarios 650 nm rojo, 530 nm verde y 460 nm azul con los que se requerían menos

³⁵ Se utilizaron estas longitudes de onda como primarios por su facilidad de ser generados con precisión usando lamparas de vapor de mercurio de la época, en el caso de los 700 nm no era posible generarse con tanta precisión, pero por la baja respuesta espectral de dicha longitud de

onda se utilizó para completar el experimento y obtener una relación matemática de la síntesis aditiva en diez y siete personas, lo cual formó el precedente de las funciones de coincidencia de color de la CIE 1931. (Kerr, 2010, p. 6)

valores negativos en las combinaciones para equiparar las luces monocromáticas de referencia y aunque no se pueden igualar todos los colores espectrales, representan la mejor elección de primarios para fines prácticos incluso en nuestros días, pues la mayoría de los colores de la naturaleza son no saturados y las mezclas logradas se ajustan a la percepción humana estándar.

I.3.3 Caracterización de las fuentes de luz y sus colores.

Para estandarizar y poder utilizar estas combinaciones la CIE continuó trabajando con estas ideas hasta desarrollar un sistema de color basado en tres “colores imaginarios” los cuales no pueden reproducirse físicamente sino de forma matemática y son llamados “valores triestímulos”, que se representan como \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} ; los cuales permiten igualar cualquier color sin tener que recurrir a porcentajes negativos obteniendo nuevas funciones de igualación que se muestran en la Gráfica 7.

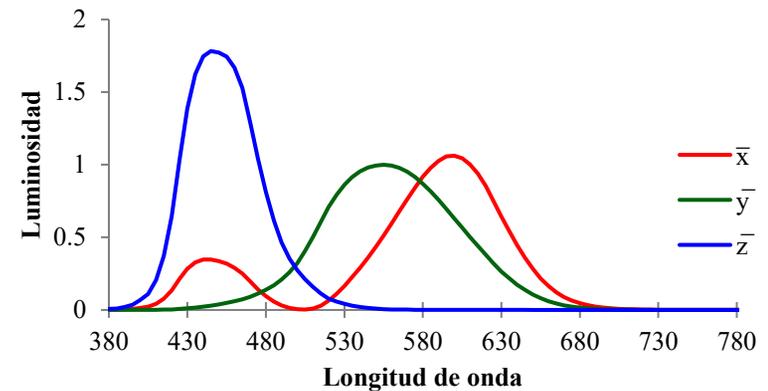
A partir de la distribución espectral $P(\lambda)$ de una fuente de luz se puede obtener los valores X, Y, Z; del espacio de color CIE XYZ mediante las funciones en la Ecuación 6.

$$X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

Ecuación 6 XYZ a partir de datos espectrales (caso emisor)



Gráfica 7 CIE (1931) Funciones de igualación de color del observador estándar 2°. Elaboración propia a partir de (Marcelo Gattass, 2016)

Estos valores pueden representarse gráficamente como coordenadas en el “espacio de color CIE XYZ” que se representa en la parte derecha de la Figura 14, donde en el punto 0 convergen los tres ejes y corresponde al negro o ausencia de luz.



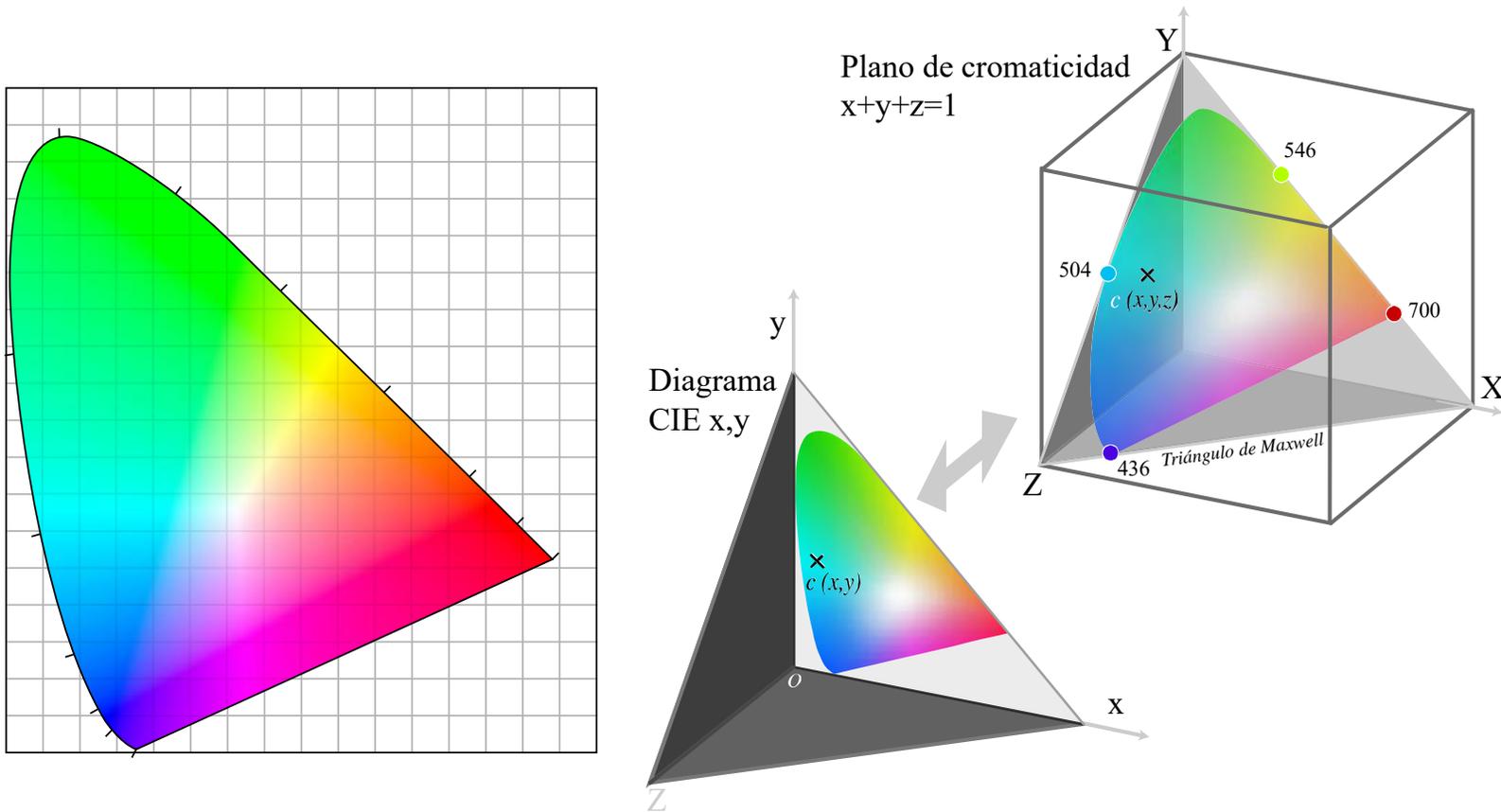


Figura 14 Diagrama de cromaticidad CIE 1931, 2° y Espacio CIE XYZ, (Sakurambo, 2007) y adaptación de (Daniel Metz, 2001)

Dentro de este espacio de color existe un plano denominado triángulo de Maxwell definido en 1860 como un triángulo equilátero, donde la suma de cualquier punto sobre el llamado “plano de cromaticidad” es siempre la unidad.

Con los valores calculados usando la Ecuación 6, se usa Y para normalizar o escalar a 1 las tres coordenadas X,Y,Z, toda vez que Y representa el 82% de la luminosidad. Para obtener x,y,z se vuelve a normalizar, dividiendo entre la suma de X,Y,Z; donde x,y representan las coordenadas sobre el

diagrama de cromaticidad CIE 1931 del observador estándar a 2° mostrado en la parte izquierda de la Figura 14 cuya curva con las longitudes de onda visible envuelve todos los colores perceptibles por el humano y puede ser usada de forma inversa para conocer las coordenadas XYZ a partir de x,y.

Este sistema aparte de servir para categorizar colores también permite identificar dentro de este diagrama la temperatura de color correlacionada (CCT) que de acuerdo con la definición del IESNA significa: la temperatura absoluta de un cuerpo negro cuya cromaticidad se aproxima a su equivalente fuente de luz.

La CCT puede ejemplificarse con el hierro fundido que al aumentar su temperatura pasara de un rojo encendido hasta un blanco al aumentar su temperatura en kelvin.

Dentro del diagrama de cromaticidad CIE se marca una curva denominada Planckian locus, que muestra la aproximación con la hipótesis del cuerpo negro de Plank como se muestra en la Figura 15 donde se muestran las coordenadas de distintas fuentes de luz estandarizadas como el “iluminante A” que equivale a una lámpara de filamento de tungsteno con una temperatura de color de 2856 K y el “iluminante CIE D65” que representa la luz solar a medio día en Europa con una

temperatura de color de 6504 K y cuyas coordenadas son $x=0.3127$, $y=0.329$. Este último estándar será el usado como referencia para el color blanco del prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, toda vez que se trata de emular la iluminación natural con estas características espectrales.

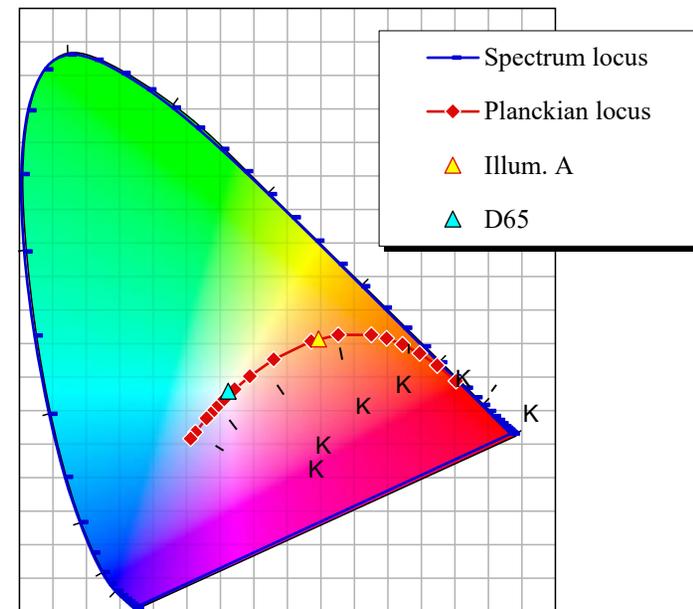


Figura 15 Plankian locus dentro del diagrama de cromaticidad CIE 1931, (Davis & Ohno, 2005) y (Sakurambo, 2007)

Para ejemplificar un poco más la estandarización de luminarias mediante el Plankian locus, en la Figura 16 se muestran las diferencias en color de tres tipos de lámparas probadas en condiciones equivalentes mostrando los cambios en la percepción de una misma escena siendo: a) led luz cálida 2700 K, b) Lámpara Fluorescente 3000 K y c) led luz fría 5000 K.

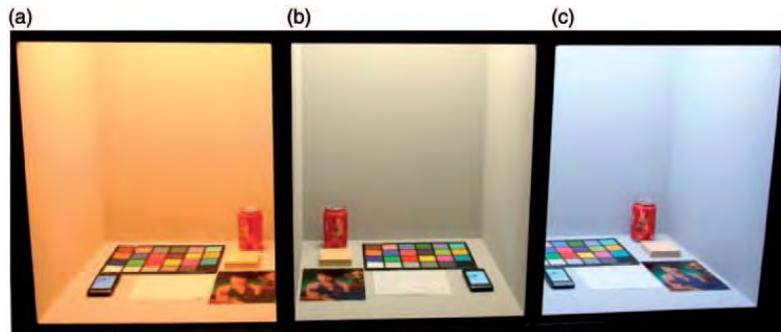


Figura 16 Color de acuerdo al tipo de luminaria, (Atkinson & Pando Orellana, 1993)

I.3.4 Aprovechamiento de las características de la luz.

Si se desea trasladar estas características a un sistema de emulación de color, el primer paso es traducir las coordenadas x , y de los iluminantes que se deseen reproducir

y convertirlos al espacio de color XYZ que es la base de todos espacios de color y traducirlos a un nuevo espacio que sea compatible con la automatización, como lo es el espacio de color RGB;³⁶ que, al igual que la mayoría de los monitores actuales, utilizan sus coordenadas para controlar las tres fuentes de luz primarias con los que están compuestos; dicha conversión se realiza mediante la multiplicación por la matriz de transformación como se expresa en la Ecuación 7.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.00000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0.041844 & -0.15866 & -0.08283 \\ -0.09117 & 0.25242 & 0.01570 \\ 0.00092 & -0.00255 & 0.17858 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Ecuación 7 Transformación del espacio de color XYZ a RGB

³⁶ Ecuaciones basadas en el artículo de Chih-Hsuan Tsuei (2011, p. 241) en el que simulan la temperatura de color de la luz natural utilizando luminarias led en un cuarto sin ventanas con la intención de brindar un

entorno que “parezca” natural sin considerar la regulación del reloj biológico.

I.4 La iluminación como un factor para la salud.

El sol fue la primera fuente de luz conocida por el hombre y los beneficios o padecimientos provocados por la poca o excesiva exposición luz solar son tan sabidos en la actualidad como el uso de bloqueadores solares para prevenir el cáncer de piel o el dar baños de sol a recién nacidos para favorecer el desarrollo de sus huesos y la absorción de vitamina D que es un proceso de fotosíntesis humana el cual se esquematiza en la Figura 17.

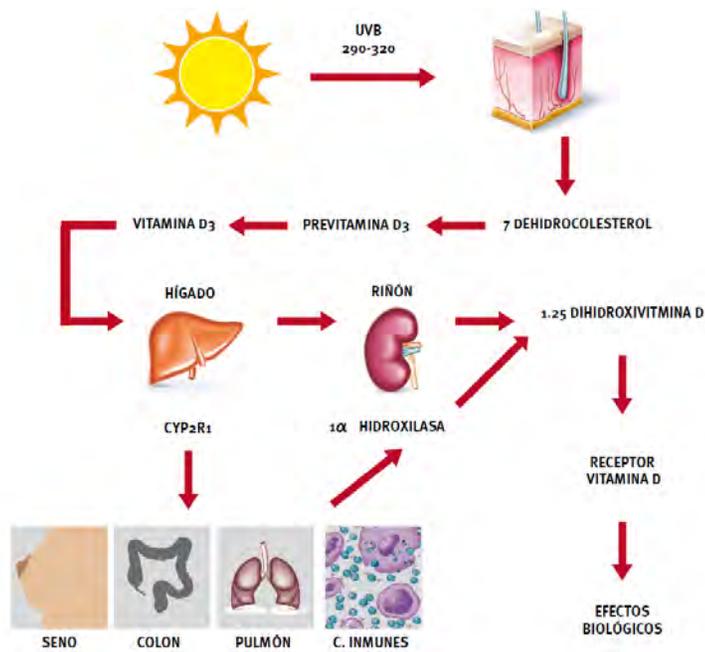


Figura 17 Fisiología de la vitamina D, (Molina & Londoño, 2012, p. 240)

Algunas fuentes de luz artificial que emiten luz UVB, como las lámparas de bronceados portátiles, se han probado científicamente para medir su capacidad de estimular la producción de vitamina D; sin embargo, se requiere tres veces más tiempo de exposición para lograr los mismos efectos que con la luz natural (Chandra et al., 2007, p. 3). Lo que indica que, aún con sus limitaciones, es posible la emulación del espectro de la luz solar de forma sintética.

En 1987 la Organización Mundial de la Salud reconoció como Síndrome del Edificio Enfermo (SEE) al conjunto de enfermedades o sensación de malestar en los habitantes las cuales están asociadas a la ocupación de ciertos edificios (Rostron, 2008, p. 291). El SEE se relaciona frecuentemente con problemas de calidad del aire al interior; sin embargo, los factores que contribuyen a menudo son una combinación de otras posibles causas incluyendo contaminantes en el aire, la ausencia de luz solar o natural, una calefacción o ventilación inadecuada, problemas acústicos y la presencia de asbestos.

Pero la relación entre la salud y el ambiente no es tan sencilla o directa, sino que existe una relación entre tres

factores: individuo, agentes patógenos y el ambiente³⁷ en el que una persona vive como se muestra en la Figura 18.

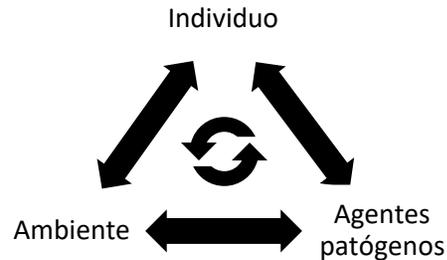


Figura 18 Relación causal triangular del modelo de causalidad de la salud. Elaboración propia a partir de (Boubekri, 2008, p. 2)

Es importante destacar que el ambiente en este modelo representa sólo una tercera parte de las condiciones que fomentan la salud, pero al ser uno de los componentes que podemos controlar en mayor medida desde el ámbito de la arquitectura, es posible influir sobre los individuos e incluso ayudar a disminuir los agentes patógenos como pueden ser el caso de una habitación bien iluminada y con baja humedad,

donde difícilmente se fomentará la generación de moho cuyas esporas pueden causar problemas respiratorios.

Uno de los factores ambientales es la iluminación y en particular la luz del sol, la cual es vital para la vida en la tierra y su ausencia fomenta condiciones que provocan enfermedades. Además de la fotosíntesis y otros procesos químicos provocados por la luz del sol, existen otras funciones psicológicas, hormonales y biológicas fundamentales que son cruciales para la vida de células, plantas y animales incluyendo a los humanos.

Así como el desarrollo de conductas anormales y enfermedades ante la ausencia de la luz solar ya que su ciclo diurno es interrumpido, siendo estos padecimientos la parte central de esta investigación y la forma en que la iluminación artificial puede ayudar al mejoramiento del ambiente y prevenir dichos padecimientos.

En algunos centros urbanos con una alta densidad de edificios altos la cantidad de luz natural que penetra hasta el nivel de la calle puede ser muy bajo incluso en días soleados,

El entorno físico y socioeconómico donde una persona se desarrolla puede provocar una mayor o menor resistencia a ciertos patógenos fomentando o mermando su condición de salud independientemente de las condiciones ambientales

inmediatas de la habitación en la que se encuentre en determinada época del año y bajo ciertas condiciones climatológicas. (Boubekri, 2008, pp. 1–3)

como es el caso de la ciudad de Nueva York donde se han medido 1200 lux a nivel de la calle contra 120 000 lux en la azotea de un edificio adyacente a dicha calle, lo que representa menos del 2% de penetración en configuraciones urbanas de tan alta densidad (Boubekri, 2008, p. 84) donde los residentes y trabajadores que albergan las plantas bajas no reciben suficiente cantidad de luz natural a pesar de tener ventanas en las fachadas. Aunque la densidad de población de la Ciudad de México es alta,³⁸ la realidad es que su densidad urbana no ha alcanzado niveles alarmantes comparados a los que tienen ciudades como Nueva York o Tokio, o bien está focalizada en zonas donde el valor del terreno es elevado y los planes de desarrollo urbano han permitido la proliferación de edificios de gran altura y muy próximas entre sí y es en esas áreas donde puede observarse esta problemática.



Figura 19 Santa Fe Ciudad de México (Ricardo Gómez Garrido, 2014)

I.5 Normatividad respecto a la iluminación.

La normatividad respecto a la iluminación en los edificios de la Ciudad de México está regida por las normas técnicas complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal hoy ciudad de México, la cual dicta valores mínimos de referencia (Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal, 2011, p. 3.4) y que en resumen exige iluminación natural en los espacios habitables ya sea por medio de ventanas o domos, pudiendo darse la excepción de que algunos locales sólo se iluminen solo de forma artificial, respetando los mismos valores en locales como son oficinas, salas de juntas, entre otros. Esto se suma a

³⁸ El área metropolitana de la ciudad de México con una población de más de 20 millones ocupa el noveno lugar en la lista de aglomeraciones urbanas. Su densidad de población de 2,656/km² es alta en comparación de

los 938.3/km² del área metropolitana de Nueva York. (“Metropolitan Areas (Mexico): Metropolitan Areas - Population Statistics, Charts and Map”, 2015)

la posible problemática de la poca penetración de luz solar directa en áreas con alta densidad urbana.

