

Universitat Politècnica de Catalunya
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
UPC – ETSAB

Trabajo de Fin de Máster

La reproducción instantánea de la luz natural mediante tecnologías. Evaluación y posibilidades

Para la obtención del Título de:

Máster Oficial Universitario
Estudios Avanzados en Arquitectura
Línea de Especialización
Innovación Tecnológica en la Arquitectura

Presentado por:

Arq. Jazmín Nathaly Rivera Morla

Director:

Dr. Arq. Adrián Muros i Alcojor

Barcelona, 5 de Julio del 2017

Dedicado a Dios,
a mis padres Luis y Consuelo
y a mis hermanos Andreita y Luis Alberto.

Los amo mucho.

Agradecimientos especiales:

A mi tutor de tesis, el Dr. Arq. Adrián Muros i Alcojor, por la orientación y ayuda que me brindó durante la realización del trabajo de investigación, el cual ha despertado en mí un gran interés por la iluminación.

A mis amigos, por su apoyo incondicional.

Y a todos quienes me acompañaron en este camino.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Objetivos	12
1.2. Justificación	13
1.3. Proceso metodológico	14
1.4. Viabilidad de la investigación	15
1.5. Hipótesis	16
CAPÍTULO 2. LA LUZ NATURAL	18
2.1. Magnitudes y propiedades	19
2.2. Características de la luz natural	21
2.2.1 Fuente de luz	21
2.2.2. Aspectos geográficos	23
2.2.3. Aspectos arquitectónicos	25
2.3. Efectos de la luz natural	27
2.3.1. Efectos biológicos	27
2.3.2. Efectos psicológicos	29
2.3.3. Efectos térmicos	31
2.3.4. Efectos de la luz sobre la actividad	31
2.3.5. Efectos de la luz sobre los objetos y superficies	31
CAPÍTULO 3. LA LUZ ARTIFICIAL	33
3.1. Iluminación con LEDs	34
3.1.1. Generalidades	34
3.1.2. Características y ventajas de los LEDs	36
3.2. Criterios de iluminación que determinan el ambiente luminoso y el confort visual	39
3.2.1. Distribución de luminancias	39
3.2.2. Nivel de iluminancia	39
3.2.3. Deslumbramiento	41
3.2.4. Color en el espacio visual	42
3.3. Percepción visual del ambiente luminoso	44

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DE LUZ NATURAL CON LEDS EN EL INTERIOR DE UN ESPACIO	49
4.1. Iluminación biodinámica	49
4.1.1. Bombillas biodinámicas existentes en el mercado	50
4.2. Simulación de la luz natural programada	57
4.3. Simulación de luz natural instantánea	63
4.3.1. Descripción del sistema de iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs	65
4.3.2. Implementación del sistema de iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs en las aulas de la ETSAB	67
4.3.3. Comparación de sistema de simulación de luz natural instantánea con conductos solares	72
CAPÍTULO 5. FASE EXPERIMENTAL	75
5.1. Descripción del experimento	75
5.1.1. Lugar del experimento	75
5.1.2. Verificación y obtención de dispositivos	76
5.2. Encuestas	82
5.2.1. Participantes y pre-instrucción	83
5.3. Resultados	84
5.3.1. Hora de la mañana. 10h00	84
5.3.2. Hora de la tarde. 14h00	96
5.3.3. Hora de la tarde – noche. 18h00	108
5.3.4. Horas combinadas. 10h00 – 14h00 – 18h00	120
5.4. Conclusiones del experimento	129
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXOS	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Espectro de radiación electromagnética.	18
Figura 2.	Lumen, candela y lux.	20
Figura 3.	Corte vertical del ojo y corte transversal ampliado de un fragmento de retina.	27
Figura 4.	Ritmo circadiano, secreción de hormona.	28
Figura 5.	Longitud de onda del espectro de LED RGB.	34
Figura 6.	Longitud de onda del espectro LED de Ledmotive.	35
Figura 7a.	Regulación analógica con diferentes niveles de regulación.	37
Figura 7b.	Regulación con PWM.	37
Figura 7c.	Regulación combinada analógica y PWM.	37
Figura 8.	Ejemplo de transición de día en los espacios de un museo.	46
Figura 9.	Simulación del funcionamiento del sistema Ledmotive en el interior de una oficina en el día y en la noche.	59
Figura 10.	Luminaria propuesta para implementar en el aula C-B7	66
Figura 11.	Ubicación de aulas de la ETSAB donde se implementará el sistema lumínico propuesto.	67
Figura 12.	Plano de condición actual del aula C-B7.	68
Figura 13.	Plano de instalación eléctrica propuesta para el aula C-B7.	70
Figura 14.	Plano de instalación del sistema lumínico propuesto en el aula C-B7.	73
Figura 15.	Ubicación del aula C-B4 en la ETSAB.	75
Figura 16.	Elementos lumínicos que componen la iluminación natural y artificial dentro del aula C-B4.	78
Figura 17.	Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz artificial. Lámparas fluorescentes.	79
Figura 18.	Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz artificial. Bombilla biodinámica LIFX a 5500K.	79
Figura 19.	Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz natural. Conductos solares DEPLOSUN.	80
Figura 20.	Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz natural. Exterior de ventana en el aula C-B4.	80
Figura 21.	Distribución espectral (izquierda) e índice de reproducción cromática (derecha) de la luz exterior a 5214K.	84
Figura 22.	Edades de los participantes (izquierda) y distribución de género de los participantes (derecha) a las 10h00.	84
Figura 23.	Distribución espectral (izquierda) e índice de reproducción cromática (derecha) de la luz exterior a 5744K.	96
Figura 24.	Edades de los participantes (izquierda) y distribución de género de los participantes (derecha) a las 14h00.	96
Figura 25.	Distribución espectral (izquierda) e índice de reproducción cromática (derecha) de la luz exterior a 5396K.	108
Figura 26.	Edades de los participantes (izquierda) y distribución de género de los participantes (derecha) a las 18h00.	108