En todos los casos la iluminación artificial deberá cumplir con los niveles mínimos señalados en la Tabla 2 haciendo hincapié en el amplio rango de nivel de iluminación que aplica para los espacios de oficinas que va desde los 100 a los 500 lux dependiendo de la función a realizar, siendo una práctica común en el diseño de iluminación realizar los cálculos para ofrecer siempre el valor más alto y cumplir con el requisito en todos los casos, pero resultando excesivo tanto en el consumo de energía como en el estímulo circadiano aun para actividades que no requieran tanta iluminancia pero al no indicarse un valor máximo permitido se sigue cumpliendo con los códigos.

Es importante hacer notar que este rango permite acotar esta investigación a los espacios de oficina, debido a que la hipótesis sobre las ventajas de una iluminación dinámica, ya que difícilmente se puede aplicar en edificios industriales en donde la iluminación mínima esta siempre en un nivel muy alto, lo cual dificulta la modificación de las características hacia un nivel más bajo, teniendo un margen tan estrecho en la normatividad a diferencia de las oficinas.

TIPO DE EDIFICACIÓN	LOCAL	NIVEL DE ILUMINACIÓN
HABITACIONAL		
Vivienda unifamiliar	Circulaciones horizontales y verticales	50 lux
Vivienda plurifamiliar		
COMERCIAL		
Tiendas de productos básicos y especialidades	En general	250 lux
Tiendas de autoservicio		
Tiendas departamentales y centros comerciales		
Agencias y talleres de reparación		
Tiendas de servicios y servicios diversos	Baños	100 lux
SERVICIOS		
Administración		
Bancos, casas de bolsa y casas de cambio	Áreas y locales de trabajo	250 lux
	Circulaciones	100 lux
Oficinas privadas y públicas	Cuando sea preciso apreciar detalles	100 lux
	Cuando sea preciso apreciar detalles :	
	Toscos o burdos	200 lux
	Medianos	300 lux
	Muy finos	500 lux
Educación e instituciones científicas		
Atención y educación preescolar	Aulas	250 lux
Educación formal básica y media	Aulas y laboratorios	300 lux
	Circulaciones	100 lux
Educación formal media-superior y superior, y educación informal	Aulas y laboratorios	300 lux
	Circulaciones	100 lux
Institutos de investigación	Aulas y cubículos	250 lux

Tabla 2 Niveles de iluminación ntc-rcdf,,(Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal, 2011, p. 3.4.3)

Otra normatividad aplicable es la NOM-025-STPS-2008 que regula las condiciones de iluminación en los centros de trabajo, la cual especifica el método de medición de la iluminación a la altura del área de trabajo e incluye el requerimiento de distinción moderada de detalles que incluye los trabajos de oficina con un nivel mínimo de iluminación de 300 luxes³⁹ y contempla hasta 2000 luxes para un alto grado de especialización en la distinción de detalles, como podría ser un quirófano.

Es importante señalar que estas normas no prevén niveles máximos, ni la temperatura de color correlacionada recomendada, ya que aún no existe una integración con las investigaciones recientes sobre los ciclos circadianos y la iluminación, especialmente si consideramos que el exceso de iluminación puede inhibir la segregación de melatonina y afectar la salud.

También existe la NOM-030-ENER-2012 correspondiente a la eficacia luminosa de lámparas de diodos

emisores de luz (led) integradas para iluminación general. La cual establece los métodos de prueba para para medir la eficacia lumínica que debe ser mínimo de 50 lm/w. Dicha norma estandariza la temperatura de color correlacionada (CCT) de las luminarias led en sus valores nominales y los reales siendo 2,580 K el valor mínimo y 7,040 K el máximo permitido por esta norma oficial.⁴⁰ Además de definir los valores mínimos del índice de rendimiento de color (CRI) en 77 y 75 según la CCT.

TCC nominal (K)	Tolerancia de la TCC (K)
2 700	Mayor o igual que 2 580 y menor que 2 870
3 000	Mayor o igual que 2 870 y menor que 3 220
3 500	Mayor o igual que 3 220 y menor que 3 710
4 000	Mayor o igual que 3 710 y menor que 4 260
5 000	Mayor o igual que 4 745 y menor que 5 311
6 500	Mayor o igual que 6 020 y menor que 7 040

Tabla 3 Temperatura de color correlacionada según la NOM-030-ENER-2012

Aunque esta norma sí establece parámetros sobre la calidad de la luz artificial, están enfocados principalmente a la

³⁹ De acuerdo a la Tabla 2 de Niveles de Iluminación para tareas visuales y áreas de trabajo, donde se establecen los niveles mínimos de iluminación que deben incidir en el plano de trabajo, para cada tipo de tarea visual o área de trabajo. (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2008, p. 4)

⁴⁰ Todas las lámparas de LED integradas omnidireccionales deberán cumplir con la TCC indicada en la Tabla 3 (Secretaría de Energía, 2012, p. 6.1.3)



comercialización estandarizada y no incluye referencias sobre los efectos de la luz en el reloj biológico, lo que se debe considerar de esta NOM son los parámetros permitidos para este tipo de luminarias en el mercado mexicano y deben tomarse en cuenta para la fabricación del prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables.

I.6 Diferencias entre los sistemas de iluminación artificial convencionales y automatizados.

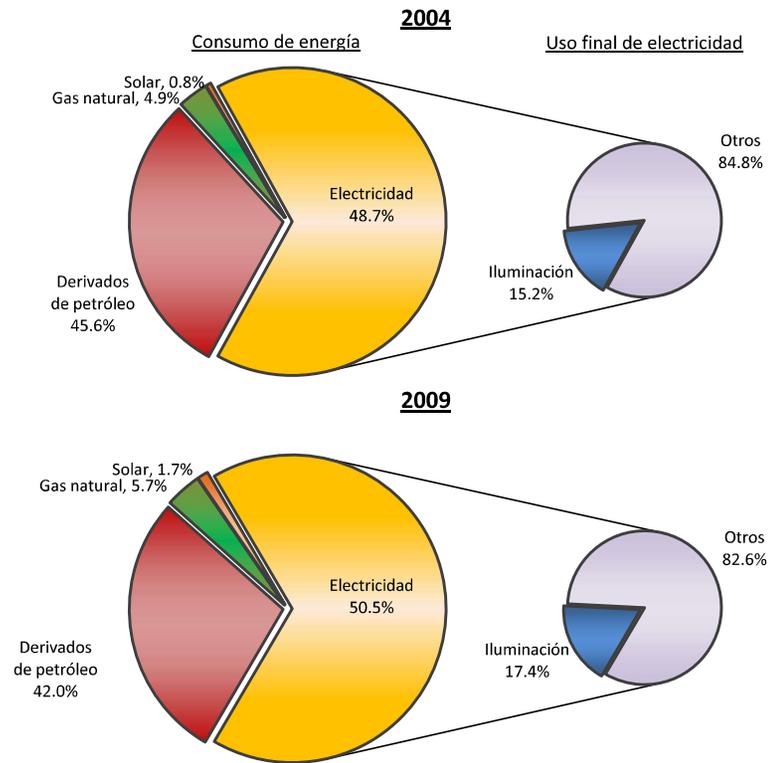
Los sistemas convencionales más comunes están compuestos por lámparas e interruptores, que mantienen un mismo nivel de iluminación durante todo el día, siendo la única forma de regularlo el apagar de forma individual o por grupos de luminarias para reducir la iluminancia y consumo eléctrico.

Algunos sistemas convencionales incorporan atenuadores o “dimmers” con los que se logra regular la intensidad de las luminarias, pero no controlan la temperatura de color de la luminaria ni son automatizados.

De acuerdo con la Secretaría de Energía (Sener), el consumo de electricidad para iluminación en México creció a

un ritmo del 3.9% anual y al cierre del 2009 dicho consumo representó el 18%, a través de un parque estimado en 290 millones de lámparas que incluyen: tubos fluorescentes, focos incandescentes y lámparas fluorescentes compactas. (Illuminet, 2010). Aunque la tecnología led ⁴¹ permite hasta un 90% de ahorro contra lámparas incandescentes, el cambiar de un sistema convencional a uno automatizado añade otros ahorros y beneficios para los usuarios.

⁴¹La iluminación led representó menos de 10% del mercado global en 2012 pero se espera que en 2020 los focos led dominen el 70% (Ivet Rodriguez, 2012)



Gráfica 8 Participación del consumo de energía y del uso final de la electricidad, 2004 y 2009 en México. (Secretaría de Energía & Agencia Internacional de Energía, 2011, p. 122)

I.6.1 Sistemas automatizados de iluminación comerciales.

El control de iluminación es una de las aplicaciones de la domótica, la cual se define como el conjunto de sistemas que automatizan las diferentes instalaciones de una vivienda,

proviene del latín *domus* que significa casa y de la palabra *tica* que significa que funciona por sí solo.

Para el caso de los edificios comerciales como oficinas e industria se utiliza el término *inmótica* con el mismo principio de hacer funcionar los sistemas de forma autónoma con el objetivo de ahorrar recursos, brindar seguridad, confort y gestionar de forma remota. El control de iluminación automatizado puede tener funciones dentro de los cuatro objetivos de la inmótica/ domótica como puede verse en la Figura 20.

Los sistemas de control de iluminación actuales se basan en una red para la comunicación (alámbrica o inalámbrica) entre diversos dispositivos de entrada y salida entre ellos las propias luminarias, interruptores, atenuadores (dimmers) y sensores. La comunicación puede ser analógica, comúnmente variando el voltaje de 0-10V o variando la corriente de 0 a 20mA, que no es tan común en la iluminación; o bien puede ser digital mediante señales digitales multiplexadas (DMX por siglas en inglés); o por interfaz de iluminación direccionable digital (DALI por sus siglas en inglés) o mediante protocolos propios de cada fabricante. Su



control puede ser manual o bien automatizado al incorporar el uso de uno o más dispositivos informáticos centrales.

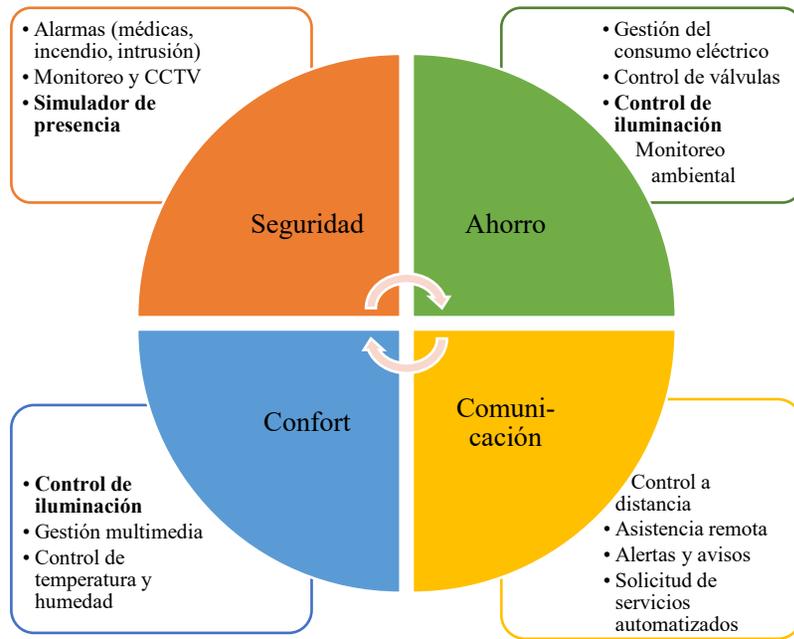


Figura 20 Aplicaciones de la Domótica. Elaboración propia con base en (Romero Morales, 2011)

Actualmente existen muchos sistemas de iluminación basados en controladores y sensores de presencia e iluminación ambiental pero su principal objetivo es el ahorro de energía, también hay dispositivos que permiten controlar el

color de la luz, pero están enfocados principalmente a la generación de ambientes y a la decoración.

A modo de ejemplo y sin generalizar, en la Figura 21 se muestra la topología común de los sistemas de iluminación cableados donde los componentes principales son: servidor de control central, controlador de iluminación, módulos de interface, sensor de ocupación, sensor de luz, atenuador de pared, luminarias con balastro o driver, tablero eléctrico, cableado de señal de bajo voltaje entre módulos, cableado de potencia, cableado de control 0-10V y cableado de red.

Además de los sistemas de control de iluminación cableados que utilizan voltajes de 127 o 220 volts, existen sistemas que alimentan las luminarias a bajo voltaje hasta 48 volts, también existen los sistemas inalámbricos donde la comunicación se transmite mediante radiofrecuencia y sólo se cablea la alimentación eléctrica de los módulos o interfases inalámbricas los cuales son más comunes en edificios donde existe iluminación convencional y se desea incorporar la automatización evitando la necesidad de cablear la red de control.

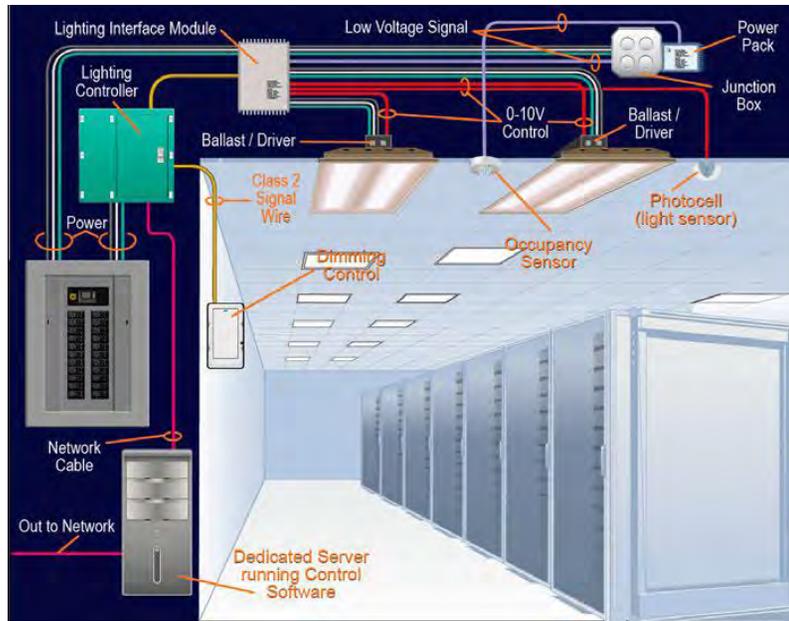


Figura 21 Diagrama de un sistema de control cableado, (CommScope Inc., 2014)

Al mercado nacional han llegado distintas marcas y modelos de sistemas de control de iluminación automatizado, los cuales varían en costo y eficiencia dependiendo de las funciones con las que se desee contar y accesorios que los componen como sensores, así como el tipo de luminaria que se utilice, pero se considera una fuerte inversión inicial la cual puede ser recuperada con los ahorros energéticos y beneficios a los usuarios como el confort, pero su uso en oficinas en México se ve limitado a salas de junta, áreas gerenciales o

edificios donde la certificación de sustentabilidad obliga a implementar estrategias de ahorro energético.

I.6.2 Estado del arte de los sistemas de iluminación dinámica y circadiana.

Dentro del grupo de sistemas de control de iluminación que encontramos en el mercado existe el grupo de sistemas denominados iluminación humano-céntrica o bien iluminación circadiana. Los cuales incorporan la simulación del dinamismo y temperatura de color de la luz natural.

Una de las marcas más conocidas en nuestro país es Philips cuyo sistema llamado “SchoolVision” (que se traduce “Visión Escolar”) utiliza luminarias con luz cálida y luz fría que al combinar la intensidad de las dos ofrece cuatro ambientes denominados: normal, energía, concentración y calma; (Koninklijke Philips Electronics N.V., 2011, p. 4) los cuales estimulan el estado de ánimo de los alumnos gracias a los efectos de la luz en el ciclo circadiano. Este sistema permite al profesor elegir qué ambiente utilizar o bien puede programarse para que cambie cada cierto intervalo de tiempo y puede considerarse independiente para cada aula.

A partir de este sistema Philips está desarrollado el “Simplicity Project” (que se traduce “proyecto sencillez” o



“proyecto naturalidad”) el cual consiste en incorporar el principio del sistema de iluminación dinámica “SchoolVision” pero en un ambiente de oficinas para regular temperatura de color entre 3000 y 5500 K e intensidad de iluminación desde 500 a 900 lux a fin de influir sobre el ciclo circadiano y mejorar la productividad laboral de acuerdo con las actividades en la oficina tal como se muestra en la Figura 22 donde se sugiere un ajuste en la intensidad y temperatura de color de las luminarias a lo largo del día para influir en la productividad.

Para este propósito esta marca cuenta hoy en día con luminarias específicas para oficinas de la familia “PowerBalance Tunable White” (puede traducirse como: “blanco ajustable de la serie Potencia en Equilibrio”) las cuales cuentan con la funcionalidad de ajustar la temperatura de color 2700-6400 K y atenuar la intensidad mediante el protocolo DALI⁴² para su especificación e instalación se requiere de la asesoría especializada de la marca y permite la inclusión de sensores de presencia y luz ambiental; sin embargo, no se presentan casos de instalación reportados de este producto en sus publicaciones a esta fecha.

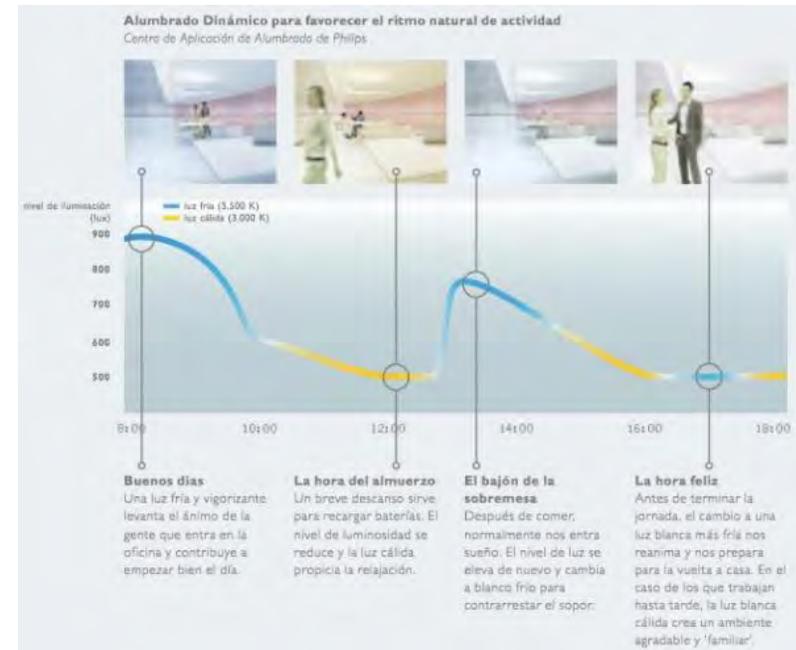


Figura 22 Philips Simplicity (Dhiram Shah, 2009)

Otra marca conocida en México es Osram, quien anuncia un sistema de iluminación humano-céntrica para oficinas modernas basado en luminarias con ajuste de temperatura de color y protocolo de comunicación DALI (OSRAM GmbH, 2017), se muestra un caso de instalación en el hospital AMZ en Neuss, Alemania en 2015 donde se utilizó el modelo “Mira tunable White” de la marca Siteco y se

⁴² En el catálogo en línea hay que buscarlo por la familia RC464B, pues no hay difusión de esta serie (Philips Lighting Holding B.V., 2018)

incorporaron sensores de luz ambiental, (OSRAM GmbH, 2016); no obstante, las publicaciones de las luminarias Osram sugeridas para este sistema contienen la leyenda de que próximamente estará disponible la versión con ajuste de blanco, por lo que sólo está disponible comercialmente la atenuación del nivel de iluminación pero manteniendo una sola CCT.

Dentro de los alcances y limitaciones de esta investigación, se puede decir que los sistemas de iluminación circadiana comerciales encontrados en línea están “disponibles” en el continente europeo con diferentes versiones de luminarias con temperatura de color ajustable, como es el caso de la lámpara de mesa LUCTRA de la compañía alemana Durable Hunke & Jochheim GmbH & Co. KG, con controles personalizados o semi automatizados mediante una aplicación móvil que permite temporalizar los cambios en la calidad y cantidad de la luz con la intención de estimular el reloj biológico.



Figura 23 Luctra Table Pro,(Luctra, 2018, p. 18)

Pero el sistema más completo encontrado durante esta búsqueda, es el de la empresa Eslovaca, Smart Lighting Engineering cuyo sistema “Human Centric Office” que puede traducirse como “oficina humano-céntrica” (SLE, 2016), está basado en el protocolo de comunicación DALI integrando una controladora, luminarias led de amplio espectro ajustables, sensores de luz ambiental y de presencia.



Dicho sistema dice estar pre-programado con un patrón cíclico basado en el cambio de temperatura de la luz natural, además de tener un control manual para ajustar el nivel de iluminación según las tareas a realizar.

Al menos en el papel este sistema de iluminación circadiana integra muchos elementos que otros dispositivos no tienen. Las desventajas principales son su disponibilidad en nuestro país, así como la falta de casos de estudio o proyectos concluidos reportados por la empresa con este producto en específico, lo que abre la oportunidad de desarrollar un aparato con características similares o mejores y para uso en México.

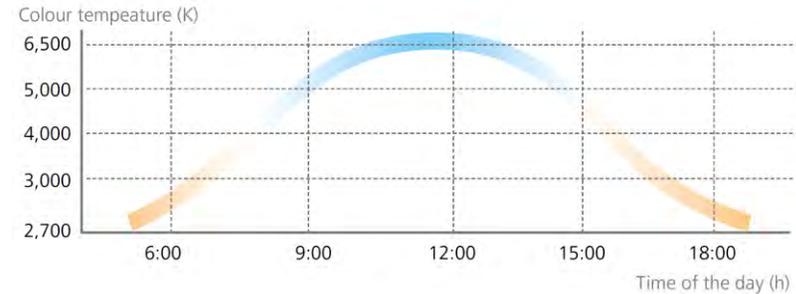


Figura 25 Patrón pre-programado de temperatura de color, (Smart Lighting Engineering, 2016, p. 5)

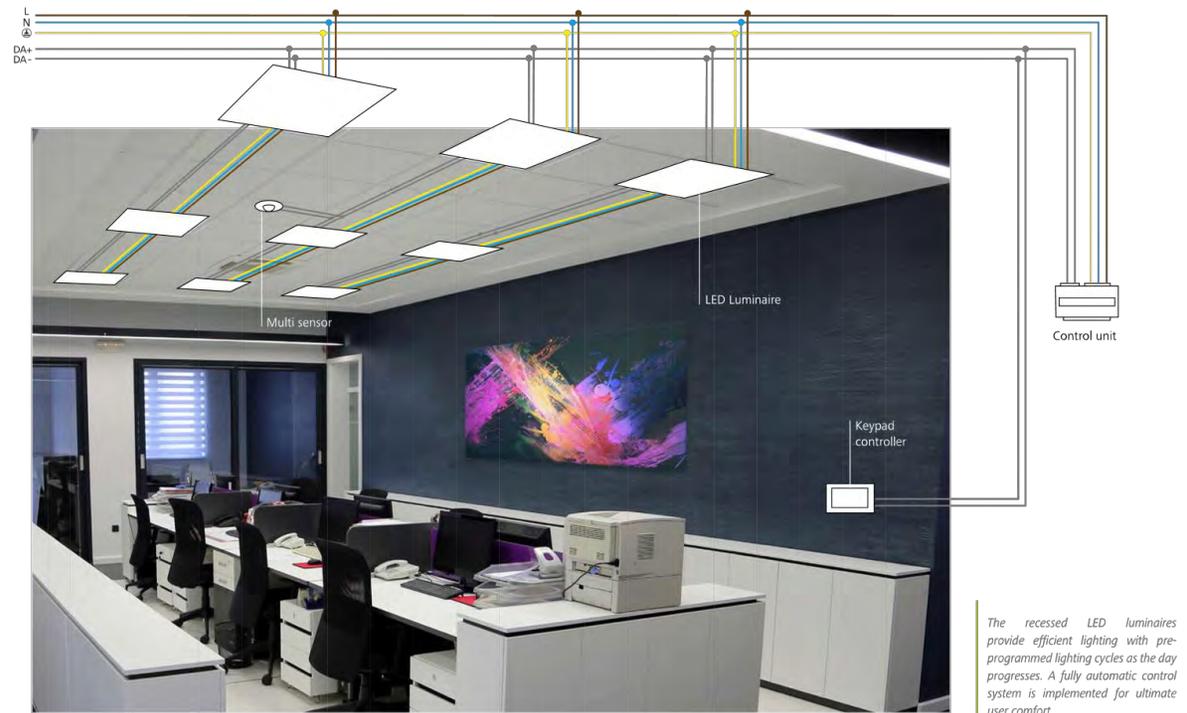


Figura 24 Componentes del sistema Human Centric Office, (Smart Lighting Engineering, 2016, p. 6)

II. El reloj biológico, como influye en el ser humano y como se ajusta

El cuerpo humano está repleto de relojes biológicos ya que cada órgano y célula mantiene un ritmo para llevar a cabo sus funciones vitales e interactuar con otras partes del cuerpo armónicamente, pero existe lo que podemos denominar el “reloj central” del cuerpo y es el núcleo supraquiasmático (NSQ) el cual se encuentra sobre la intersección de los nervios ópticos.

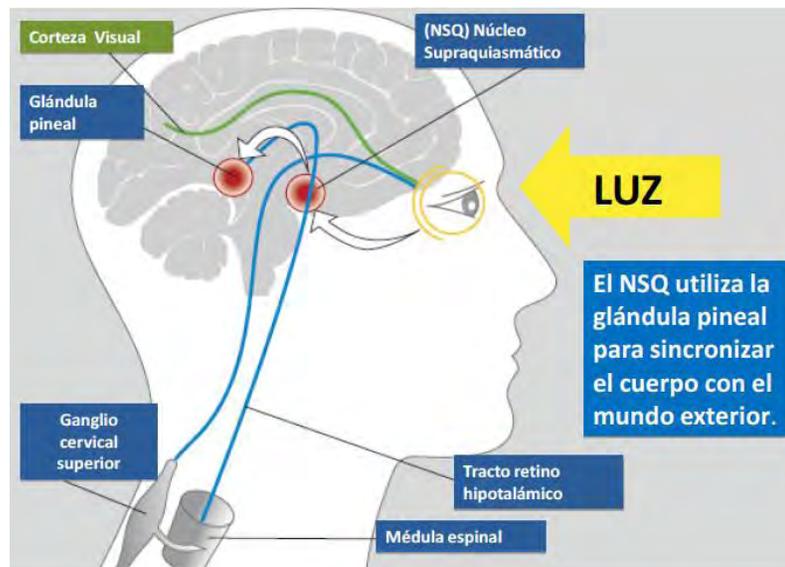


Figura 26 Nucleo Supraquiasmático, (Luis Deschères, 2015)

Uno de los primeros estudios sobre relojes biológicos fue efectuado por Jean-Jacques d'Ortous de Mairan en 1729 en

el que demostró que una planta conocida como mimosa abría sus hojas durante el día y las cerraba durante la noche, no como reflejo de la luz solar, sino que aún en condiciones de oscuridad total durante días la planta mantenía un ciclo regular, siendo así que el reloj biológico está en el organismo.

Los cambios en la posición del sol a lo largo del día están relacionados con los cambios cíclicos en nuestro organismo como es el caso de los estados de vigilia y sueño, a esta relación se le conoce como ritmo circadiano.

Los sistemas circadianos regulan la segregación de hormonas de forma periódica a lo largo del día como se muestra en la Figura 27 donde vemos en color azul una de estas sustancias llamada melatonina, que es la responsable de regular los ciclos de sueño, estudios demuestran que su producción comienza alrededor de las 18 horas dando inicio a lo que podemos llamar noche biológica o “bio-noche”.

Los seres humanos también podemos mantener ciclos regulares aun en ausencia de marcadores como la luz solar que indiquen la hora, pero su duración no es exactamente la del día solar ni mucho menos la establecida por la sociedad, aquí es donde actúa el NSQ, sincronizando constantemente nuestro

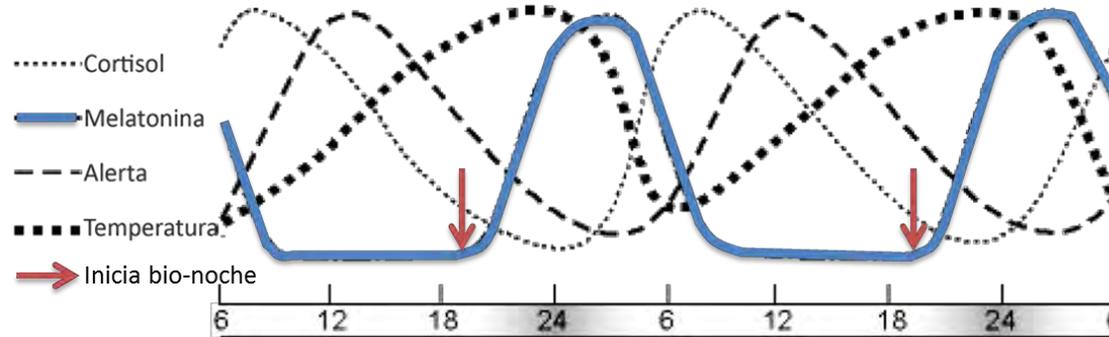


Figura 27 Ciclos circadianos, adaptación de (Philippe Rahm, 2001)

reloj biológico de acuerdo con el ambiente y a las actividades diarias, que a diferencia de las plantas que captan la luz con cada célula, nuestro núcleo central necesita de la luz percibida principalmente por las células en los ojos para recibir la información sobre las condiciones externas.

II.1 Los trastornos del sueño relacionados con los ciclos circadianos

Antes de tratar el tema de los trastornos es importante definir qué es un ciclo de vigilia y sueño, el cual es un proceso biológico donde el NSQ mantiene un balance contrapuesto entre la señal de alerta y la carga de sueño donde al predominar una de las dos cargas se está dormido o despierto, como se muestra en la Figura 28.

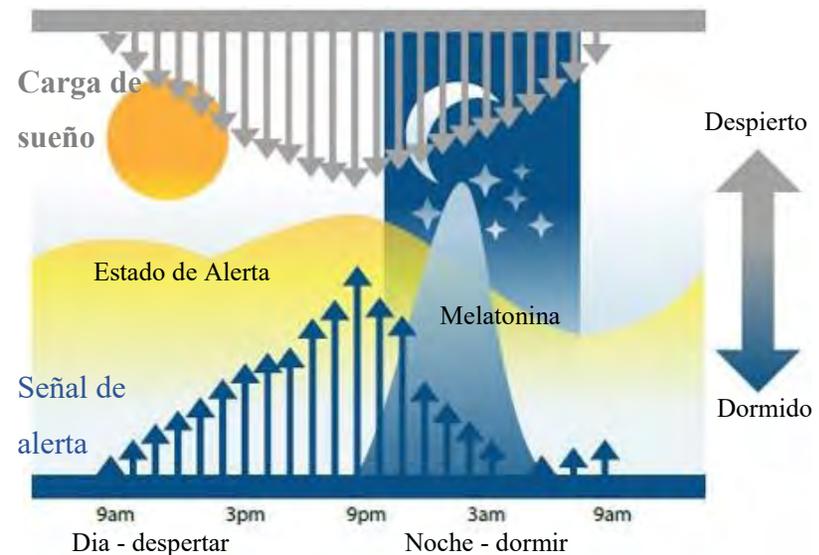


Figura 28 Procesos opuestos de vigilia y sueño, (Megan Perius & WebMD LLC, 2017)

En los humanos al igual que otras especies diurnas, el reloj biológico trata de mantener el estado de vigilia durante las horas en que hay luz de día y la somnolencia durante la noche, pero no siempre se puede mantener esta simultaneidad cuando por alguna razón debemos modificar este patrón, ya sea para permanecer despierto toda la noche o tomar una siesta, aconteciendo en estos casos que la carga de sueño se acumula o libera al igual que el cortisol, tal como se muestra en la Figura 29.

La mala higiene del sueño implica modificar constantemente dichos patrones, muchas veces se debe a motivos sociales que nos obligan a consumir sustancias para contrarrestar la carga de sueño o bien se debe a la duración del “día subjetivo” que es la influencia del entorno sobre el NSQ, para interpretar una duración del día más prolongada debido al exceso de iluminación. Siendo así que el estado de alerta se pueda mantener después de la hora que “socialmente” comienza la noche sin la necesidad de ingerir estimulantes, ya que el cortisol se secreta de forma natural por el mismo organismo.

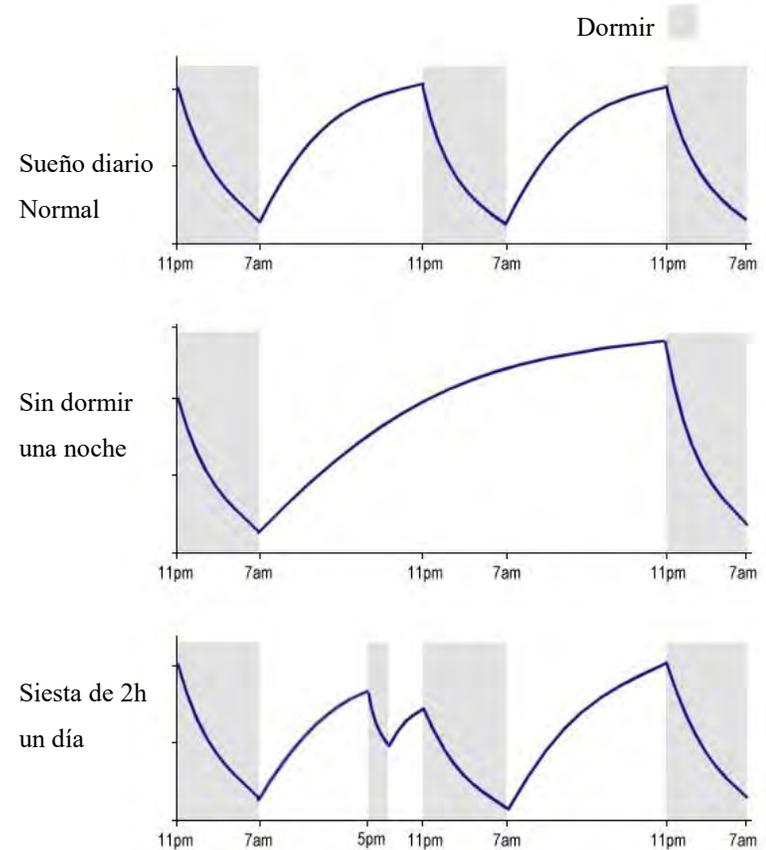


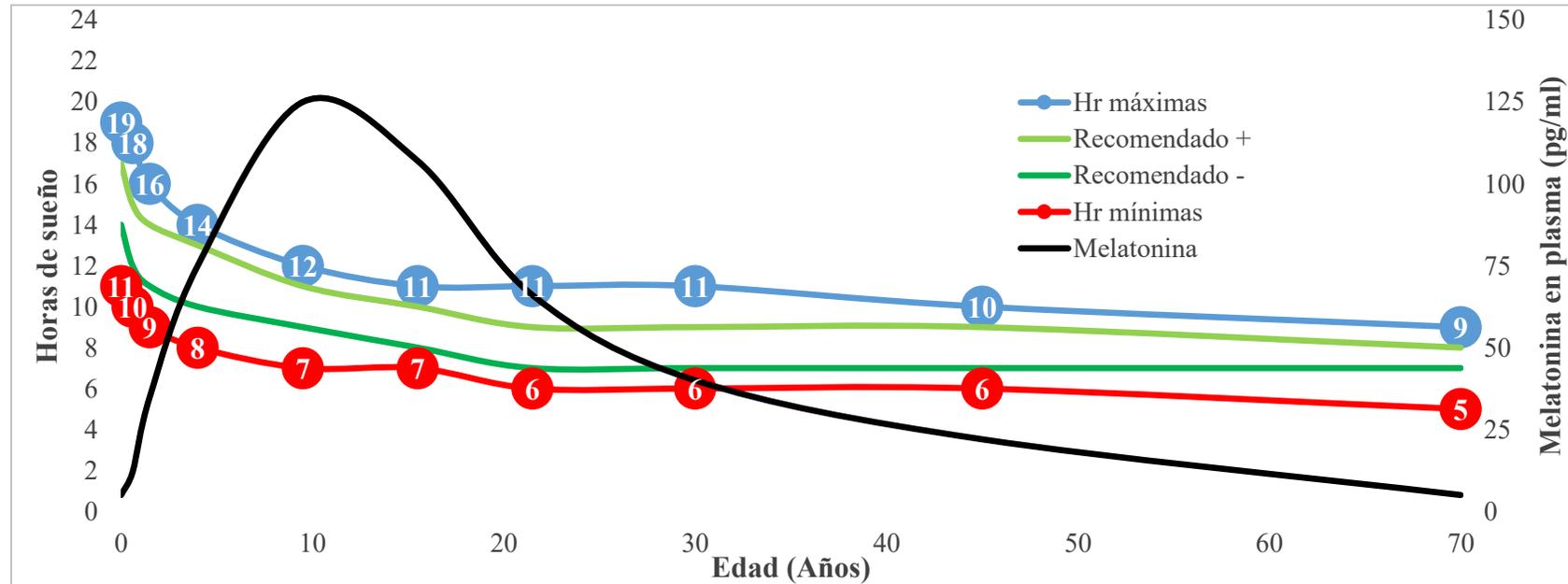
Figura 29 Presión homeostática del sueño, Luke Mastin (howsleepsworks.com, 2017)



La hora de dormir y la duración del sueño como rutina personal depende de tres factores: edad, cronotipo⁴³ y contexto.