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1.	Conductos solares sin mantenimiento del aula C-B4 y ubicación de conductos solares en la cubierta de las aulas en la ETSAB.	25
Foto 2.	Aspectos arquitectónicos. Museo Kunsthau Bregenz, Peter Zumthor, 1997.	26
Foto 3.	Aspectos de posición y diseño de las fuentes lumínicas. Auditorio de Otaniemi, Alvar Aalto, 1964.	26
Foto 4.	Aspectos de materialidad. Termas de Vals, Peter Zumthor, 1996.	26
Foto 5.	Instalación CoeLux, simulación de luz natural (CoeLux 45 HC).	30
Foto 6.	Módulo básico iluminación espectral Ledmotive (izquierda) y spotlight espectral completo para base o rail (derecha).	38
Foto 7a.	Modelado de los objetos según la iluminación.	44
Foto 7b.	Cambio en la percepción de profundidad del espacio según la iluminación.	44
Foto 7c.	Cambio en la percepción del espacio por el color de la fuente lumínica.	44
Foto 8.	Ejemplo de espacios de transición dentro de un museo. Hall Museo de Louvre (izquierda). Espacio con luz natural y artificial en Galería de la Academia en Florencia.	47
Foto 9.	Bombilla biodinámica LIFX y datos de iluminación de la bombilla.	51
Foto 10.	Bombilla Philips HUE y puente Bridge Philips	52
Foto 11.	Bombilla Alba de Stack.	53
Foto 12.	Bombilla Lümen de TABU.	54
Foto 13.	Sistema de control de iluminación Scena de la empresa SIMON.	55
Foto 14.	Módulo LED.	57
Foto 15.	Espectrómetro portátil con Wi-Fi.	58
Foto 16.	Light creator platform.	58
Foto 17a.	CoeLux cielo y sol en una tienda de ropa (CoeLux 60).	61
Foto 17b.	CoeLux cielo y sol dentro de Spazio INnovazione of As et Inventio.	61
Foto 17c.	Simulación de luz natural en espacios interiores (CoeLux 45 SQUARE).	61
Foto 18.	Simulación de luz natural en espacios de oficina (CoeLux 45 SQUARE).	62
Foto 19.	Condición actual aula C-B7.	67
Foto 20.	Bombilla biodinámica LIFX (derecha) y espectrómetro Sekonic Spectromaster C-700 (Izquierda)	76
Foto 21.	Montaje de las bombillas LIFX dentro de los conductos solares.	77
Foto 22.	Proceso de restablecimiento de las bombillas LIFX mediante el modo de apagado y encendido.	77
Foto 23.	Iluminación natural y artificial existente en el aula C-B4. Condición 1	81
Foto 24.	Iluminación natural y artificial propuesta en el aula C-B4. Condición 2	81
Foto 25.	Iluminación natural y artificial existente en el aula C-B4. Condición 3	82
Foto 26.	Participantes de la encuesta realizada en el aula C-B4	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Longitud de onda para diferentes colores	18
Tabla 2.	Índice de reproducción cromática	21
Tabla 3.	Temperatura y rendimiento de color de la luz natural	22
Tabla 4.	Clima de Barcelona. Nubosidad y humedad relativa	23
Tabla 5.	Valores típicos de iluminación natural sobre un plano horizontal	24
Tabla 6.	Uniformidades y relación entre iluminancias de áreas circundantes inmediatas al área de la tarea.	40
Tabla 7.	Iluminancias para establecimientos educativos UNE 12464.1.	41
Tabla 8.	Índice de Deslumbramiento Unificado (URG)	42
Tabla 9.	Grupos de apariencias de color de lámparas	43
Tabla 10.	Resumen de las especificaciones técnicas de bombillas LED biodinámicas de referencia.	56
Tabla 11.	Consumo de energía de lámparas fluorescentes vs. LEDs en el aula C-B7.	69
Tabla 12.	Costo de consumo de energía de lámparas fluorescentes vs LEDs en el aula C-B7.	69
Tabla 13.	Cuadro comparativo entre sistema lumínico de luz natural instantánea con conductos solares.	72

RESUMEN

La luz del sol está íntimamente relacionada con el ser humano, ya que su interacción, o la falta de ella, influye en los procesos biológicos, psicológicos y emocionales.

En la iluminación de interiores, cuando existen espacios donde la conexión visual con el exterior es nula, se aplican sistemas de iluminación artificial programadas que reproducen las características lumínicas de la luz natural de un día determinado, indiferentemente si el día está soleado o está gris, la luz proporcionada es la “adecuada” para que el usuario se sienta confortable dentro del espacio. Sin embargo, al ser una simulación programada crea una ilusión en las personas, haciéndolas creer que lo percibido visualmente corresponde a la realidad, pero no es así. La luz natural reproducida dentro del espacio no es compatible con las condiciones lumínicas del sol, y por lo tanto, no existe relación entre el interior con el exterior.

El presente trabajo de investigación busca demostrar que la luz natural simulada instantáneamente con LEDs reproduce fielmente las oscilaciones de la luz exterior, creando una conexión no visual con el exterior. Su verificación se realizará mediante el análisis de los parámetros de percepción y confort visual que tiene el usuario a través de la luz percibida.

ABSTRACT

Sunlight is intimately related to the human being, its interaction or the lack of it, influences in the biological, psychological and emotional processes.

In indoor lighting, when there are spaces where there's no visual connection with the exterior, artificial lighting programmed systems reproduce the natural lighting characteristics of a determinate day, no matter if the day is sunny or gray, the light provided is “adequate” so the user feels comfortable inside the space. However, the programmed simulation creates an illusion in people, making them believe that what is perceived visually corresponds to reality, but it is not. Simulated natural light is not compatible with the sunlight conditions, and therefore there is no relationship between the interior and the exterior.

The present research work seeks to demonstrate that instantaneously simulated natural light with LEDs faithfully reproduces the oscillations of the exterior light, creating a non-visual connection with the exterior. Its verification will be done by analyzing the parameters of perception and visual comfort that the user has through perceived light.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivos 12

1.2 Justificación 13

1.3 Proceso metodológico 14

1.4 Viabilidad de la investigación 15

1.5 Hipótesis 16

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

La iluminación artificial permite crear diferentes ambientes, resaltar objetos e incluso iluminar espacios donde la luz natural no llega. Sin embargo, la creciente utilización de la luz artificial ha influido en la forma de diseñar los edificios siendo opacos totalmente hacia el exterior y de plantas profundas como en el caso de centros comerciales, restaurantes, oficinas, etc., que impiden la presencia de ventanas o lucernarios y por lo tanto crea una desconexión visual con el exterior.