La Fundación nacional del sueño de los Estados Unidos de Norteamérica ha emitido recomendaciones sobre la

cantidad de horas de sueño adecuadas para cada etapa de la vida, basados en estudios científicos sobre salud y sueño. (National Sleep Foundation, 2015)



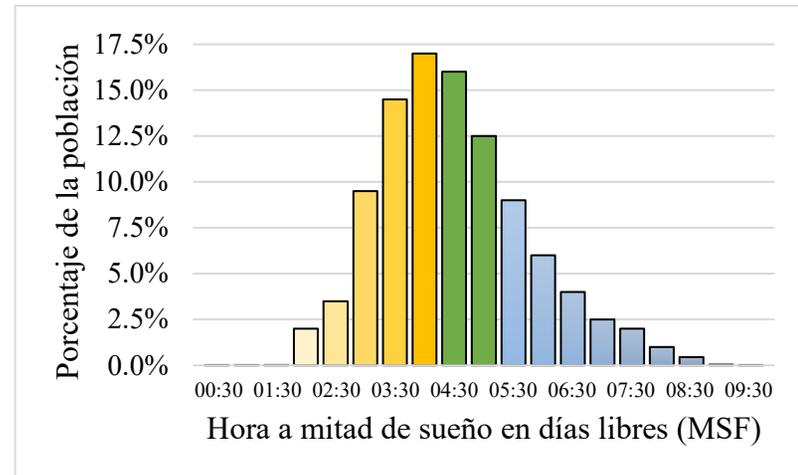
Gráfica 9 Horas de sueño recomendadas y cambios en los niveles circulantes de melatonina a lo largo de la vida.
Elaboración propia a partir de (National Sleep Foundation, 2015) e (IIMEL, 2017b)

⁴³ El término cronotipo se refiere a una clasificación de los relojes biológicos de los individuos, dependiendo de su “tendencia temporal” a realizar distintas actividades cíclicas en un día de 24 horas. El equipo del doctor Roenninger dividió los cronotipos en siete grupos, que van desde los tipos extremadamente tempraneros, propio a las personas que se

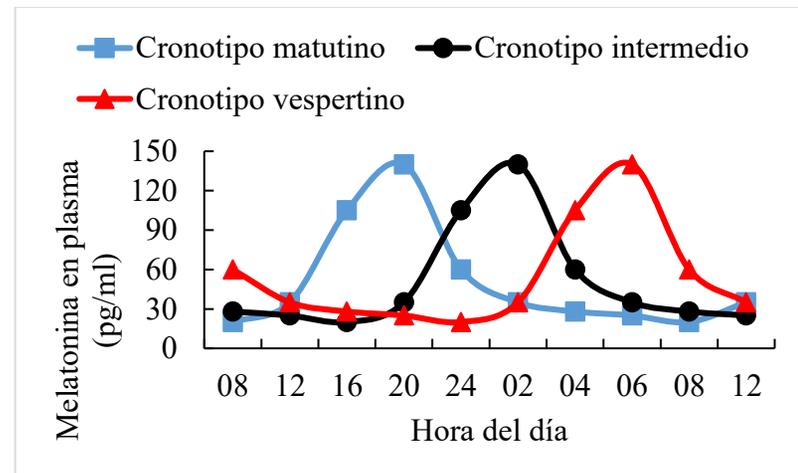
levantan a las cuatro de la mañana y se van a dormir a las ocho de la noche, hasta los extremadamente tardíos, correspondiente a los individuos que se van a dormir a las cuatro de la mañana, y se levantan entre las 11:30 y las 12 del día. (Naix’ieli Castillo García & DGDC-UNAM, 2011)

Existe una relación entre una mayor cantidad de horas de sueño saludable y la segregación de melatonina de acuerdo con la edad como se muestra en la Gráfica 9, aunque en los primeros años el mismo desarrollo del sistema endocrino originan la necesidad de dormir la mayor parte del día a pesar de los bajos niveles de melatonina, se puede ver el pico de producción a los diez años y a partir de ahí va disminuyendo con la edad al igual que la cantidad de horas de sueño requeridas.

Aparte de la duración del sueño, ya sea en una sola sesión o bien acumulando la duración de varias siestas a lo largo del día (*sueño polifásico*) también se debe tomar en cuenta la hora del día en que se tiene más facilidad para conciliar el sueño, donde cada individuo puede pertenecer a uno de los siete grupos de cronotipo, que de acuerdo a la Gráfica 10 el más común es el matutino, donde las personas con este ritmo biológico tienen un pico segregación (*acrofase*) de melatonina natural o “noche biológica” alrededor de las 20:00 horas de acuerdo a la Gráfica 11 con datos del Instituto Internacional de la Melatonina.



Gráfica 10 Distribución de cronotipos según la mitad de sueño en días feriados (MSF); Elaboración propia a partir de (T. Roenneberg & Merrow, 2007, p. 294)



Gráfica 11 El cronotipo y su correspondencia con la acrofase de la melatonina. Elaboración propia a partir de (IIMEL, 2017a)



Como cada persona puede tener una rutina de sueño “única” de acuerdo con su biología y circunstancias, además de que este patrón se va modificando a lo largo de la vida incluyendo cambios drásticos ya sea en el horario como en la duración del sueño, en realidad no se puede hablar de un hábito de sueño bueno o malo como regla general, pero si se puede tratar de evitar trastornos o patologías del sueño que pueden afectar la salud.

Los trastornos del sueño son cada día más comunes afectando en la actualidad a más del 30% de la población mexicana donde la mayoría no son diagnosticados y mucho menos tratados adecuadamente, siendo el insomnio el más común de estos padecimientos. Una buena parte de los trastornos del sueño están relacionados con alteraciones del ciclo circadiano, la Figura 30 muestra algunas de estas alteraciones donde las barras grises representan los periodos de sueño. Siendo los síndromes de la fase del sueño retrasada o adelantada los que más afectan a la población por sus repercusiones para poder conciliar el sueño o despertar en los horarios convencionales o socialmente aceptados y deberían ser prescritos cuando la diferencia excede de dos horas.

Un episodio esporádico de no poder iniciar el sueño cuando nos acostamos por la noche o en cualquier otro momento, hasta no poder dormir en ningún momento del día o la noche, a través de un prolongado periodo de tiempo se le conoce como insomnio (Salinas, 2011, p. 100) y este puede originarse por causas artificiales, como ocurre con los trabajadores nocturnos o causas voluntarias, al enrolarse en actividades de larga duración como guardias de trabajo, guardando total correlación con la Clasificación internacional de los trastornos del sueño (ICSD por sus siglas en inglés).

Estos últimos factores extrínsecos referentes a la higiene del sueño están relacionados directamente con los trastornos del ritmo circadiano del sueño, que de acuerdo con la misma ICSD, se dividen en:

1. Trastorno del sueño en el trabajador nocturno
2. Síndrome de la fase del sueño retrasada
3. Síndrome del adelanto de la fase del sueño
4. Trastorno por ciclo sueño-vigilia diferente de 24 horas
5. Síndrome transoceánico (cambio rápido de zona horaria) que en inglés se le conoce como “jetlag”.

El jetlag o alteración del sueño por viajes, es el más conocido de los trastornos del sueño relacionado con los ciclos circadianos y ocurre cuando se vuela a otro uso horario y se presenta la necesidad de sincronizar el reloj interno al horario del país visitado, repercutiendo negativamente en la salud.

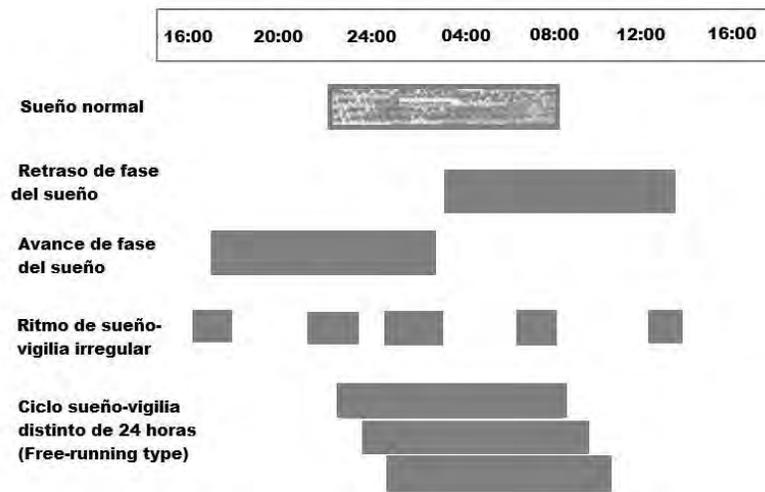


Figura 30 Principales trastornos del sueño relacionados con el ciclo circadiano, (Felipe Silva, 2010, p. 5)

El término jetlag social⁴⁴ fue acuñado por Till Roenneberg en 2006 y se refiere a la continua modificación de los horarios debido a nuestra actividad social ocasionado por

el hecho de dormir pocas horas durante los días laborables e intentar compensar el sueño durante el fin de semana afectando la salud del mismo modo que lo hace el jetlag.

Para descartar la posibilidad de confundir el jetlag social simplemente con hábitos de sueño distintos, los investigadores han catalogado siete cronotipos; como se ha visto en páginas anteriores, donde cada uno tiene patrones particulares especialmente a la hora de dormir, pero el diagnóstico del jetlag no se basa en horarios específicos sino en la necesidad del organismo a ajustarse a diferentes horarios de forma recurrente.

El jetlag social se caracteriza por una diferencia de dos horas entre las horas de sueño acostumbradas en días laborales y los de descanso, siendo la necesidad de emplear un despertador el principal síntoma de que se padece jetlag social y se estima que el 85% de las personas necesitan una alarma para despertar en los días laborables, mientras que sólo el 7% obtiene suficiente sueño durante los días de trabajo⁴⁵ y pueden

⁴⁴ El termino jetlag social, asimila las alteraciones causadas or los cambios de horario por viajes transatlánticos, con los cambios constantes que imponen los horarios sociales, (Till Roenneberg, 2012, p. 6)

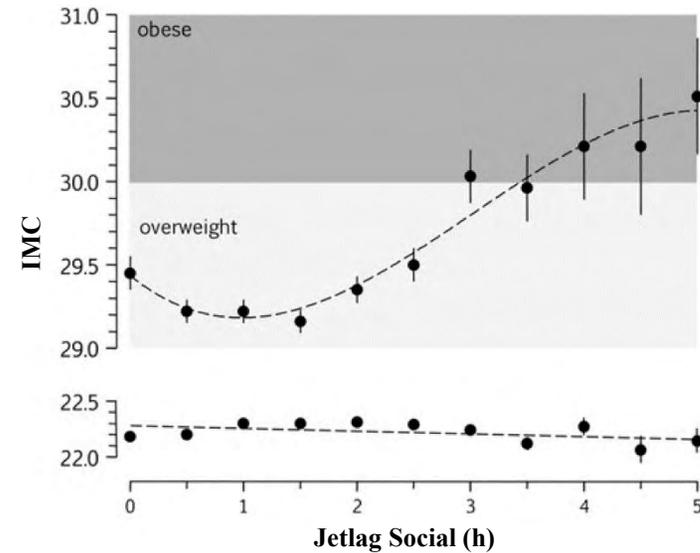
⁴⁵ Con base el estudio de Till Roenneberg y 50 mil cuestionarios respondidos en línea en la página web www.thewep.org por personas de todo el mundo, (Naix'ieli Castillo García & DGDC-UNAM, 2011)

levantarse de forma natural a la hora deseada, lo que podría indicar una alta incidencia de jetlag social

Aunque parezca solo un problema de horarios y fatiga a lo largo del día, el jetlag social puede tener consecuencias más graves, pues se ha descubierto una relación directa al aumento de obesidad en las personas con mayor número de horas de jetlag social, en un estudio con 20,731 participantes con índice de masa corporal (IMC) mayor a 25 kg/m^3 y a 43,308 participantes con IMC normal como puede verse en la Gráfica 12 donde se reporta que el segundo grupo con IMC normal no influye el aumento de jetlag social en la variación del peso, pero en el grupo con sobrepeso se encontró una relación directa entre el aumento de masa corporal hasta llegar a la obesidad conforme se aumentan las horas de diferencia de jetlag social.

En México el 74% de la población urbana⁴⁶ tiene un IMC mayor a 25 kg/m^3 lo cual coloca a un extenso grupo de la población en la posibilidad de ser obesas como consecuencia en parte del jetlag social.

⁴⁶ En México solo el 26% de la población urbana de 20 años o más tiene un IMC normal, el 39% tiene sobre peso y el resto padece ya algún tipo de obesidad, de acuerdo con la encuesta ENSANUT 2012, (Barquera,



Gráfica 12 Jetlag social y obesidad, (Till Roenneberg, Allebrandt, Merrow, & Vetter, 2012, p. 941)

II.1.1 Un reloj biológico armónico y su influencia en el confort y bienestar.

Investigaciones recientes demuestran la relación entre la melatonina y el sistema inmunológico particularmente en experimentos con roedores a los que se les extrajo la glándula pineal que produce la melatonina y se observó el desarrollo de células cancerígenas a una velocidad acelerada en aquellos

Campos-Nonato, Hernández-Barrera, Pedroza, & Rivera-Dommarco, 2013, p. S155)

incapaces de segregarse esta hormona a diferencia de los que sí podían producirla.

También es un hecho que la calidad del sueño influye sobre el estado de ánimo, el cual también puede ser modificado con cambios en la iluminación de los espacios, como lo demuestran los sistemas de fototerapia comunes en países nórdicos, donde en la temporada invernal ayudan a sobre iluminar espacios durante las mañanas.

Sumando así los dos factores que conforman el confort que son el bienestar y comodidades.

II.2 La iluminación y sus efectos en los ciclos circadianos.

Como se comentó anteriormente, la exposición a los diferentes niveles y tipos de luz sincroniza diariamente nuestro reloj biológico a 24 horas a diferencia del reloj biológico interno que en ausencia de marcadores para conocer la hora entraría en una etapa conocida como “free running” o estado de vigilia-sueño libre, con lo que el ciclo de vigilia y sueño duraría en promedio 25 horas teniendo un desfase acumulado como el que se ilustra en la Figura 31 Free-running, (Wright, Hughes, Kronauer, Dijk, & Czeisler, 2001, p. 1) Figura 31.

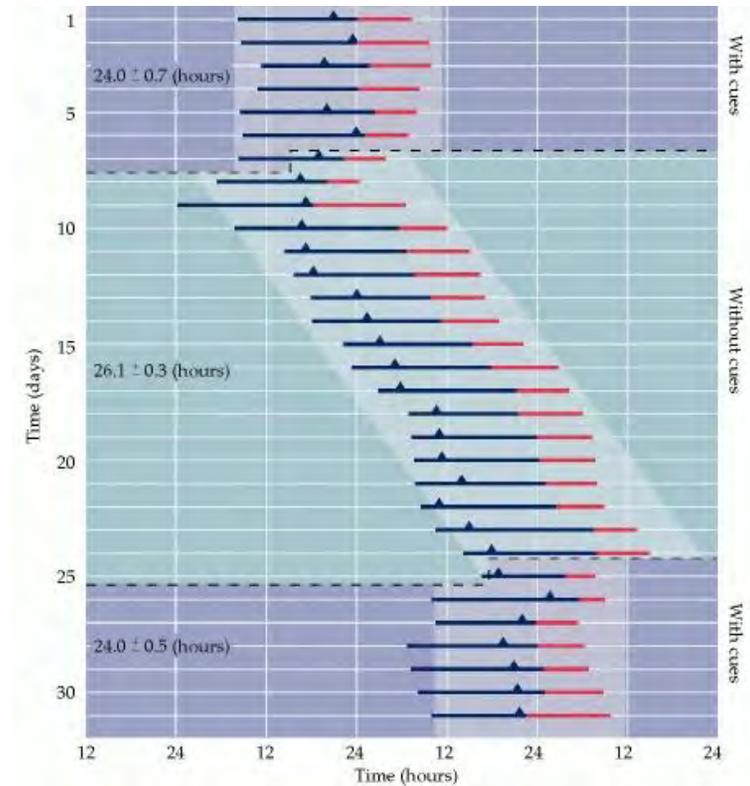


Figura 31 Free-running, (Wright, Hughes, Kronauer, Dijk, & Czeisler, 2001, p. 1)

Del mismo modo que la ausencia de pistas conduce a este estado libre del reloj interno, la sobre exposición a fuentes de luz artificial con longitudes de onda cercanas al azul y mayores a 200 lux envía pistas falsas sobre el ambiente exterior al NSQ que le hacen creer que aún es de día retrasando la fase de sueño.

II.3 El modelo de foto transducción circadiana

La foto transducción es la forma en que los fotones recibidos por la retina son convertidos en estímulos por el cerebro, los investigadores Brainard y Thapan coinciden en sus estudios sobre la curva que representa este fenómeno como se muestra en la Gráfica 13, donde se aprecia que las longitudes de onda de 484 nm suprimen más melatonina que otras longitudes.

A partir de este y otros estudios hoy es posible prever de forma matemática los efectos que la luz tendrá sobre las personas, la primera parte del cálculo consiste en el cálculo de los luxes circadianos (CL_A) mediante la Ecuación 8.

Donde se estableció la constante 1548 que corresponde a una CCT de 2856 K a 1000 lux representa 1000 CL_A .

E_λ es la distribución espectral de la fuente de luz.

$M_{c\lambda}$ es la melanopsina después del cristalino.

S_λ es la curva de sensibilidad de los conos S.

$M_{p\lambda}$ es la transmitancia del pigmento macular

V_λ es la función de eficiencia luminosa fotópica.

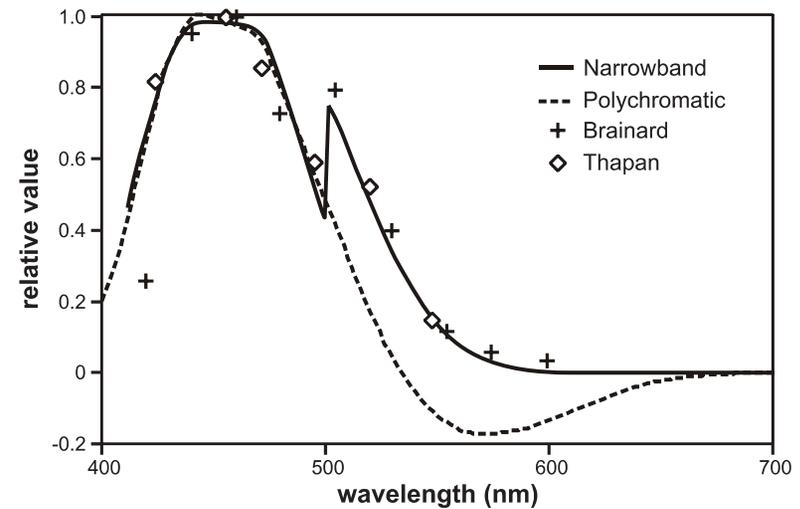
V'_λ es la función de eficiencia luminosa escotópica.

$RodSat = 6.5W/m^2$ que es la constante de saturación media del blanqueamiento de los bastones.

$k = 0.2616$

$ab-y = 0.700$

$arod = 3.300$



Gráfica 13 Sensibilidad espectral circadiana, (M. S. Rea, Figueiro, Bierman, & Bullough, 2010b, p. 7)

$$CL_A = \begin{cases} 1548 \left[\int Mc_\lambda E_\lambda d\lambda + \left(a_{b-y} \left(\int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \right) - a_{rod} \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda E_\lambda d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right] \\ 1548 \int Mc_\lambda E_\lambda d\lambda \\ \text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda \geq 0 \\ \text{if } \int \frac{S_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda - k \int \frac{V_\lambda}{mp_\lambda} E_\lambda d\lambda < 0 \end{cases}$$

Ecuación 8 Modelo de foto transducción circadiana, reproducción a partir de (M. Rea, Figueiro, Bierman, & Hamner, 2012)

II.4 La medición del estímulo circadiana

Para obtener el valor de CL_A con la ecuación anterior, es necesario saber la cantidad de luz medida en lux a nivel de los ojos apuntando con un luxómetro hacia el frente. Además de que se requiere conocer la curva de distribución espectral de la o las fuentes de luz que son visibles.

La Figura 32, compara la sensibilidad espectral tanto de la luz visible como la relacionada con los ciclos circadianos y la contrasta con la curva de distribución espectral de una luminaria led de luz fría rica en azul, donde se puede apreciar que su longitud de onda pico estimula directamente los fotorreceptores que participan en la supresión de melatonina en el cuerpo y por tanto inhibe el sueño.