La permanencia en espacios aislados con el exterior durante muchas horas, como en el caso de oficinas o fábricas, afecta tanto en lo biológico como en lo psicológico, repercutiendo negativamente en la salud y en el rendimiento laboral de los trabajadores.

Por tal motivo, se han explorado nuevas técnicas de producción de luz artificial con el fin de obtener el confort y bienestar deseado para los usuarios.

Existen fabricantes de iluminación que han desarrollado sistemas alternativos de luz artificial como es la biodinámica, que recrea el ritmo temporal de la luz solar que se programa en su software, independientemente si el día está soleado o nublado, sea invierno o verano, el sistema va a reproducir la luz “ideal” para el usuario. Sin embargo, si se habla de reproducir fielmente la luz natural de forma artificial, se deben considerar las variaciones lumínicas a lo largo del día que, independientemente si esa luz afecta positiva o negativamente al ser humano, corresponde a la realidad.

El propósito del trabajo de investigación es el de comprobar si la luz natural simulada instantáneamente y de forma artificial con LEDs, reproduce las mismas características que la luz exterior. Para ello se requiere de una fase de experimentación donde se analizará, mediante encuestas, los parámetros de percepción y confort visual del espacio interior bajo condiciones naturales y artificiales de luz.

1.1 Objetivos

Objetivo general

Identificar la luz exterior a través de la luz natural simulada instantáneamente con LEDs y demostrar que existe una conexión interior – exterior mediante la luz percibida.

Objetivos específicos

1. Exponer los sistemas lumínicos de simulación programada de luz natural existentes en el mercado y analizar el efecto que produce en la percepción y en el confort visual del usuario.
2. Analizar y proponer la implementación del sistema lumínico de traslación de luz natural de forma instantánea con LEDs en las aulas de la ETSAB que no poseen conductos solares.
3. Evaluar y comparar la iluminación natural simulada artificialmente con iluminación natural proporcionada por conductos solares en un espacio interior mediante encuestas sobre la reacción de los usuarios.

1.2 Justificación

Son diferentes los elementos que motivan el desarrollo del presente trabajo de investigación, pero el más importante es la búsqueda de la conexión interior – exterior mediante la luz percibida. Actualmente, la vida cotidiana de las personas está ligada a la permanencia de largas horas en espacios cerrados, ya sea por ocio (centros comerciales, restaurantes, teatros, centros deportivos) o por trabajo (oficinas, fábricas) donde la iluminación natural es limitada y la artificial toma protagonismo.

La influencia de la luz artificial en la salud biológica, psicológica y visual de las personas será positiva o negativa, dependiendo de cómo se la aplique y si sus características lumínicas son las adecuadas para el confort del usuario dentro del espacio.

Pero si la luz artificial simula las mismas características que la luz natural, surgiría el cuestionamiento de que si esa luz que se percibe visualmente corresponde realmente a la luz existente en el exterior y si proporciona bienestar en los usuarios. Se ha demostrado que con los sistemas de iluminación artificial que recrean la luz del sol se puede obtener condiciones de iluminación óptimas que ayudan a regular el ciclo circadiano, sin embargo este tipo de luz no corresponde con la realidad ya que es programado, es decir está sujeto a variaciones según la conveniencia del usuario o del fabricante.

Con la investigación se pretende demostrar que la luz natural simulada de forma artificial e instantánea si tiene las mismas características lumínicas que la luz exterior, ya que al ser automática la lectura de los parámetros de la luz solar, se puede tener la misma temperatura de color, índice de reproducción cromática, etc. dentro del espacio y por ende crear en el usuario esta conexión no visual interior – exterior que los sistemas de iluminación existentes no consideran.

Este tema es de interés ya que el sistema lumínico planteado proporciona ventajas sobre los elementos de iluminación natural cenital como son los lucernarios o conductos solares. El efecto lumínico es el mismo pero con la diferencia de que proviene de una fuente distinta de luz como es la artificial, convirtiéndolo en un sistema versátil ya que proporciona luz “natural” en el día y por la noche funciona con las características propias de una luz artificial.

Por otro lado, en la etapa de recopilación de datos no se encontró otro proyecto similar a éste, por lo que si se continúa con el desarrollo del prototipo de sistema iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs se puede llegar a realizar una patente.

1.3 Proceso metodológico

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se pretende abordar tanto aspectos conceptuales como aspectos prácticos, en el que éste último permitirá confrontar o verificar los elementos presentados teóricamente.

La búsqueda y obtención de información bibliográfica se realizará mediante bases de datos de arquitectura disponibles en internet, en libros de arquitectura e iluminación de la Biblioteca Oriol Bohigas de la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona (ETSAB) y por medio de reuniones personales o vía online con especialistas en iluminación de diferentes empresas.

El esquema del proceso de investigación que se llevara a cabo constará de cuatro partes:

1. Primera Parte:

Desarrollo de los puntos importantes y de interés para la investigación con respecto a la iluminación natural y artificial.

2. Segunda parte:

Búsqueda de información y análisis de sistemas de simulación de luz natural con LEDs existentes en el mercado de la luminotecnica.

3. Tercera parte:

Fase experimental. Mediante encuestas realizadas a los usuarios, se comprobará si la luz natural simulada con LEDs tiene las mismas características que la luz natural exterior. El experimento se llevará a cabo el aula C-B4, ubicado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAB) de la Universidad Politècnica de Catalunya.

4. Cuarta parte:

Resultado del experimento y conclusiones. Además se planteará las posibles vías de investigaciones futuras o patentes que se podrán realizar en base al Trabajo de Fin de Máster.

1.4 Viabilidad de la investigación

Durante el desarrollo de la investigación, se contactó a diferentes empresas como SAKMA Electrónica Industrial S.A.U. y Ledmotive Technologies S.L. (spin-off del Institut de Recerca en Energia de Catalunya IREC) para obtener más información sobre los proyectos que están realizando actualmente y que se vinculan con el presente trabajo de investigación.

La información obtenida de estos contactos sirvió para confirmar que es factible realizar un sistema de iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs (como se planteó inicialmente el tema de investigación) pero con la tecnología y los dispositivos propios de la empresa.

Debido a que el tiempo para desarrollar el trabajo de investigación es limitado y no se puede disponer de los recursos necesarios de manera inmediata, la realización de este prototipo no pudo llevarse a cabo. Por tal motivo, se decidió proyectar la investigación a comprobar la similitud de las características lumínicas de la luz natural simulada artificialmente y de forma instantánea con respecto a la luz natural exterior.

Para la realización del experimento en el aula C-B4 de la Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona (ETSAB) se necesitó de un espectrómetro que fue adquirido por la Escuela y bombillas biodinámicas que anteriormente fueron donadas a la ETSAB por la empresa LIFX.

Los resultados obtenidos servirán de base para un futuro proyecto de patente relacionado con el desarrollo de un sistema iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs que se podrá implementar en las aulas de la Escuela que no poseen conductos solares y reemplazar la iluminación artificial existen de lámparas fluorescentes que generan un alto consumo de energía.

El presente trabajo de investigación es la continuación de un Trabajo de Fin de Máster anterior que lleva de título “La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural: Evaluación de fiabilidad de los parámetros perceptivos y de confort”, el mismo que realizó un experimento en el aula C-B4 (la misma aula que se utilizará para el experimento de la investigación) con el fin de analizar los parámetros perceptivos de confort lumínico del espacio interior bajo condiciones naturales como en condiciones artificiales de luz. Para ello se utilizó las bombillas LIFX que se adquirieron inicialmente para esta investigación y que se programaron a 6500K para realizar la simulación dentro del aula y con esas condiciones realizar las encuestas.

Para la simulación del experimento de la presente investigación, el color de la luz de las bombillas LIFX se programará de acuerdo a la temperatura de color de la luz exterior que se obtiene en ese momento, siendo dinámica la luz percibida por los encuestados y no estática (un

solo valor de temperatura de color) como la iluminación del experimento de la investigación mencionada anteriormente.

1.5 Hipótesis

Se parte de la hipótesis siguiente:

La presencia de la luz natural en espacios interiores es importante para el funcionamiento normal del cuerpo humano, por lo que la aplicación de sistemas de iluminación que reproduzca las condiciones lumínicas exteriores de manera instantánea, permitirá compensar la falta de luz natural en espacios sin contacto visual con el exterior y además establecer un vínculo entre el interior y el exterior por medio de la luz.

Estos factores son:

- La importancia de percibir la luz solar en un espacio cerrado y sus consecuencias biológicas y psicológicas en el ser humano.
- La comprobación de la teoría de que la iluminación natural simulada instantáneamente con LEDs puede llegar a reemplazar la luz solar.
- La relación interior – exterior por medio de la luz percibida sin tener contacto visual hacia el exterior a través de una ventana.

CAPÍTULO 2. LA LUZ NATURAL

2.1. Magnitudes y propiedades 19

2.2. Características de la luz natural 21

2.3. Efectos de la luz natural 27

CAPÍTULO 2.

LA LUZ NATURAL

No cabe duda que la iluminación natural es la mejor opción a la hora de alumbrar espacios habitados, no solamente porque es un recurso que la naturaleza nos brinda gratuitamente sino también por tener una excelente calidad de luz, la cantidad de energía luminosa que nos proporciona y también por sus propiedades “moldeadoras” del espacio interior. Además la luz solar promueve el ritmo natural de la vida humana ya que controla los procesos físicos e influye en nuestro reloj biológico y también ha determinado el desarrollo de nuestro sentido de la visión.

La principal fuente lumínica la constituye la luz visible, la cual es energía radiante susceptible de ser percibida por el ojo humano. Esta luz solar, no es modificable por hombre, ya que sus características dependen de factores naturales que son propias de cada lugar y son descritas por leyes físicas, razón por la cual se le denomina luz natural (Meneses Bedoya, 2015).

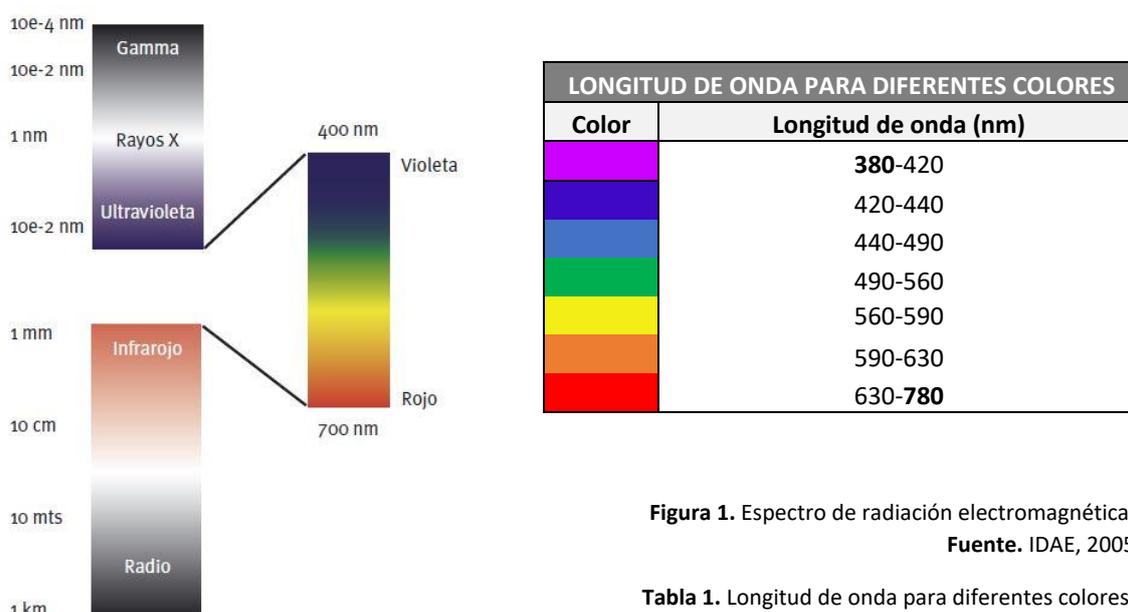


Figura 1. Espectro de radiación electromagnética.
Fuente. IDAE, 2005

Tabla 1. Longitud de onda para diferentes colores.
Fuente. Yáñez Parareda, 2008

La luz visible es una región del espectro electromagnético cuyas ondas electromagnéticas tienen una longitud de onda que va desde el rojo (780 nm) hasta el violeta (380 nm) como se muestra en la figura 1.