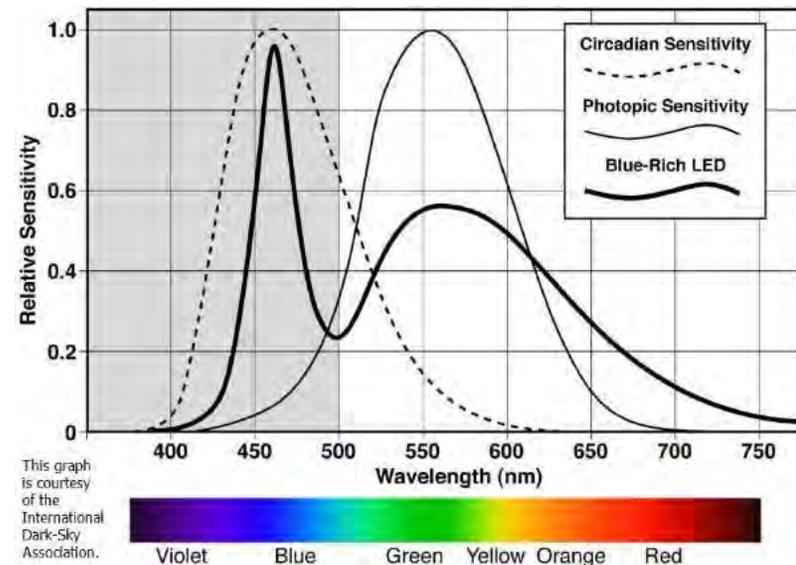
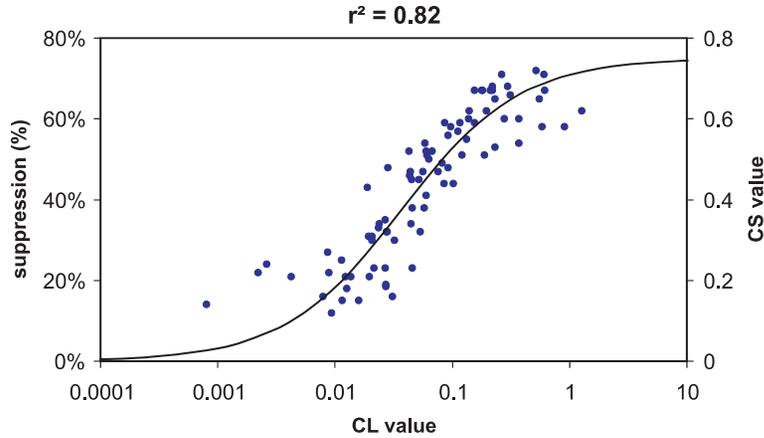


Figura 32 Sensibilidad fotópica estándar y sensibilidad circadiana contra una fuente de luz led, (Street & Suite, 2010)

La doctora Figueiro y el doctor Rea han realizado investigaciones para modelar matemáticamente y comprobar la forma de prever el estímulo circadiano o mejor dicho, la supresión de melatonina provocada por distintos tipos y cantidades de luz y partiendo de pruebas con diferentes valores de CLA se pudo graficar la supresión de melatonina obteniendo la Gráfica 14.



Gráfica 14 Estímulo Circadiano (CS=Supresión de melatonina), (M. S. Rea et al., 2010b, p. 7)

A partir de esta curva generaron la Ecuación 9:

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

Ecuación 9 Estímulo circadiano, (M. S. Rea, Figueiro, Bullough, & Bierman, 2005)

Igualmente se dieron a la tarea de comprobarla mediante la predicción matemática y la medición de melatonina en distintas personas expuestas a los tipos de iluminación calculadas como se muestra en la Figura 5.

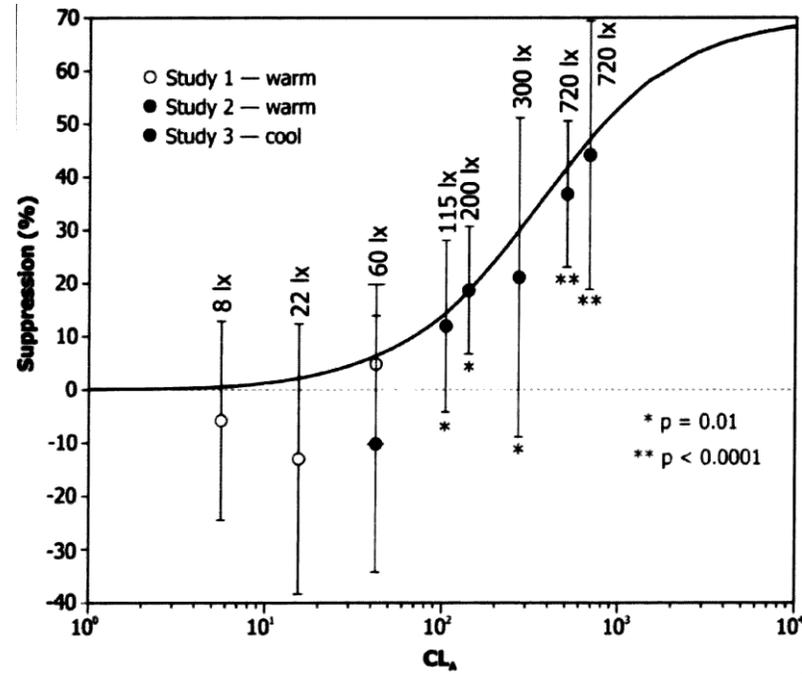


Figura 33 Pruebas de validación de supresión de melatonina, (Rea et al., 2010)

II.4.1 La fototerapia como método de sincronización del reloj biológico para mejorar el bienestar.

Los modelos de transducción circadiana pueden ser utilizados para predecir la cantidad y calidad de luz necesaria para modificar las fases de sueño ya sea adelantando o retrasando los periodos de vigilia y sueño ajustándolo a las necesidades de la sociedad actual revirtiendo el llamado jetlag social.

En un experimento con 21 personas, se trató a la mitad con un patrón de luz/oscuridad adelantado; es decir, se sometieron a luz azul durante la mañana y usaron lentes color naranja durante la noche para filtrar la luz azul. A la otra mitad se expuso a un patrón de luz/oscuridad retrasado, es decir los lentes naranjas en la mañana y la luz azul en la noche, como se muestra en la Figura 34.

Se midieron los niveles de melatonina y el grupo con el patrón adelantado tuvo una diferencia promedio de +132 ±19 minutos respecto a la hora programada para dormir y el grupo con el patrón retrasado tuvo una diferencia de 59 ± 7.5 minutos. Encontrando diferencias según el cronotipo al que pertenecían, siendo los madrugadores los más inducidos por la fototerapia.

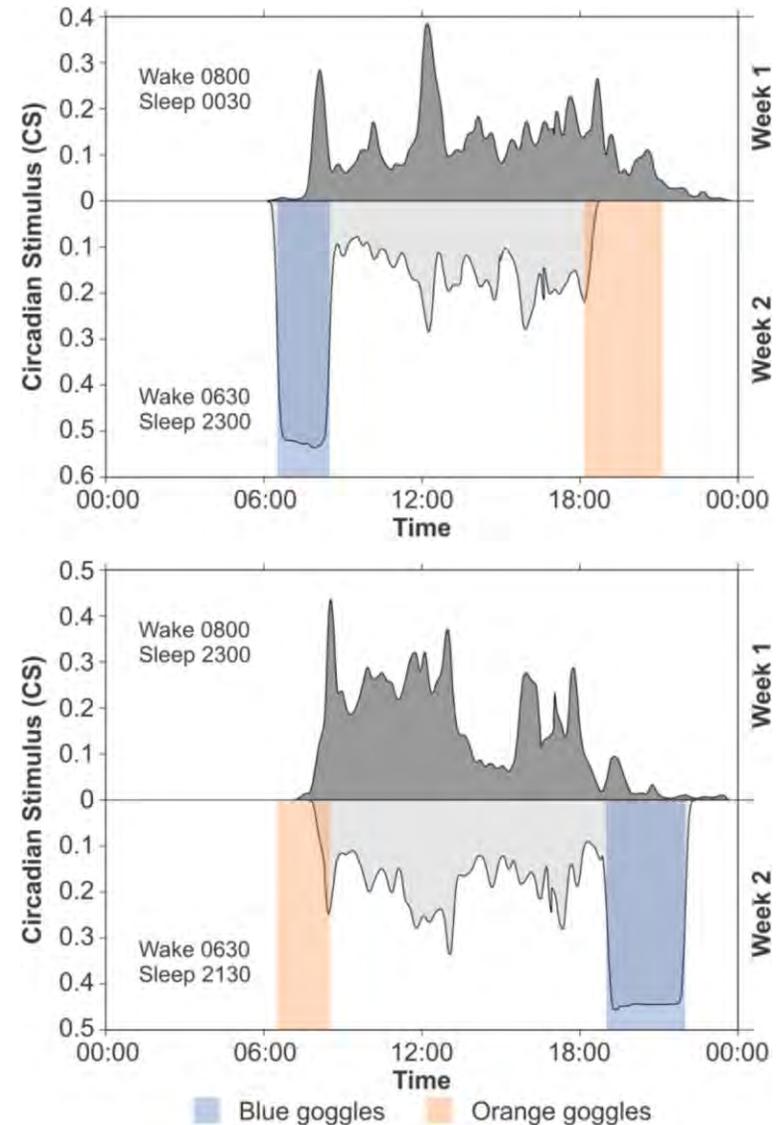


Figura 34 Terapia para adelantar y retrasar el patrón luz-oscuridad, (Mariana G. Figueiro, 2015)



También existen recomendaciones por parte del Lighth Research Center del Rensselaer Polytechnic Institute en Nueva York para utilizar los controles de iluminación atenuables con un solo CCT de sus luminarias a fin de aprovecharlos como fototerapia y evitar disminuir la segregación de melatonina durante las últimas horas de la jornada laboral como se muestra en la Figura 35.

Aun cuando esto sólo es un ejemplo y en ningún momento constituye ninguna prescripción general, el problema con esta estrategia es que los niveles de iluminación se reducen debajo de los 100 lux para respetar el ciclo normal de la segregación de melatonina sin disminuirla, valor que está por debajo del mínimo incluso para baños o circulaciones.

Por lo que recomiendan modificar la CCT a lo largo del día y mantener los niveles de iluminación, pero regulando el estímulo circadiano CS como se muestra en la Figura 36.

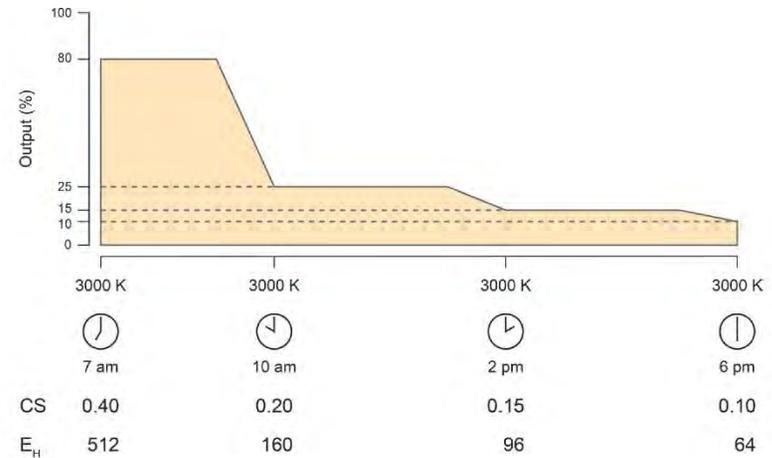


Figura 35 Atenuación de luminarias a lo largo del día con un CCT fijo para modificar el CS, (Figueiro, Gonzalez, & Pedler, 2016, p. 30)

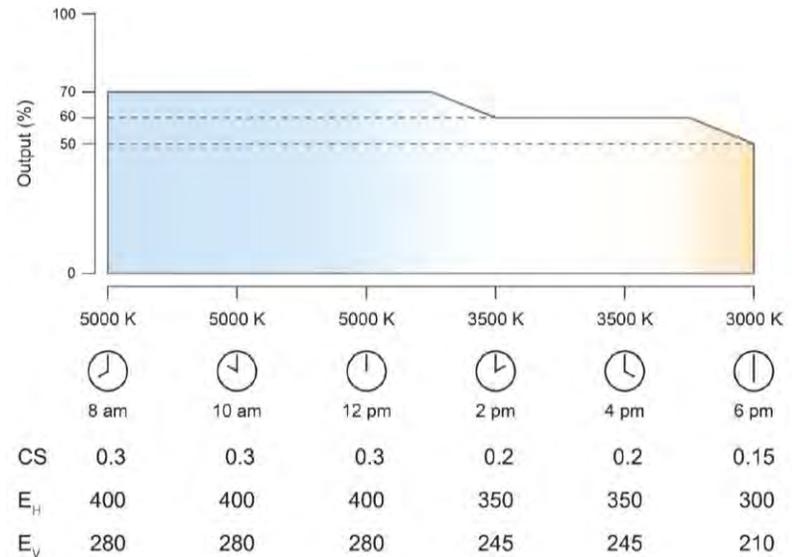


Figura 36 Luminarias ajustables pueden ofrecer CS personalizados. (ibidem)

III. Propuesta y desarrollo del prototipo

III.1 Simulación e interpretación de variables en modelos matemáticos.

A continuación, se muestran algunas gráficas generadas con el simulador y calculadora de estímulos circadianos.

La aplicación para simular curvas SPD puede obtenerse desde el sitio del National Institute of Standards and Technology (NIST) y están basados en el Color Quality Scale (Yoshi Ohno & Wendy Davis, NIST, 2008).

Utilizando esta aplicación en formato de hoja de cálculo se simuló la distribución de potencia espectral de los leds rojos, verde y azul a emplear en el laboratorio de acuerdo con sus fichas técnicas de dichas lamparas y se mezclaron diferentes combinaciones variando de cero a cien por ciento de cada color para calcular la temperatura de color correlacional de cada combinación y la curva espectral.

Después los datos obtenidos se ingresaron a la calculadora de estímulos circadianos del Lighting Research Center cuya versión de 2017 está disponible en línea (Rensselaer Polytechnic Institute, 2015)

La hoja de cálculo de estímulos circadianos basada en el modelo de transducción circadiana permite introducir los datos de la curva de distribución espectral y la iluminancia en lux para conocer si la luz percibida suprime o no melatonina, con lo que se analizaron diferentes combinaciones para entender el fenómeno y relación entre la iluminación y la melatonina de forma más práctica.

En estas gráficas se interpretan las variables hora, temperatura de color, nivel de iluminación y estímulo circadiano. Calculadas utilizando las ecuaciones del sistema RGB y el modelo de transducción circadiana.

Se puede observar en la Figura 37 los diferentes estímulos circadianos cuyo valor arriba de 0.2 CS indica una supresión de melatonina, este valor se obtuvo con una temperatura de color de 6057 K y una iluminancia de 150 lux, pero es un valor adecuado para la hora correspondiente a las 12:00 horas del medio día ya que es necesario estimular el reloj biológico para mantener la alerta a esa hora.



5:30h = 2,580 K
 255, 162, 77 = 0.198 CS

8:00h = 4,652 K
 255, 221, 193 = 0.201 CS

12:00h = 6,057 K
 255, 247, 238 = 0.263 CS

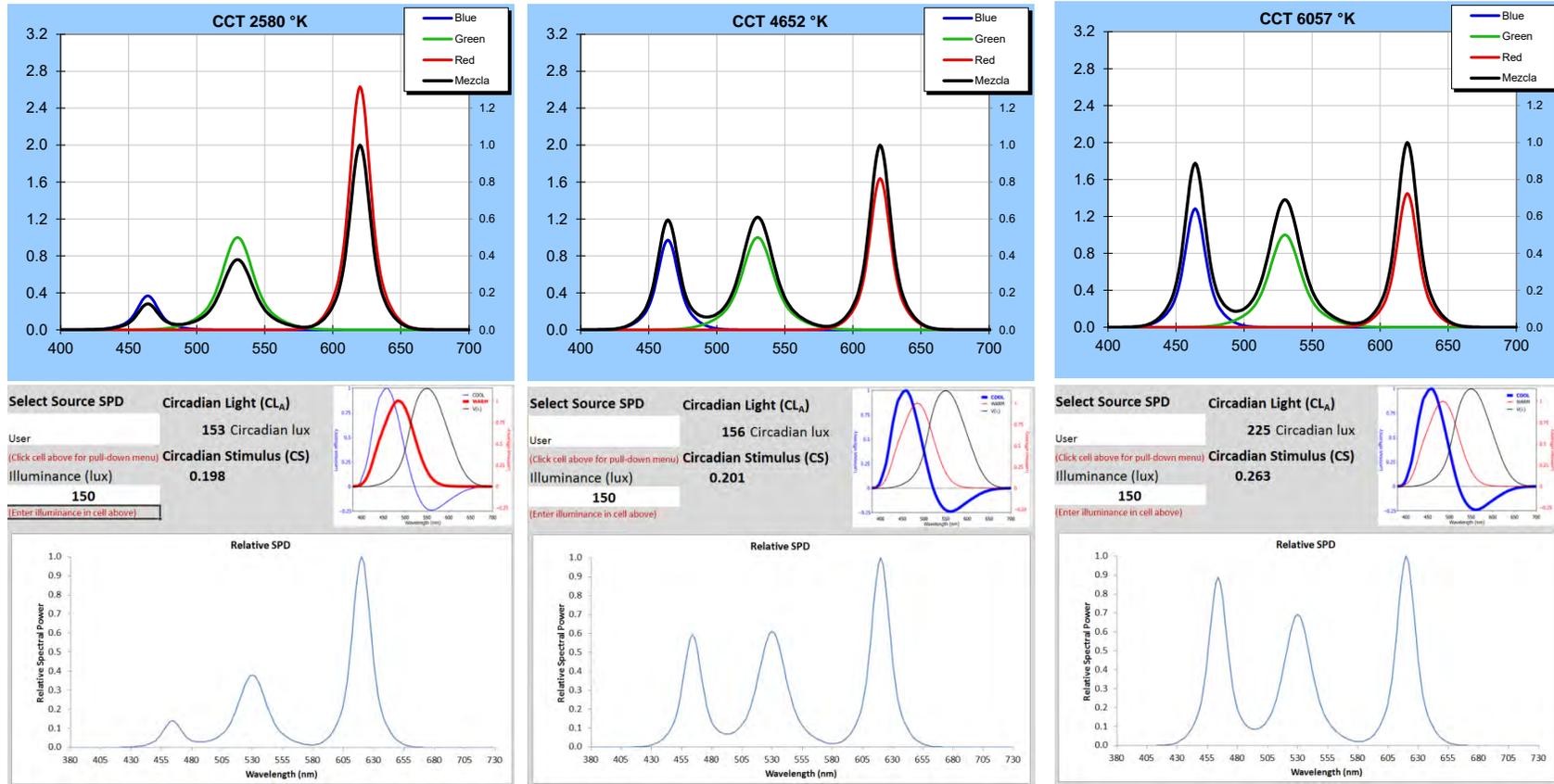


Figura 37 Simulación de niveles RGB y cálculo de estímulo circadiano a distintas horas. Elaboración propia

III.2 Experimentación.

III.2.1 Variables.

Variables objeto de investigación

- a) Nivel de iluminación (cuantitativo)
- b) Longitud de onda (cuantitativo)
- c) Estímulo circadiano (cuantitativo)

Variables ajenas a la investigación

- a) Condiciones ambientales (cuantitativo)

III.2.2 Control de variables.

- a) Ancho de pulso modulado (PWM)
- b) Temperatura de Color Correlacional (cuantitativo)

III.2.3 Extensión.

La población será finita en cuanto al número de luminarias a estudiar en un periodo de tiempo de dos meses.

El usuario objetivo es aquel que labora en espacios habitables de oficinas administrativas, sin embargo, no se realizarán estudios o encuestas a la población, sino que únicamente se analizara la calidad y cantidad de luz recibida a nivel de los ojos dentro de las instalaciones de la empresa “Conec-ta”, cuyo inmueble aparece en la Figura 38.

III.2.4 Laboratorio

Se utilizó un espacio controlado dentro del laboratorio de materiales de la UAM Xochimilco el cual cuenta con el instrumental necesario para realizar pruebas a los componentes y al prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, entre el equipamiento se cuenta con un foto-espectrómetro con esfera de integración.

El desarrollo y ensamble del prototipo se realizará en el laboratorio de automatización del edificio L3 de la FES Aragón.