El conjunto de colores del espectro visible se distribuye de forma continua y cuando la distribución de la energía en cada longitud de onda es similar a la luz solar se percibe el conjunto como luz blanca. Cuando se trata de una fuente artificial, existen lámparas como las incandescentes que emiten radiación en todas las longitudes de onda del rango visible, a éstas se las denomina de espectro continuo. En el caso de las lámparas de descarga que solo emiten radiación en sólo algunas longitudes de onda del rango visible se denominan espectro discontinuo.

Otras de las propiedades de la luz natural, y que son importantes conocer para el desarrollo de la investigación, son el Índice de rendimiento de color (IRC o R_a) y la Temperatura de color T_c que se hablará más adelante.

2.1. Magnitudes y propiedades

Para poder estudiar y proyectar las condiciones lumínicas de un espacio, se han establecido una serie de magnitudes que permiten analizar el comportamiento y las características de la luz. Así mismo, estas magnitudes servirán como base para fijar niveles y estándares óptimos de iluminación.

Para la presente investigación se han considerado mencionar algunas de las magnitudes y propiedades que servirán de referencia cuando se mencionen algunos aspectos de la luz natural y la luz artificial. Estas definiciones se tomaron del libro “Un discurso de la luz” de ERCO (2009).

Flujo luminoso (F)

El flujo luminoso describe la potencia luminosa total emitida por una fuente de luz. Se calcula de la potencia de la radiación espectral mediante la valoración con la sensibilidad luminosa espectral del ojo.

La unidad de medida dada por el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el lumen (lm) y se define a partir de la candela (cd) como:

$$1 \text{ lumen} = 1 \text{cd} * \text{estereorradián}$$

Intensidad luminosa (I)

Es el flujo luminoso (potencia o energía radiante incidente sobre una superficie) por cada ángulo sólido (lm/sr). La distribución en el espacio de las intensidades luminosas de una fuente de luz constituye el cuerpo de distribución de intensidad luminosa. La unidad de medida en el SI es la candela.

Iluminancia (E)

La iluminancia se define como la relación entre el flujo luminoso que incide sobre una superficie y el tamaño de esta superficie.

La unidad de medida en el SI es el lux (lx): $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen} / \text{m}^2$. Esta iluminancia también recibe el nombre de nivel de iluminación y sirve para determinar las condiciones óptimas de iluminación de un espacio.

Luminancia, luminancia reflejada o brillo (L)

La luminancia describe la intensidad luminosa de una superficie, que emite luz como fuente de luz o por transmisión o reflexión. La luminancia se define aquí como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie proyectada verticalmente a la dirección de observación. Las superficies de diferentes colores de la misma luminancia son igual de claras.

Desde el punto de vista psicológico la luminancia se considera como el equivalente al “brillo”. Así, si se tiene una superficie reflejante o emisora de luz, la luminancia indicaría la cantidad de flujo luminoso que el ojo percibiría desde un punto de vista particular con respecto a esta superficie (Meneses Bedoya, 2015).

La unidad de medida en el SI es la candela por metro cuadrado cd / m^2 .



Figura 2. Lumen, candela y lux
Fuente. HELLA, 2017

2.2. Características de la luz natural

Las características de la luz natural dependen de varios aspectos como son la fuente de luz, los aspectos geográficos y los aspectos arquitectónicos que se mencionaran a continuación.

2.2.1. Fuente de luz

Para cualquier fuente de luz que se vaya a describir, existen características básicas que se deben conocer como son:

Índice de reproducción cromática (R_a)

El IRC es una medida cuantitativa de la capacidad de una fuente de luz para revelar los colores de varios objetos fielmente en comparación con una fuente de luz ideal o natural. La escala va de 0 a 100, donde 0 se percibe la luz en escala de grises y 100 es la luz natural. Como se puede observar, la luz natural tiene un alto rendimiento de color, lo que indica que la calidad de la luz es óptima (ver tabla 2).

ÍNDICE DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICA (R_a)	
Excelente	Entre 100 y 90
Muy buena	Entre 90 y 80
Bueno	Entre 80 y 60
Pobre	Menos de 60

Tabla 2. Índice de reproducción cromática.
Fuente. Comité Español de Iluminación, s.f.

Temperatura de color (T_c)

Según Monteoliva (2015) la temperatura de color se define a partir de comparar su color, dentro del espectro luminoso, con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada. Cuando el espectro es continuo como la luz solar, se dice que es una radiación de cuerpo negro.

La temperatura de color es una forma simplificada de describir las propiedades espectrales de una fuente de luz ya sea natural o artificial.

De acuerdo con la escala de la temperatura de color (T_c), los colores cálidos son aquellas que presentan una calificación que están por debajo de los 3300 K, es decir que tiene una apariencia

amarillenta y la luz fría es aquella que presenta una temperatura de color superior a los 5300 K (apariencia blanco azulado).

En el caso de la luz natural, es impredecible saber exactamente que temperatura de color se tendrá en el día, a menos que se mida a través de un espectrómetro.

Su composición espectral varía considerablemente alcanzando valores de entre 3800 K y 40000 K. Estas importantes variaciones se deben a diferentes parámetros como son los distintos tipos de cielos, horas del día, ángulos de incidencia de la radiación, arquitectura del espacio, vegetación, suelo, superficie exterior, tamaño de ventanas y posición, característica del material traslúcido de las ventanas y tratamiento superficial del mismo, entre otros (Monteoliva, 2015).

Tanto el Índice de rendimiento de color como la Temperatura de color cambian cuando se trata de iluminación artificial.

TEMPERATURA DE COLOR Y RENDIMIENTO DE COLOR			
TIPO DE LUZ	Apariencia de color	Temperatura de color (Tc K)	Rendimiento de color (Ra)
LUZ NATURAL	Puesta de sol	3000 K	100
	Amanecer	3500 K	
	Luz del sol de la tarde	4500 K	
	Luz día normal	5000 K	
	Sol de mediodía	5500 K	
	Día soleado con cielo despejado	6000 K	
	Cielo ligeramente nublado	7000 K	
	Cielo brumoso	8000 K	
	Sombra amplia en día despejado	9000 K	
	Cielos muy bromoso	10,000 K	
	Cielos azules sin sol	11,000 K	
	Sombra amplia en montaña o en un día muy despejado	20,000 K +	

Tabla 3. Temperatura y rendimiento de color de la luz natural.