III.2.5 Campo

Una vez desarrollado el prototipo y probados sus niveles y curvas de distribución espectral, se puso a prueba en las oficinas administrativas de la empresa “Conec-ta” que amablemente nos permitirá implementar y probar el sistema en sus instalaciones por cumplir con las características del tipo de espacio aprovechando la remodelación para instalar provisionalmente las luminarias del prototipo, además el espacio designado cuenta con iluminación natural indirecta de modo que no interfiera con la medición de las longitudes de onda de los led utilizando un fotospectrómetro portátil



colocado a 1.20m de altura que corresponde a la altura promedio de los ojos para conocer los niveles de luz a los que están expuestos y calcular el estímulo circadiano utilizando el modelo de transducción.



Figura 38 Fotografía panorámica del sitio de estudio en remodelación. Elaboración propia

Figura 11 Simulación con Dialux del sitio de estudio.

Elaboración propia

III.3 Instrumentos y técnicas de observación

III.3.1 Medición de variables cuantitativas

Las variables cuantitativas están relacionadas directamente con la calidad y cantidad de iluminación en el ambiente, por un lado, está la natural cuyas variables fueron medidas y comparadas con otros estudios y por otro lado, la artificial que es el principal interés en esta investigación y sus variables fueron medidas ante los cambios que genera el sistema de control desarrollado.

Se requiere un fotospectrómetro para observar las iluminarias led del prototipo y sus variables cuantitativas: nivel de iluminación y longitud de onda, con estas dos variables se calculó el estímulo circadiano.

El fotospectrómetro será utilizado en una primera fase en un ambiente controlado dentro de la esfera de integración del laboratorio de la UAM Xochimilco, ya que al ser hermética evita la presencia de iluminación natural para verificar que el sistema sea capaz de crear las mezclas y lograr modificar la longitud de onda y la iluminancia con precisión y a voluntad. Obteniendo una tabla de combinaciones básicas y sus resultados para usarlo como base en la programación de los

En campo se realizarán mediciones con el fotospectrómetro portátil



Figura 39 Fotospectrómetro de laboratorio y esfera de integración.

En la segunda fase se realizaron pruebas de campo para medir la luz solar recibida en un puesto de trabajo y conocer la cantidad y calidad de iluminación natural durante dos fines de semana sin el uso de luz artificial. Así mismo se compararon estas mediciones con otros estudios similares para corroborar el patrón de la luz natural y usarlo como base para el tipo de luz a generar de forma artificial.

Con estos valores se generan las tablas y ecuaciones para la programación del prototipo.

Una vez desarrollado y probado el prototipo en laboratorio con sus funciones dinámicas, se instaló en campo y con ayuda del fotospectrómetro portátil se realizó la tercera y última etapa para medir la cantidad y calidad de iluminación artificial dinámica corroborar si los niveles de luz y la longitud de onda es la esperada para producir el estímulo circadiano justo para mantener sincronizado el reloj biológico “estándar”.

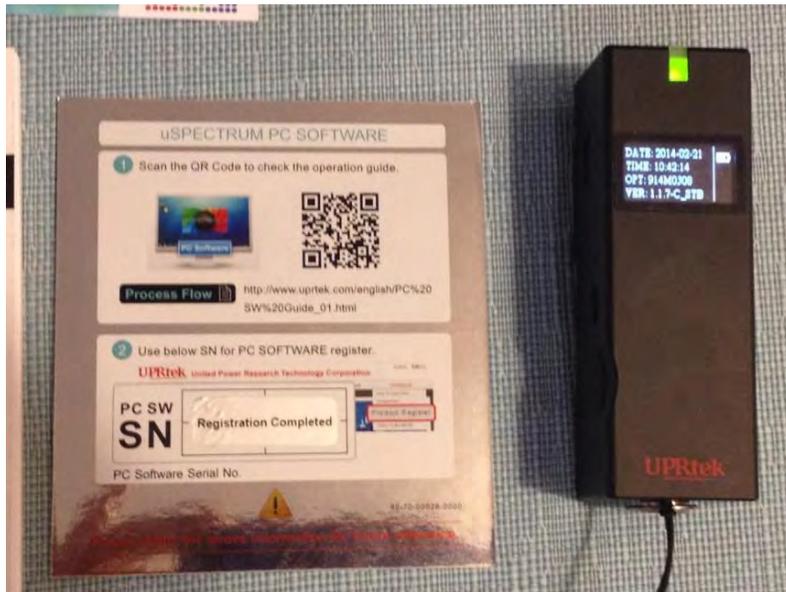


Figura 40 Fotospectrómetro portátil, elaboración propia.

III.4 Desarrollo del prototipo.

III.4.1 Dispositivos de entrada – Sensores.

La integración de sensores es uno de los principales diferenciadores de esta propuesta de prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables, ya que los dispositivos de iluminación circadiana “comerciales” encontrados durante esta investigación no cuentan con sensores de presencia ni mucho menos de iluminación natural.

Se propone incluir dispositivos para medir el nivel de iluminación ambiental para reducir el brillo de las luminarias con el doble propósito de ahorrar energía y de reducir la cantidad de iluminación circadiana cuando no sea adecuado.

El sensor usado para esta función es la fotorresistencia o resistencia dependiente de la luz, que consiste en una célula de Sulfuro de Cadmio, altamente estable, encapsulada con una resina epoxi transparente, resistente a la humedad. La respuesta espectral es similar a la del ojo humano. Su nivel de resistencia aumenta cuando el nivel de luz disminuye, este tipo de sensores son comúnmente usados en teléfonos inteligentes para ajustar el brillo de la pantalla de acuerdo a la luz ambiental.

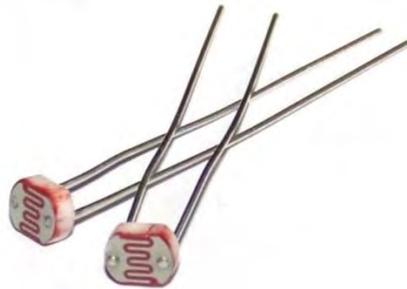


Figura 41 Fotorresistencia modelo GL5528. (PCBoard.ca, 2018)

Otro dispositivo de entrada que se incorporó es el sensor de presencia, el cual contribuye al ahorro energético al permitir al sistema conocer las luminarias que no se necesita mantener encendidas y si la programación así lo indica, permite atenuar la intensidad de luminarias sin ocupación pero que se encuentren cerca de áreas que sí están en uso para reducir los contrastes y brindar espacios más agradables como lo dictan los principios de diseño de iluminación.



Figura 42 Sensor infrarrojo de movimiento HC-SR505 Mini, (Sigma Electrónica LTDA, 2018)

III.4.2 Dispositivos de Salida – Luminaria

Después del controlador, las luminarias son el componente más importante del sistema pues el éxito de la sincronización circadiana depende de su capacidad para emitir las diferentes longitudes de onda e iluminancias para generar el estímulo circadiano adecuado a cada hora del día.

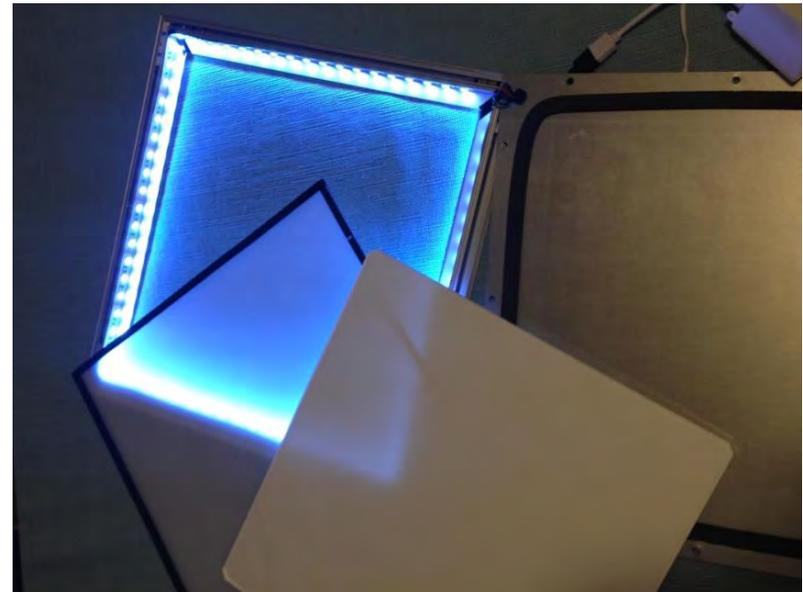


Figura 43 Componentes de la luminaria, elaboración propia.

Para este elemento se eligieron luminarias led RGB construidas a partir de tiras de led con los tres colores primarios, ensamblados en un gabinete compuesto por perfil



de aluminio, una placa reflejante, un refractor de acrílico de alta transmitancia y un difusor de acrílico.

Se utilizó inicialmente un panel de 300 por 300 milímetros y posteriormente se sustituyó por uno de 600 por 600 milímetros para poder brindar un mayor nivel de iluminación.

III.4.3 Control

El control del sistema está conformado por uno o más micro controladores Arduino pro-mini, cada uno controlando luminarias de forma individual, cada micro controlador cuenta con sus propios sensores que le permiten introducir información al programa sobre la presencia de personas o la cantidad de luz en el ambiente. Los micro controladores están conectados entre si por un bus de comunicación para intercambiar información y en su caso trabajar con un reloj central que permita mantener la sincronía del sistema y por consiguiente la sincronía del ciclo circadiano de los usuarios expuestos a la iluminación de este prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables.

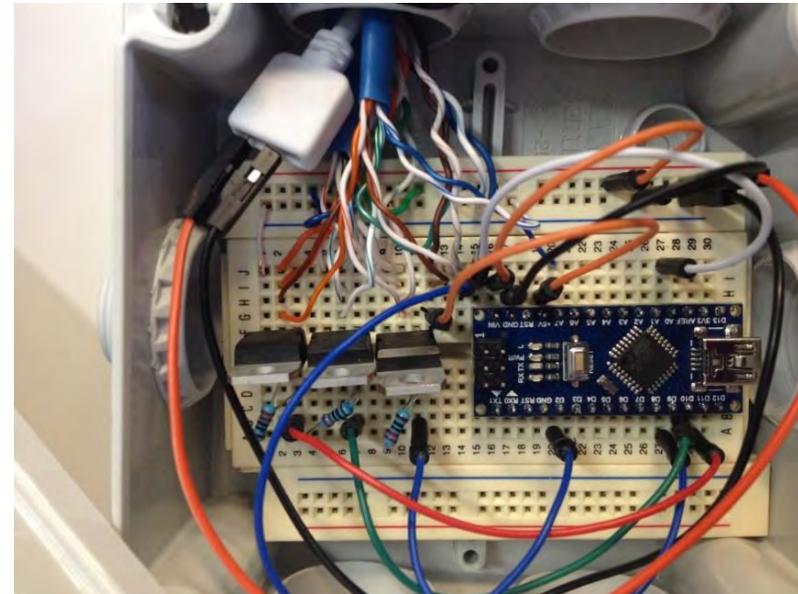
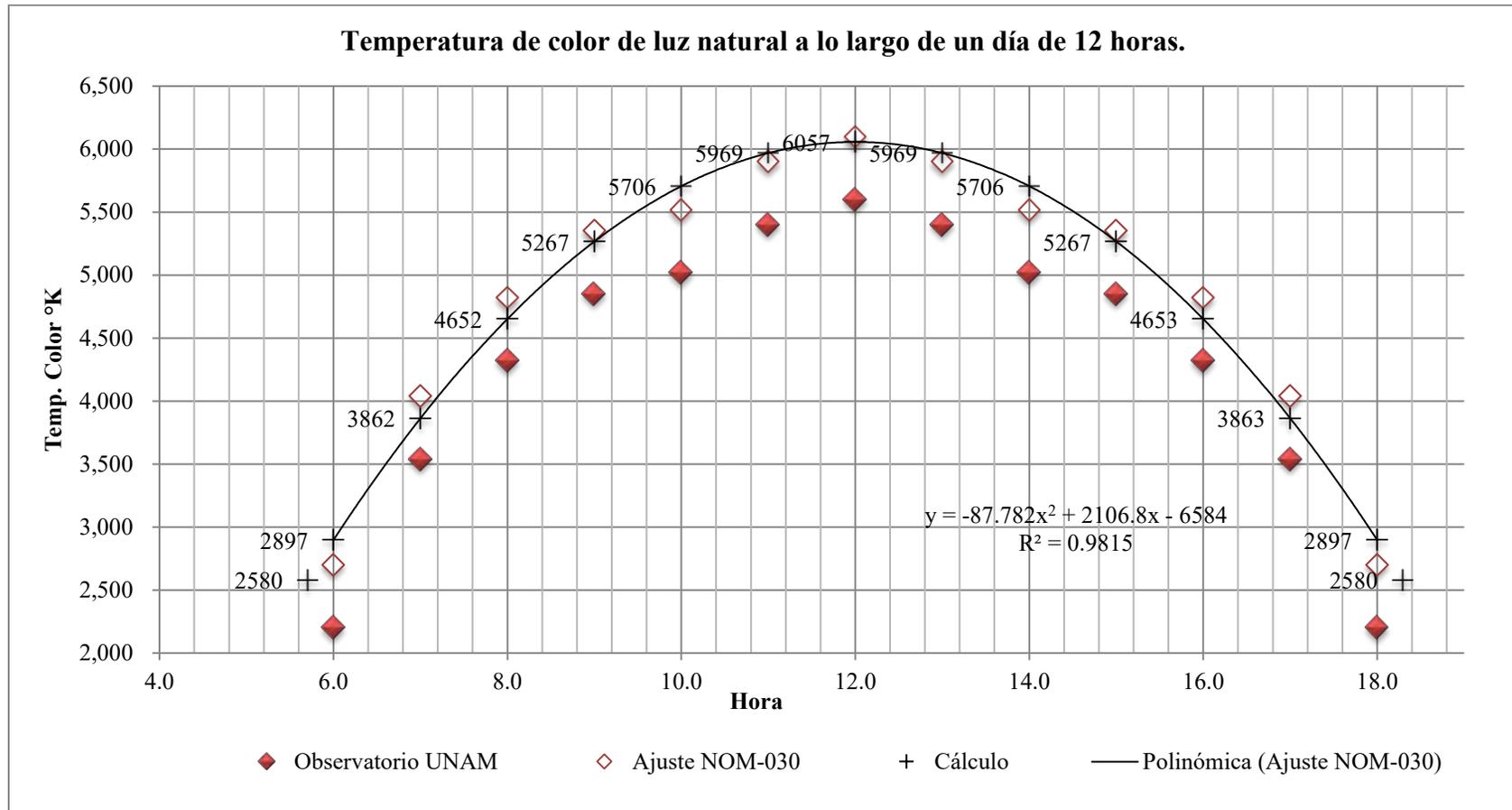


Figura 44 Prototipo de sistema de control, elaboración propia.

III.4.4 Lógica – Algoritmo

Partiendo de los datos obtenidos del observatorio de radiación solar de la UNAM respecto a la temperatura de color de la luz natural a lo largo del día, se representa una línea de tendencia y su fórmula para completar los datos del resto de los horarios como se observa en la Gráfica 15.



Gráfica 15 Temperatura de color de la luz natural a lo largo del día. Elaboración propia a partir de datos de (Aranda Molina, 2009, p. 69) y (Secretaría de Energía, 2012)

Como la Norma oficial mexicana NOM-030 señala los 2580 K como valor mínimo para la temperatura de color de las luminarias led, se aumentaron los valores de CCT de cada hora registrada por el observatorio de radiación solar y se obtuvo la

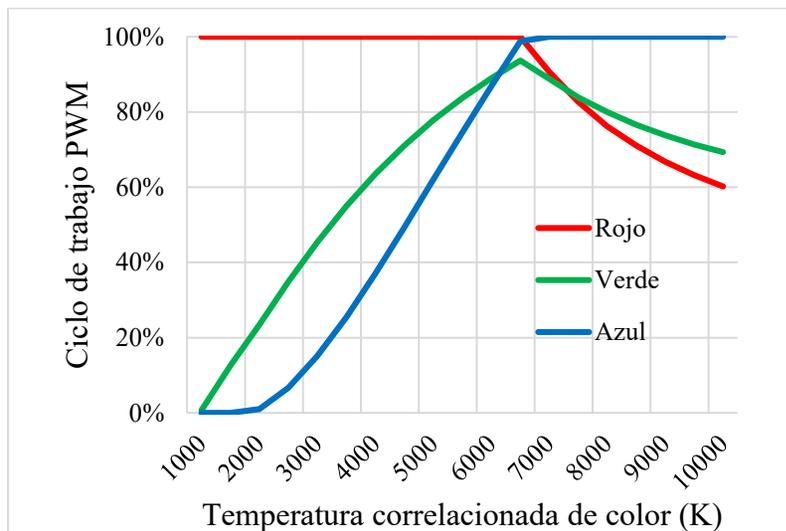
ecuación de la curva que representa la tendencia de los datos obteniendo la ecuación cuadrática:

$$y = -87.782x^2 + 2106.8x - 6584$$

Ecuación 10 Temperatura de color de la luz natural a lo largo del día.



Dicha ecuación forma parte del algoritmo que calcula la temperatura de color a adecuada dependiendo la hora del reloj central del sistema, para después realizar la conversión a valores RGB que pueden ser usados para la modulación por ancho de pulsos (PWM por sus siglas en inglés) de la fuente de energía de las luminarias con el fin de modificar el ciclo de trabajo de una cada color y generar las combinaciones adecuadas.



Gráfica 16 CCT contra valores RGB. Elaboración propia a partir de (Mitchell Charity, 2001)

Para calcular la equivalencia de la temperatura de color con el valor RGB o ciclo de trabajo PWM, se pueden emplear

la “Ecuación 6 XYZ a partir de datos espectrales (caso emisor)” y la “Ecuación 7 Transformación del espacio de color XYZ a RGB” de forma consecutiva; sin embargo, existe un método simplificado creado inicialmente por Mitchell Charity (2001) basado en estas mismas ecuaciones cuyo resultado se resume en la Gráfica 16, este método reduce el número de operaciones y fue adaptado por Tanner Helland (2012) al lenguaje de programación C para su uso en ordenadores y microcontroladores; facilitando su aplicación como parte del algoritmo del prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables.

III.4.5 Medio / Protocolo

Para interconectar los elementos del prototipo se utilizará cable UTP de cobre con 4 pares y terminales y conectores RJ45 para su fácil conexión y estandarización futura.

Se utilizará PWM para controlar la intensidad de las luminarias ajustando el ciclo de trabajo de los leds, lo cual implica que en un ciclo de trabajo completo las lamparas permanecen encendidas constantemente alcanzando el máximo brillo permitido por el voltaje y eficiencia del led, pero si se reduce el ciclo de trabajo a la mitad, los leds

encienden y apagan continuamente de forma imperceptible para el ojo humano, pero con el efecto de brillar solamente a la mitad de su capacidad total.

Debido a que el micro controlador tiene un voltaje de operación de cinco a doce volts corriente directa y que las lamparas led elegidas para este prototipo funcionan a doce volts corriente directa, se emplearon fuentes de poder de doce volts y transistores N-MOSFET; unipolar; 60V; 39A; 95W; TO220-3 conectados a los polos negativos de las lamparas led y el ánodo directamente a la fuente de poder para no rebasar la capacidad de carga de los puertos del micro controlador.

Para la comunicación entre micro controladores se utilizó el protocolo i2c de Arduino para comunicar cada luminaria con el control central, aprovechando uno de los pares del medio cableado con el que se interconectan en serie o bus y se asignó una dirección a cada luminaria con su microcontrolador a fin de poder recibir datos e instrucciones desde el control central o desde otros micro controladores mediante el esquema de multi-maestro como se ve en el siguiente ejemplo:

```
/**
 *
 * Sample Multi Master I2C implementation. Sends a
 button state over I2C to another
```

```
 * Arduino, which flashes an LED corresponding to
 button state.
 *
 * Connections: Arduino analog pins 4 and 5 are
 connected between the two Arduinos,
 * with a 1k pullup resistor connected to each
 line. Connect a push button between
 * digital pin 10 and ground, and an LED (with a
 resistor) to digital pin 9.
 *
 */

#include <Wire.h>

#define LED 9
#define BUTTON 10

#define THIS_ADDRESS 0x8
#define OTHER_ADDRESS 0x9

boolean last_state = HIGH;

void setup() {
  pinMode(LED, OUTPUT);
  digitalWrite(LED, LOW);

  pinMode(BUTTON, INPUT);
  digitalWrite(BUTTON, HIGH);

  Wire.begin(THIS_ADDRESS);
  Wire.onReceive(receiveEvent);
}

void loop() {
  if (digitalRead(BUTTON) != last_state){
    last_state = digitalRead(BUTTON);
    Wire.beginTransmission(OTHER_ADDRESS);
    Wire.send(last_state);
    Wire.endTransmission();
  }
}

void receiveEvent(int howMany){
  while (Wire.available() > 0){
```

```

boolean b = Wire.receive();
Serial.print(b, DEC);
digitalWrite(LED, !b);
}
Serial.println();
}

```

III.4.6 Funciones del sistema

En la Figura 45 se resumen los componentes y funciones del prototipo de control de iluminación para mejorar el confort en espacios habitables.



Figura 45 Funciones del sistema. Elaboración propia

III.4.7 Diagramas del sistema

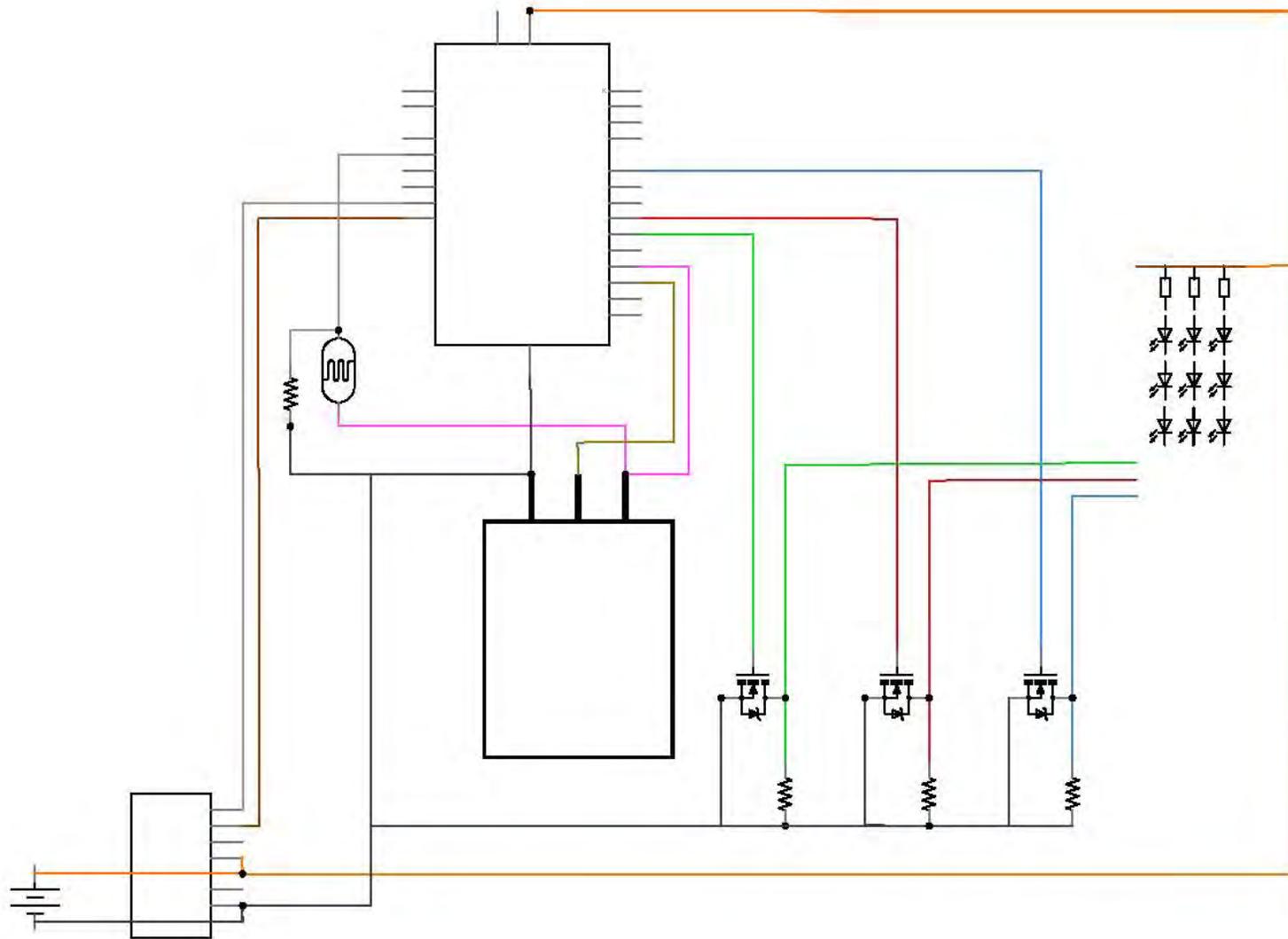


Figura 46 Diagrama esquemático del sistema. Elaboración propia.

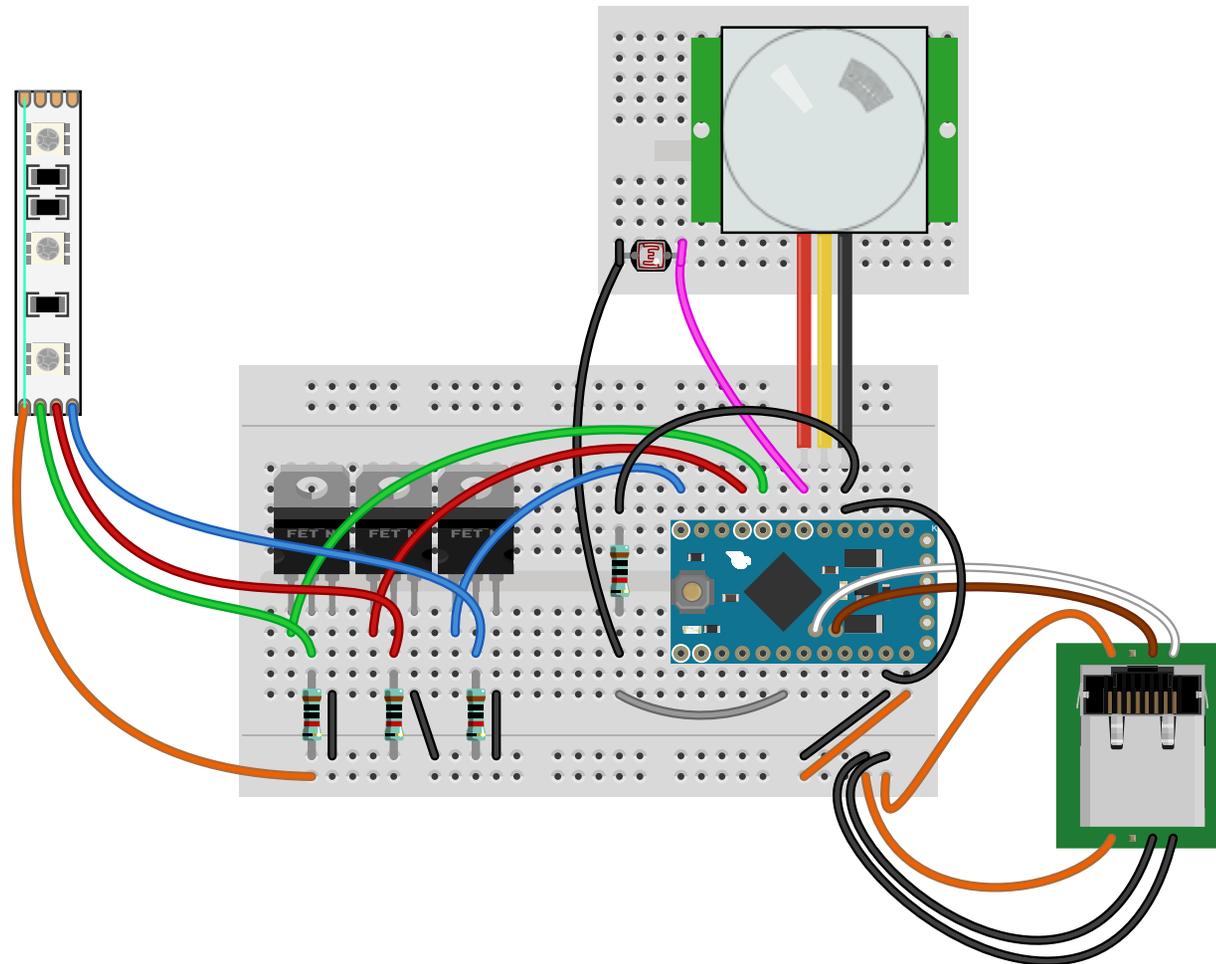


Figura 48 Diagrama Protoboard del sistema “esclavo” (luminaria). Elaboración propia.



III.4.8 Lógica de operación

1. La lógica de operación se refiere a la secuencia de acciones y condicionantes que el sistema realiza e interpreta para “tomar decisiones” que en este caso son preestablecidas. El ciclo se muestra con una sola luminaria, pero en realidad deberá considerar al menos dos luminarias para poder alternar entre iluminación de trabajo o ambiental de acuerdo al Diseño/Ubicación.
2. De forma inicial se declaran las variables Oc, Ln, R, G, B, Ub y Ac con valores que mantengan la Tira de LED apagada.
3. Se realiza el proceso Ocupación para censar si hay alguna persona presente en el rango de medición del Sensor PIR.
4. Se realiza el proceso Nivel Luz ambiental para medir el nivel de iluminación dentro del rango de la fotorresistencia LDR antes de que se encienda la tira LED.
5. Con estos dos procesos se obtienen nuevos valores para las variables Oc y Ln.
6. Se envían estos datos al procesamiento local para ser comunicados al procesamiento central incluyendo el número de lámpara que originó estos datos.
7. De forma paralela y previendo cortes de comunicación, el Procesamiento local evalúa los Valores de Oc y Ln junto con los valores actuales de R,G,B y Ub.
8. Para poder lograr el Procesamiento Central es posible introducir manualmente una Actividad diferente a la predeterminada.
9. Así mismo se pueden solicitar los Datos actuales.
10. Con el valor de Oc se realiza el proceso Diseño/Ubicación donde se define que a pesar de que no se reporte presencia de algún usuario la Tira LED podría o no encender a media potencia o no.
11. También se realiza el proceso Horario donde se calcula la hora actual de forma permanente, se puede sincronizar a través de la red o bien introducir manualmente.
12. También se realiza el proceso Niveles donde de acuerdo a la hora del día se calculan los valores R, G y B considerando el nivel de iluminación más alto para

la Ac seleccionada, esto considerando la longitud de onda que altere o no el reloj biológico.

13. Los tres procesos se evalúan para generar los valores R, G, B y Ub para el número de lámpara calculado.
14. Se envían estos datos al Procesamiento local correspondiente para evaluar la forma en que la Luz ambiental y la Ocupación disminuyen el valor RGB establecido como máximo desde el Procesamiento Central.
15. Paralelamente se reinicia el Procesamiento central para el siguiente número de lámpara.
16. De acuerdo a la evaluación se toma Potencia de la fuente de poder y se suministra la energía adecuada a la tira de LED.
17. Se reinicia la secuencia de forma local en la lámpara.

III.4.9 Pruebas en campo



Figura 49 Montaje de luminaria en plafón. Elaboración propia.





Figura 50 Montaje de luminaria en estación de trabajo. Elaboración propia.



Figura 51 Mediciones en campo con fotospectrómetro portátil. Elaboración propia.

III.4.10Codigo de programación

```

const int redPin = 11;
const int greenPin = 10;
const int bluePin = 9;

int ldrPin=0;           //analog pin reading 20-
870
float ldrReading;      //analog pin reading
int pirPin = 2;        // choose the input pin
(for PIR sensor)
// int pirState = HIGH; // we start, assuming
no motion detected
// int val = 0;         // variable for
reading the pin status
float dim=0;

unsigned int R;
unsigned int G;
unsigned int B;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  pinMode(pirPin, INPUT); // declare sensor as input
  pinMode(redPin, OUTPUT); // declare Red as output
  pinMode(greenPin, OUTPUT); // declare Green as
output
  pinMode(bluePin, OUTPUT); // declare Blue as
output

  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  int val = digitalRead(pirPin); // read input value
  ldrReading=analogRead(ldrPin); //get analog reading
  float off=1-(ldrReading/840)+dim;
  Serial.print("PIR=");
  Serial.println(val);

  if (val=LOW){
    dim=dim+.1;}
  if (off<=1){
    LUZ(dim);}

```

```

  if (off>1){
    setColourRgb(0, 0, 0);}
  else {
    dim=0;
    LUZ(dim); }
}

void LUZ(float dim)
{
  ldrReading=analogRead(ldrPin); //get analog reading
  float Brillo=1-(ldrReading/840)+dim;
  if (1-Brillo<=1){
    XYZ(Brillo);}
  else {setColourRgb(255, 150, 35);}
  Serial.println(ldrReading);
  Serial.print("Brillo=");
  Serial.println(Brillo);
  Serial.print("dim=");
  Serial.println(dim);
  delay(1000);
}

void XYZ (float Brillo) {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  float Y=43.194*(1-Brillo);
  float x1=0.51018;
  float y1=0.42015;
  float X = x1 * ( Y / y1 );
  float Z = ( 1 - x1 - y1 ) * ( Y / y1 );

  float var_X = X / 100; //X from 0 to 95.047
  (Observer = 2°, Illuminant = D65)
  float var_Y = Y / 100; //Y from 0 to 100.000
  float var_Z = Z / 100; //Z from 0 to 108.883

  float var_R = var_X * 3.2406 + var_Y * -1.5372 + var_Z
  * -0.4986;
  float var_G = var_X * -0.9689 + var_Y * 1.8758 + var_Z
  * 0.0415;
  float var_B = var_X * 0.0557 + var_Y * -0.2040 + var_Z
  * 1.0570;

```

```
if ( var_R > 0.0031308 ) {var_R = 1.055 * (pow(var_R, (
1 / 2.4 ))) - 0.055;}
else {var_R = 12.92 * var_R;}
if ( var_G > 0.0031308 ) {var_G = 1.055 * (pow( var_G,
( 1 / 2.4 ) )) - 0.055;}
else {var_G = 12.92 * var_G;}
if ( var_B > 0.0031308 ) {var_B = 1.055 * (pow( var_B ,
( 1 / 2.4 ) ) ) - 0.055;}
else {var_B = 12.92 * var_B;}

R = var_R * 255;
G = var_G * 255;
B = var_B * 255;
setColourRgb(R, G, B);
Serial.println(Y);
}

void setColourRgb (unsigned int R, unsigned int G,
unsigned int B) {
  analogWrite(redPin, R);
  analogWrite(greenPin, G);
  analogWrite(bluePin, B);
  Serial.print(R);
  Serial.print(",");
  Serial.print(G);
  Serial.print(",");
  Serial.println(B);
}
```

III.5 Conclusión

Como parte de la conclusión general se puede decir que la iluminancia deseada es difícil de lograr, los resultados de las pruebas tanto en laboratorio como en campo, obligan a aumentar la cantidad de lámparas por espacio de trabajo a fin de lograr los niveles solicitados por los reglamentos, esto puede corregirse en una nueva versión del prototipo donde se incluyan luminarias más eficientes y con una mejor relación lm/w ya sea modificando el difusor o bien cambiando los leds RGB.

Así mismo el algoritmo y programa generado puede aplicarse a otras tecnologías RGB o incluso adaptarse para luminarias AWB estando preparada para los cambios tecnológicos con un esfuerzo mínimo de desarrollo, ya que la parte más complicada respecto a la atenuación manteniendo las coordenadas de color ya está resuelta.



Referencias

- 123RF Limited. (2017). Ojo y visión. estructura de la retina. Conos y bastones. Recuperado el 19 de noviembre de 2017, a partir de /photo_28075830_ojo-y-vision-estructura-de-la-retina-conos-y-bastones.html
- Afonso, P., Fonseca, M., & Pires, J. F. (2017). Impact of working hours on sleep and mental health. *Occupational Medicine*, 67(5), 377–382. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqx054>
- Appleman, K., Figueiro, M. G., & Rea, M. S. (2013). Controlling light–dark exposure patterns, rather than sleep schedules, determines circadian phase. *Sleep medicine*, 14(5), 456–461. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2012.12.011>
- Aranda Molina, A. I. (2009). *Diseño de sistemas de iluminación biológico-dinámica en áreas de oficinas en México*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Recuperado a partir de <http://eds.a.ebscohost.com.pbidi.unam.mx:8080/eds/detail/detail?vid=0&sid=6cd2a959-d038-46f0-847f-a7e720ad6233%40sessionmgr4006&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT11ZHMtbG12ZQ%3d%3d#AN=tes.TES01000652751&db=cat02029a>
- Atkinson, S., & Pando Orellana, N. L. (Eds.). (1993). *Iluminacion residencial: ideas, accesorios, instalaciones*. México: Editorial Trillas.
- Axel Sánchez. (2014, octubre 13). El valor del mercado de iluminación LED crece 456%. *El Financiero*. Recuperado a partir de <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/el-valor-del-mercado-de-iluminacion-led-crece-456.html>
- Baldwin, H. (2014). Working Tired. *Aviation Week & Space Technology*, 176(39), 42.
- Barquera, S., Campos-Nonato, I., Hernández-Barrera, L., Pedroza, A., & Rivera-Dommarco, J. A. (2013). Prevalencia de obesidad en adultos mexicanos, ENSANUT 2012. *Salud publica de Mexico*, 55, S151–S160.
- BBC. (2013, enero 17). Bioluminiscencia: ¿por qué la naturaleza produce luz? *BBC Mundo*. Recuperado a partir de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/01/130116_bioluminiscencia_naturaleza_produce_luz
- Beverly & Pack. (2011, enero 29). Aurora Borealis, the colored lights seen in the skies arou... | Flickr. Recuperado el 5 de noviembre de 2017, a partir de <https://www.flickr.com/photos/walkadog/5399450126/>
- Boubekri, M. (2008). *Daylighting, architecture and health: building design strategies* (1. ed). Amsterdam: Elsevier / Architectural Press.