Fuente. Lawrence, 2016

En el caso de los LED, que es tipo de iluminación que aplica esta investigación, para producir luz blanca se emplean dos tecnologías: la mezcla RGB o la conversión de luminiscencia, los mismos que llegan a un índice de reproducción cromática de 90 y la temperatura de color correlacionada (Tcc) va desde los 2500 K hasta 8000 K (ERCO, 2017). El desarrollo del tema relacionado a la luz artificial con LEDs se abordará en el Capítulo 3.

2.2.2. Aspectos geográficos

Las características de la luz natural dependen también de la posición geográfica de la edificación, ya que el grado de inclinación solar influye directamente en la iluminancia y la incidencia de los rayos directos del sol al interior.

Según Yáñez Parareda (2008), el aprovechamiento de la luz natural tiene cuatro limitaciones principales como son:

La duración del día

Depende de la latitud y la estación del año. Por encima de la latitud 55° el aprovechamiento de la luz natural es deficiente ya que la mitad del año no hay luz solar. Cuantas más horas de sol tenga el día, más luz solar se podrá aprovechar.

En el caso de Barcelona, las horas de sol durante el año 2016 fueron de 2867,5 horas como se muestra en la tabla 4. Esto indica que un sistema de iluminación natural como son los conductos solares aprovecha al máximo la luz solar durante todo el año.

CLIMA EN BARCELONA. NUBOSIDAD Y HUMEDAD RELATIVA					
	Días serenos	Días nublados	Días cubiertos	% humedad relativa	Horas de sol
2015	74	226	65	70	2867,5
Enero	7	20	4	65	203,5
Febrero	4	19	5	63	178,9
Marzo	3	19	9	70	189,6
Abril	5	21	4	71	256,6
Mayo	7	19	5	61	330,6
Junio	16	11	3	60	340,5
Julio	6	22	3	66	309,5
Agosto	7	22	2	75	295,3
Septiembre	0	22	8	79	185,0
Octubre	1	16	14	80	164,6
Noviembre	13	16	1	72	241,5
Diciembre	5	19	7	79	171,9

Tabla 4. Clima en Barcelona. Nubosidad y humedad relativa

Fuente. Adjuntament de Barcelona, 2016

Nota. Los datos corresponden al Observatorio Fabra con Longitud 02° 07' 31" E. Greenwich. Latitud 41° 25' 10" N. Altitud 412m

La iluminancia horizontal exterior (E_e)

De igual manera depende de la latitud, la estación y la hora del día. En latitudes medias, cuando el cielo está despejado, tenemos más del doble de iluminancia en verano que en invierno debido al distinto espesor de atmósfera que el rayo solar tiene que atravesar. Es por ello que la iluminancia baja mucho en la salida y puesta de sol y se requiere de una fuente alterna como es la artificial para iluminar en el espacio interior.

La orientación de la fachada

La fachada más desfavorable es la horizontal, ya que está expuesta a la bóveda celeste y por lo tanto recibe más radiación solar durante todo el año que cualquier plano vertical. El plano horizontal como son las cubiertas de las edificaciones permite abrir vacíos para la instalación de conductos solares o lucernarios.

Si se trata de planos verticales, la mejor orientación es la Sur por ser la fachada que tiene más horas de sol y ofrece en todo el año una luz difusa que no deslumbra y es más regular.

VALORES TÍPICOS DE ILUMINACIÓN NATURAL SOBRE UN PLANO HORIZONTAL	
(Latitudes medias 40 - 45° a mediodía)	
Luz solar (directa más difusa)	100.000 lux
Luz solar con cielo cubierto (diciembre)	10.000 lux
Luz solar con cielo cubierto (junio)	50.000 lux
Interior junto a la ventana	2.000 - 1.000 lux

Tabla 5. Valores típicos de iluminación natural sobre un plano horizontal.

Fuente. Yáñez Parareda (2008)

Obstáculos externos

Tanto los edificios, los árboles e incluso la topografía del terreno puede impedir parcialmente la iluminación natural, reduciendo la iluminancia en la ventana de forma variable, afectando más en invierno que en verano cuando se trata de edificios. En el caso de lucernarios o conductos solares el único obstáculo que limita la iluminación natural es cuando se ensucian por el polvo, el smog de los autos o las hojas que caen y se depositan en la superficie del elemento captador de luz, por lo que un mantenimiento regular ayuda a solventar este problema.



Foto 1. Conductos solares sin mantenimiento del aula C-B4 y ubicación de conductos solares en la cubierta de las aulas en la ETSAB.

Fuente. Elaboración propia.

2.2.3. Aspectos arquitectónicos

Según Meneses Bedoya (2015), se puede dividir los aspectos arquitectónicos en tres grupos, los mismos que están interrelacionados y son interdependientes.

Aspectos formales o funcionales

Las características lumínicas de un espacio dependen de sus cualidades formales o funcionales, los mismos que son importantes en el momento de definir qué tipo de iluminación se requiere para un espacio con una función específica (ver foto 2).

Aspectos de posición y diseño de las fuentes lumínicas (aberturas)

En función de la posición de las aberturas, el tamaño y su orientación con respecto a la posición del sol, la iluminación natural variará en el interior del espacio. Si se habla de la orientación de la abertura, los sistemas de iluminación cenital como lucernarios o conductos solares proporcionarán más iluminación que un espacio iluminado lateralmente por ventanas (ver foto 3).

Aspectos de materialidad

Los materiales de acabado influyen en la iluminación natural ya que provocan iluminación indirecta por la reflexión de luz directa sobre las superficies dentro del espacio. Entre más claro sea el color, más reflejantes serán y por lo tanto presentará unos niveles de luminancia mucho más altos (ver foto 4).