- Boubekri, M., Cheung, I. N., Reid, K. J., Wang, C.-H., & Zee, P. C. (2014). Impact of Windows and Daylight Exposure on Overall Health and Sleep Quality of Office Workers: A Case-Control Pilot Study. *Journal of Clinical Sleep Medicine*. <https://doi.org/10.5664/jcsm.3780>
- Boyce, P. R. (2014). *Human Factors in Lighting, Third Edition* (3 edition). Boca Raton: CRC Press.
- Chandra, P., Wolfenden, L. L., Ziegler, T. R., Tian, J., Luo, M., Stecenko, A. A., ... Tangpricha, V. (2007). Treatment of vitamin D deficiency with UV light in patients with malabsorption syndromes: a case series. *Photodermatology, photoimmunology & photomedicine*, 23(5), 179–185. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0781.2007.00302.x>
- Chris Kotsiopoulos. (2013). *Blue - red lightnings*. Recuperado a partir de <http://greeksky.gr/gallery/weather-atmospheric/?image=774>
- Cleveland, C. J., & Morris, C. G. (2013). *Handbook of Energy: Diagrams, Charts, and Tables*. Newnes.
- Collado, M. J. S., msobran@mx. up. m. (2009). Síndrome del edificio enfermo. (Spanish). *SICK BUILDING SYNDROME. (English)*, (16), 93–104.
- Colombo, E., & O'Donnell, B. (2006). Capítulo 2 Luz, color y visión. En *Manual de Iluminación Eficiente*. Buenos Aires: ELI (Efficient Lighting Initiative) Argentina y Universidad Tecnológica Nacional. Recuperado a partir de <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap02.pdf>
- CommScope Inc. (2014). A comparison of low-voltage and overlay lighting control systems. Recuperado a partir de <http://www.findwhitepapers.com/force-download.php?id=40458>
- Consulta Mitofsky. (2015, abril). El sueño en la vida del mexicano. Recuperado el 28 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.consulta.mx/index.php/estudios-e-investigaciones/internautas-opinan/item/684-el-sueno-en-la-vida-del-mexicano>
- Daniel Metz. (2001). Le modèle CIE XYZ. Recuperado el 11 de diciembre de 2017, a partir de <http://www.profil-couleur.com/ec/114b-modele-xyz.php>
- Davis, W., & Ohno, Y. (2005). Toward an improved color rendering metric (Vol. 5941, pp. 59411G-59411G – 8). <https://doi.org/10.1117/12.615388>
- Dhiram Shah. (2009, agosto). Philips Simplicity project - Newlaunches. Recuperado el 24 de julio de 2016, a partir de http://newlaunches.com/archives/philips_simplicity_project.php

- Economista, R. / E. (2012, marzo 16). Trastorno de sueño, potencial causa de accidentes. Recuperado a partir de <http://eleconomista.com.mx/>
- Ekström, J. G., & Beaven, C. M. (2014). Effects of blue light and caffeine on mood. *Psychopharmacology*, 231(18), 3677–3683. <https://doi.org/10.1007/s00213-014-3503-8>
- Erice-Oronoz, S., & Ibérica, P. (2010). El ahorro de energía en oficinas gracias a una buena iluminación. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 85(3). Recuperado a partir de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=00127361&AN=48966426&h=lqv%2B0E1TY7UT5X88cb9aUNMPefr9JqWaTj9EU8vI%2FWSYYBaGG7%2BDTsrKUKRLb3iaygkTJ1cvEguSwivBGeODGg%3D%3D&crl=c>
- espressoApps. (2017). espresso Mind Map. Recuperado el 10 de septiembre de 2017, a partir de <http://www.espressoapps.ch/windows/es/MindMap>
- Felipe Silva. (2010). Trastornos del Ritmo Circadiano del Sueño: fisiopatología, clasificación y tratamientos. *Revista Memoriza*, 7, 1–13.
- Figueiro, M. G., Gonzalez, K., & Pedler, D. (2016, octubre). Designing with Circadian Stimulus. *LD+A Magazine | IES*. Recuperado a partir de http://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/LDA_CircadianStimulus_Oct2016.pdf
- Ford, E. S., Cunningham, T. J., & Croft, J. B. (2015). Trends in Self-Reported Sleep Duration among US Adults from 1985 to 2012. *Sleep*, 38(5), 829–832. <https://doi.org/10.5665/sleep.4684>
- Gooley, J. J., Chamberlain, K., Smith, K. A., Khalsa, S. B. S., Rajaratnam, S. M. W., Van Reen, E., ... Lockley, S. W. (2011). Exposure to Room Light before Bedtime Suppresses Melatonin Onset and Shortens Melatonin Duration in Humans. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 96(3), E463–E472. <https://doi.org/10.1210/jc.2010-2098>
- Grandin, L. D., Alloy, L. B., & Abramson, L. Y. (2006). The social zeitgeber theory, circadian rhythms, and mood disorders: Review and evaluation. *Clinical Psychology Review*, 26(6), 679–694. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2006.07.001>
- Gutiérrez, G. (2014, mayo 25). Cuarenta millones de mexicanos con insomnio: Reyes Haro Valencia/Director de la Clínica de Trastorno del Sueño de la UNAM. *Siempre!*, 60(3180), 96+.
- Horst Frank. (2006). *Espectro electromagnético*. Recuperado a partir de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Electromagnetic_spectrum-es.svg
- howsleepsworks.com. (2017). HOW SLEEP WORKS - SLEEP-WAKE HOMEOSTASIS. Recuperado el 13 de diciembre de 2017, a partir de https://www.howsleepsworks.com/how_homeostasis.html

- IIMEL. (2017a). El cronotipo y su importancia. Recuperado el 6 de mayo de 2018, a partir de <http://www.iimel.es/index.php/11-que-es-la-melatonina/37-el-cronotipo-y-su-importancia>
- IIMEL. (2017b). Instituto Internacional de la Melatonina. Recuperado el 29 de abril de 2018, a partir de <http://www.iimel.es/>
- Iluminet, por. (2010, enero 5). En México, 18% de la energía eléctrica se destina a iluminación. Recuperado el 14 de enero de 2018, a partir de <http://www.iluminet.com/en-mexico-18-de-la-energia-electrica-se-destina-a-iluminacion/>
- Instituto para la Seguridad de las Construcciones en el Distrito Federal. Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico (2011). Recuperado a partir de <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/r406001.pdf>
- Ivet Rodriguez. (2012, marzo). Led vs fluorescentes: la batalla - Industria - Manufactura.mx. Recuperado el 14 de enero de 2018, a partir de <http://www.manufactura.mx/industria/2012/03/06/led-vs-fluorescentes-la-batalla>
- Jones Lang LaSalle, & Michael Case. (2017). J.L.L. 3-30-300 Calculator. Recuperado el 20 de agosto de 2017, a partir de <https://3-30-300.jll.com/>
- Juslén, H., Wouters, M., & Tenner, A. (2007). The influence of controllable task-lighting on productivity: a field study in a factory. *Applied Ergonomics*, 38(1), 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.01.005>
- Kerr, D. (2010). The CIE XYZ and xyY Color Spaces, (1), 1–16.
- Kessler, R. C., Berglund, P. A., Coulouvrat, C., Hajak, G., Roth, T., Shahly, V., ... Walsh, J. K. (2011). Insomnia and the Performance of US Workers: Results from the America Insomnia Survey. *Sleep*, 34(9), 1161–1171. <https://doi.org/10.5665/SLEEP.1230>
- Koninklijke Philips Electronics N.V. (2011, marzo). Feel good, learn better with SchoolVision. Recuperado a partir de http://www.lighting.philips.com/b-dam/b2b-li/en_AA/systems/SchoolVision/downloads/schoolvision_principals.pdf
- Lardner, D. (1833). *Treatise on Heat*. Longman, Rees, Orme, Brown, Green & Longman.
- Lighting Research Center, RPI. (2009). Lighting Education Online. Recuperado el 29 de mayo de 2016, a partir de <http://www.lrc.rpi.edu/education/learning/intro.asp?mode=terminology>
- Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D., Brown, T., Cooper, H., Czeisler, C. A., ... O'Hagan, J. B. (2013, octubre 18). Irradiance Toolbox. Recuperado a partir de <http://www.cell.com/cms/attachment/2037610304/2051991639/mmc1.pdf>
- Luctra. (2018). TABLE PRO | LUCTRA®. Recuperado el 31 de marzo de 2018, a partir de <https://www.luctra.eu/en/products/table-lamps/table-pro/>

- Luis Deschères. (2015, enero 14). Los efectos visuales y biológicos de la Luz | | iluminet. Recuperado el 18 de mayo de 2016, a partir de <http://www.iluminet.com/los-efectos-visuales-y-biologicos-de-la-luz/>
- Luo, J., Sands, M., Wactawski-Wende, J., Song, Y., & Margolis, K. L. (2012). Sleep Disturbance and Incidence of Thyroid Cancer in Postmenopausal Women The Women's Health Initiative. *American Journal of Epidemiology*, kws193. <https://doi.org/10.1093/aje/kws193>
- MacRae, F. (2006). Long Hours at the Office Can Leave You “Jetlagged”. *Daily Mail*, 41.
- Marcelo Gattass. (2016, marzo 9). TabelasCor.xls. Instituto Tecgraf/PUC-Rio. Recuperado a partir de <http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~mgattass/livro/TabelasCor.xls>
- Mariana G. Figueiro. (2015, octubre). *Overview of light, sleep an circadian rhythms as they relate to college students*. Troy, Nueva York.
- McCrone, J. (2002). Tetrachromats. *The Lancet Neurology*, 1(2), 136. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(02\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(02)00051-0)
- Megan Perius, & WebMD LLC. (2017, junio 25). Human Biology Online Lab / Sleep Homeostasis by Megan Perius. Recuperado el 13 de diciembre de 2017, a partir de <http://humanbiologylab.pbworks.com/w/page/118807131/Sleep%20Homeostasis%20by%20Megan%20Perius>
- Metropolitan Areas (Mexico): Metropolitan Areas - Population Statistics, Charts and Map. (2015, marzo 15). Recuperado el 5 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.citypopulation.de/php/mexico-metro.php>
- Mitchell Charity. (2001, junio). Blackbody color datafile. Recuperado el 18 de junio de 2018, a partir de http://www.vendian.org/mncharity/dir3/blackbody/UnstableURLs/bbr_color.html
- Molina, A. L., & Londoño, Á. (2012). Vitamina D y piel. (Spanish). *Vitamin D and skin. (English)*, 20(3), 239–252.
- Mouli, S., Palaniappan, R., & Sillitoe, I. P. (2015). A Configurable, Inexpensive, Portable, Multi-channel, Multi-frequency, Multi-chromatic RGB LED System for SSVEP Stimulation. En A. E. Hassanien & A. T. Azar (Eds.), *Brain-Computer Interfaces* (pp. 241–269). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10978-7_9
- Naix'ieli Castillo García, & DGDC-UNAM. (2011, octubre 17). Programa computacional simula los ciclos de sueño para estudiar el Jet Lag Social. Recuperado el 25 de julio de 2016, a partir de http://ciencia.unam.mx/leer/33/Programa_computacional_simula_los_ciclos_de_sueno_para_estudiar_el_iJet_Lagi_Social



- Natalia Vitela. (2014, junio 1). ¿Sufres presentismo? *Mural*. Recuperado a partir de <http://www.mural.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=248196&md5=31b8c761c49b8f70cd09cb32dbc57848&a=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe>
- National Sleep Foundation. (2015, febrero 2). National Sleep Foundation Recommends New Sleep Times. Recuperado el 28 de mayo de 2017, a partir de <https://sleepfoundation.org/press-release/national-sleep-foundation-recommends-new-sleep-times/page/0/1>
- Nobel Media AB. (2014). The Nobel Prize in Physics 2014. Recuperado el 19 de noviembre de 2017, a partir de https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/
- Nobel Media AB. (2017, octubre 7). The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2017 - Prize Announcement. Recuperado el 8 de octubre de 2017, a partir de https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2017/announcement.html
- OECD. (2016a). Employment - Hours worked - OECD Data. Recuperado el 30 de julio de 2017, a partir de <http://data.oecd.org/emp/hours-worked.htm>
- OECD. (2016b). Time use across the world. Recuperado el 21 de noviembre de 2016, a partir de https://www.oecd.org/gender/data/OECD_1564_TUSupdatePortal.xls
- Oropeza Abúndez, C., & Instituto Nacional de Salud Pública (Mexico) (Eds.). (2012). *Encuesta nacional de salud y nutrición 2012: resultados nacionales* (Primera edición). Cuernavaca, Morelos, México: Instituto Nacional de Salud Pública : Secretaría de Salud.
- OSRAM GmbH. (2016, abril 28). Human Centric Light - Trade Press • Osram Lighting Solutions News | Lighting Solutions. Recuperado el 16 de marzo de 2018, a partir de https://www.osram.es/ls/prensa/st_augustinus/index.jsp
- OSRAM GmbH. (2017, enero). Products for Human Centric Lighting | Lighting Solutions. Recuperado el 16 de marzo de 2018, a partir de <https://www.osram.com/ls/light-for/office/human-centric-lighting/products/index.jsp>
- PCBoard.ca. (2018). GL5528 Light Sensitive Resistor (LDR). Recuperado el 18 de junio de 2018, a partir de <https://www.pcboard.ca/gl5528-light-dependent-resistor.html>
- Philippe Rahm. (2001). i-weather.org - artificial climate based on human physiology. Recuperado el 2 de diciembre de 2015, a partir de http://www.i-weather.org/rhythm_melatonin.html
- Philips Lighting Holding B.V. (2018, mayo). PowerBalance Tunable White, recessed Recessed Indoor Luminaires. Recuperado el 16 de marzo de 2018, a partir de http://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fp910502042503-pss-es_es

- Price, L. L. A., Lucas, R. J., Peirson, S. N., Berson, D., Brown, T., Cooper, H., ... others. (2014). *Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013* (TECHNICAL NOTE No. CIE TN 003:2015). Recuperado a partir de <http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/robert.lucas/Lucas%20et%20al%202014%20suppl%20text.pdf>
- Quantotec. (2016, abril). Color y Luz. Colorimetria. Recuperado el 29 de mayo de 2016, a partir de <http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning : Physics and Effects*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press. Recuperado a partir de <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=589154&lang=es&site=eds-live>
- Rea, M., Figueiro, M., Bierman, A., & Hamner, R. (2012). Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system. *Lighting Research and Technology*, 44(4), 386–396. <https://doi.org/10.1177/1477153511430474>
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., & Bullough, J. D. (2010a). Circadian light. *Journal of Circadian Rhythms*, 8, 2. <https://doi.org/10.1186/1740-3391-8-2>
- Rea, M. S., Figueiro, M. G., Bierman, A., & Bullough, J. D. (2010b). Circadian light. *Journal of Circadian Rhythms*, 8, 2. <https://doi.org/10.1186/1740-3391-8-2>
- Rea, M. 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>
- Redline, S., & Berger, N. A. (Eds.). (2014). *Impact of Sleep and Sleep Disturbances on Obesity and Cancer*. New York, NY: Springer New York. Recuperado a partir de <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-9527-7>
- Rensselaer Polytechnic Institute. (2015). Light and Health | Research Programs | LRC. Recuperado el 23 de abril de 2017, a partir de <http://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/>
- Reyes Haro Valencia. (2014, enero 2). Casi la mitad de los trastornos del sueño de la población mexicana son casos de insomnio. Recuperado el 15 de febrero de 2016, a partir de http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2014_004.html
- Ricardo Gómez Garrido. (2014). *Santa Fé Cd. de México*. Recuperado a partir de https://scontent.fmex7-1.fna.fbcdn.net/v/t1.0-9/10003264_10152473562623455_1853991061472268474_n.jpg?oh=59e38ca4a5d269fbfc3a1c9f3351375d&oe=5AAF8AA7



- Ritenour, A. E., Morton, M. J., McManus, J. G., Barillo, D. J., & Cancio, L. C. (2008). Lightning injury: A review. *Burns*, 34(5), 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2007.11.006>
- Roenneberg, T., & Mellow, M. (2007). Entrainment of the Human Circadian Clock. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 72, 293–299. <https://doi.org/10.1101/sqb.2007.72.043>
- Roenneberg, Till. (2012). *Internal Time: Chronotypes, Social Jet Lag, and Why You're So Tired*. Harvard University Press.
- Roenneberg, Till, Allebrandt, K. V., Mellow, M., & Vetter, C. (2012). Social Jetlag and Obesity. *Current Biology*, 22(10), 939–943. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.03.038>
- Roenneberg, Till, Allebrandt, K. V., Mellow, M., & Vetter, C. (2013). Supplemental Information Social Jetlag and Obesity. Recuperado a partir de <https://www.rug.nl/research/portal/files/6779047/2012CurrBiolRoennebergSuppD.pdf>
- Romero Morales, C. (2011). Domótica e inmótica viviendas y edificios inteligentes / Cristobal Romero Morales.
- Rostron, J. (2008). Sick building syndrome: A review of causes, consequences and remedies. *Journal of Retail & Leisure Property*, 7(4), 291–303. <https://doi.org/10.1057/rlp.2008.20>
- Ryer, A. (1997). *Light measurement handbook*. Newburyport, MA: International Light.
- Sahin, L., & Figueiro, M. G. (2013). Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon. *Physiology & Behavior*, 116–117, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2013.03.014>
- Saito, Y., & Uemura, S. (2000). Field emission from carbon nanotubes and its application to electron sources. *Carbon*, 38(2), 169–182. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00139-6)
- Sakurambo. (2007). *Illustration of the CIE 1931 color space. This is a vectorized version of Image:CIExy1931.png by User:PAR. The spectral colours are embedded as a JPEG raster image with SVG blur applied to allow scaling to any size. From the description of Image:CIExy1931.png*: Recuperado a partir de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931.svg>
- Salinas, P. J. (2011). El insomnio ¿Le quita el sueño? *MedULA*, 20(2), 99–101.
- Secretaría de Energía. NORMA Oficial Mexicana NOM-030-ENER-2012, Eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (LED) integradas para iluminación general (2012). Recuperado a partir de <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4768/sener/sener.htm>
- Secretaría de Energía, & Agencia Internacional de Energía. (2011). *Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos*. México. Recuperado a partir de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85305/Bibliograf_a_6.pdf

- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. NORMA Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. (2008).
- Sigma Electrónica LTDA. (2018). HC-SR505. Recuperado el 18 de junio de 2018, a partir de <https://www.sigmaelectronica.net/producto/hc-sr505/>
- SLE. (2016, octubre). Human centric office | Smart Lighting Engineering. Recuperado el 23 de julio de 2017, a partir de <http://www.sleprojects.com>
- Smart Lighting Engineering. (2016). Human centric office | HCL System Brochure. Recuperado el 23 de julio de 2017, a partir de http://www.sleprojects.com/files/hcl_BROCHURE_A5.pdf
- Stan Walerczyk. (2012, junio). Human Centric Lighting. *Architectural SSL*. Recuperado a partir de <http://humancentriclighting.com/wp-content/uploads/2012/07/Stan-Article-SSL1.pdf>
- Street, D., & Suite, N. W. (2010). International Dark-Sky Association Visibility , Environmental , and Astronomical Issues Associated with Blue-Rich White Outdoor Lighting, 23.
- Tanner Helland. (2012, septiembre 18). How to Convert Temperature (K) to RGB: Algorithm and Sample Code. Recuperado el 15 de mayo de 2017, a partir de <http://www.tannerhelland.com/4435/convert-temperature-rgb-algorithm-code/>
- Taylor, A. (2000). *Illumination fundamentals*. Troy, Nueva York: Rensselaer Polytechnic Institute. Recuperado a partir de <http://www.lrc.rpi.edu/publicationDetails.asp?id=211>
- Tsuei, C.-H., & Sun, W.-S. (2011). Momentary adjustment means for simulating the sunlight color temperature, hues and brightness with RGB LEDs in indoor lighting. *Physics Procedia*, 19, 239–243. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.06.155>
- VELUX Group. (2013). Daylight calculations and measurements - Daylight, Energy and Indoor Climate Book. Recuperado el 27 de noviembre de 2017, a partir de <http://www.velux.com/deic/daylight/daylight-calculations-and-measurements>
- Vetter, C., Juda, M., Lang, D., Wojtysiak, A., & Roenneberg, T. (2011). Blue-enriched office light competes with natural light as a zeitgeber. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 37(5), 437–445. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3144>
- Wright, K. P., Hughes, R. J., Kronauer, R. E., Dijk, D.-J., & Czeisler, C. A. (2001). Intrinsic near-24-h pacemaker period determines limits of circadian entrainment to a weak synchronizer in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(24), 14027–14032.
- Yoshi Ohno & Wendy Davis, NIST. (2008, mayo 5). NIST CQS simulation 7.4.xls. Recuperado el 2 de marzo de 2016, a partir de <http://cie2.nist.gov/TC1-69/NIST%20CQS%20simulation%207.4.xls>



Anexos

Fichas técnicas de los equipos utilizados.

Pruebas de fotospectrómetro.

Cálculo de estímulo circadiano.