Foto 2. Aspectos arquitectónicos. Museo Kunsthhaus Bregenz, Peter Zumthor, 1997.
Fuente. Contemporary Art Daily, 2014



Foto 3. Aspectos de posición y diseño de las fuentes lumínicas. Auditorio de Otaniemi, Alvar Aalto, 1964.
Fuente. Carpa, 2012



Foto 4. Aspectos de materialidad. Termas de Vals, Peter Zumthor, 1996.
Fuente. Robathan, 2017

2.3. Efectos de la luz natural

A través del ojo humano y la piel se desencadenan procesos fotobiológicos que tienen un efecto tanto psicológico como fisiológico. Los efectos positivos o negativos de la luz se hacen evidentes cuando las personas están privadas de la luz o, por el contrario, expuestas a cantidades excesivas de luz. Una adecuada iluminación permite a las personas rendir mejor en las actividades diarias, avivar su estado de alerta o mejorar sus necesidades biológicas como es el sueño.

Tanto la luz natural como la artificial, afectan al hombre en tres niveles: En la parte visual, donde se soporta nuestra percepción, la parte emocional que afecta nuestro estado de ánimo y la parte biológica que está directamente ligada a todos los procesos físicos (ZUMTOBEL, 2017).

De acuerdo con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDEA (2005), los efectos de la luz natural sobre las personas se pueden clasificar en:

2.3.1. Efectos biológicos

La radiación solar visible que percibe el ojo humano (luz ocular) no solamente permite ver lo que sucede a nuestro alrededor, sino que influye también en el comportamiento del organismo del ser humano. Así, la luz ocular activa otras funciones biológicas como es el reloj interno, sueño, humor, proceso cognitivo, sistema cardiovascular, secreción de ciertas hormonas, y metabolismo en general (Deschères, 2015).

El principal actor de algunas de las funciones biológicas causadas a través de la visión, es un tipo de fotorreceptor conocido como células retinianas (ipRGC) o también llamados *melanopsina*. Según Deschères (2015) los fotorreceptores denominados melanopsina son sensibles a la luz y también son responsables del reloj circadiano de nuestro cuerpo.

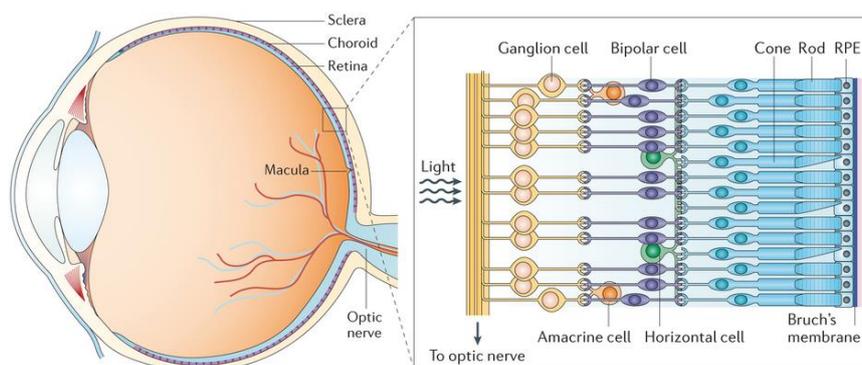


Figura 3. Corte vertical del ojo y corte transversal ampliado de un fragmento de retina.

Fuente. Nature Reviews Drug Discovery, 2015

Estos pigmentos, situados en un pequeño subconjunto de células ganglionares, comparten la retina junto con los conos (sensibles al color) y bastones (sensibles a los bajos niveles de iluminación y de luminancia), es por ello que también se los conoce como el tercer fotorreceptor.

Ciclo circadiano

La luz es el regulador del tiempo más importante del biorritmo humano. La alternancia del día y la noche provocada por la rotación de la Tierra en un ciclo de 24 horas activa la producción de hormonas en el cuerpo humano como son la melatonina que es la “hormona del sueño” y el cortisol que es la “hormona del estrés” (Friederici & Wand, 2006).

Estas dos hormonas guardan una estrecha relación con la vigilia y el sueño y su nivel de secreción varía a lo largo del día. Como se muestra en la figura 1, el nivel de melatonina es alto en las horas de la noche, alcanza su nivel máximo entre las 3:00 y 4:00 horas de la mañana, donde el sueño es más profundo, y disminuye cuando se comienza a iluminar el horizonte es decir una hora antes de la salida del sol. En cambio, el nivel de cortisol en la sangre aumenta cerca de las 8:00 horas de la mañana, ayudando al cuerpo a despertarse y prepararlo para la actividad física y mental. Durante el día va disminuyendo lentamente hasta llegar la noche donde sus niveles son mínimos (Sales, 2012).

Los ritmos biológicos o circadianos se regulan de forma natural cuando la luz de la mañana sincroniza el reloj biológico interno del cuerpo en la rotación día – noche de 24 horas de la Tierra.

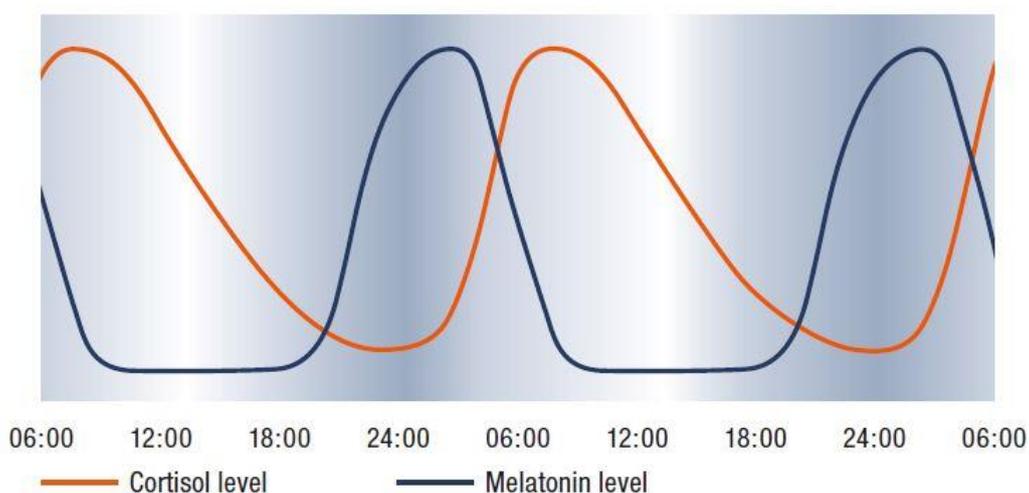


Figura 4. Ritmo circadiano, secreción de hormona
Fuente. OSRAM, 2017

La falta de armonía del ritmo normal día – noche podría provocar un ritmo erróneo de vigilia y sueño, llegando a producir vigilia por la noche y somnolencia durante el día (Comité Español de Iluminación).

En los entornos de trabajo, donde la optimización de los procesos de producción ha llevado a extender las horas de trabajo a la noche y a construir lugares prácticamente sin ventanas. Así la luz diurna biológica y dinámica desaparece dando paso a la “oscuridad biológica” como lo describen algunos científicos, el mismo que impacta en el reloj biológico del hombre y ocasiona daños tanto físicos como psíquicos y debilitamiento del sueño.

Es por ello que se debe mantener un ambiente luminoso similar al de la luz natural en características espectrales, energéticas y variaciones temporales, evitando así efectos biológicos no deseables en el hombre y su entorno como es el caso del trastorno afectivo estacional (TAE).

Trastorno afectivo estacional (TAE)

El Trastorno Afectivo Estacional (TAE) o también SAD por sus siglas en inglés (Seasonal Affective Disorder) es la crisis de ansiedad o el incremento de depresión por la escasez de luz natural. En países donde tienen más días de invierno que de verano y la luz natural es muy escasa, las personas tienden a utilizar ropa de colores oscuros, comer en exceso y quedarse más tiempo (80% del tiempo) en entornos cerrados (Comité Español de Iluminación).

Actualmente existen lámparas que reproducen las características lumínicas de la luz solar, llamadas biodinámicas, que mejoran el ciclo circadiano y el bienestar del usuario. A pesar de ser iluminación artificial, el cerebro humano no distingue la diferencia y lo asocia con luz natural, dando resultados positivos en cuanto a su aplicación. Los tipos de iluminación biodinámicas y los sistemas de simulación utilizados actualmente se mencionarán en el capítulo 4 de la investigación.

2.3.2. Efectos psicológicos

Los seres humanos, a través de sus sentidos, pueden experimentar los cambios en la composición, cantidad y variación de la luz natural, además de las condiciones atmosféricas y el entorno visual, los cuales influyen en su estado de ánimo.



Foto 5. Instalación CoeLux, simulación de luz natural (CoeLux 45 HC)

Fuente. Loos, 2014

Un factor muy importante es el contacto visual con el exterior, por lo que existen fabricantes de iluminación que se preocupan por este tema y crean entornos luminosos artificiales dinámicos capaces de simular las condiciones exteriores.

Un ejemplo de ello es la empresa CoeLux, que mediante sus lucernarios y ventanas LED simulan la luz natural y el cielo creando una sensación de conexión con el exterior como se muestra en la foto 5.

2.3.3. Efectos térmicos

Las ventanas y los sistemas de iluminación con luz natural influyen también en la carga térmica de un edificio, por lo que puede ayudar a reducir las aportaciones caloríficas del edificio debido a la favorable relación lúmenes por vatio de la luz natural y por lo tanto reflejar un ahorro energético en refrigeración.

2.3.4. Efectos de la luz sobre la actividad

Cuando se ilumina artificialmente un espacio, los niveles de iluminación son generalmente mucho menores que los mínimos en el exterior y no existe variación en la temperatura de color en el ambiente como lo hace la luz natural.

Según el Comité Español de Iluminación, los cambios de nivel y temperatura de color en la luz diurna tiene efectos positivos sobre las personas como en su estado de ánimo y estimulación. Estas influencias positivas se pueden amplificar si la iluminación artificial utilizada en los espacios interiores es dinámica, contribuyendo a la salud y bienestar humano.

2.3.5. Efectos de la luz sobre los objetos y las superficies

Tanto la iluminación natural como la artificial tienen a decolorar rápidamente los colores y acabados superficiales de los paramentos y objetos debido a la radiación ultravioleta que poseen. Este efecto negativo puede reducirse mediante la aplicación de acristalamiento, en el caso de la luz natural, o bien en las lámparas empleadas para la instalación de alumbrado artificial, de filtros contra la radiación UV.

Otro efecto negativo lo produce la radiación infrarroja, el cual genera un calentamiento sobre los objetos y superficies que puede generar deterioro o el calentamiento dentro de los espacios interiores que provoca el desequilibrio térmico en verano, obligando al empleo adicional de equipos de refrigeración.

CAPÍTULO 3. LA LUZ ARTIFICIAL

3.1	Iluminación con LEDs	34
3.2	Criterios de iluminación que determinan el ambiente luminoso y el confort visual	39
3.3	Percepción visual del ambiente luminoso	44

CAPÍTULO 3.

LA LUZ ARTIFICIAL

Así como disponemos de la luz solar en el día, por la noche es imprescindible contar con el alumbrado artificial como fuente de iluminación alternativa. Pero, con el paso del tiempo, la luz artificial dejó de ser un instrumento para contrarrestar la oscuridad convirtiéndose en un elemento que es capaz de dar carácter a la obra arquitectónica y potenciar la materialidad que lo compone.

Según Marta Masdeu, Directora de Marketing de Estiluz, la iluminación artificial debe de desempeñar tres papeles: la primera es de carácter decorativo que nos permite crear diferentes ambientes, la segunda es iluminar espacios cuándo no se posee luz natural y la tercera es resaltar objetos (Promateriales, 2013).

La iluminación engloba multitud de matices que nos permiten modificar la percepción del espacio sin alterar su aspecto físico. El modo y la intensidad en que iluminamos tienen una relación directa con las actividades que realizamos a lo largo del día. El tiempo que las personas pasan en el interior de los edificios es cada vez mayor. Por ello, es necesario contar con soluciones de iluminación eficientes y de calidad que proporcionen luminosidad, confort visual y un importante ahorro energético (Promateriales, 2013).

El esfuerzo de llevar una calidad óptima de luz hacia los interiores, ha implicado el uso de nuevas tecnologías como son los LEDs debido a sus ventajas frente a otros tipos de lámparas, siendo más flexibles en diseño y aplicables a cualquier tipo de ambiente que se quiera reproducir. En el caso de la investigación, las propiedades del LED ayudarán a que la simulación de luz natural sea más exacta, permitiendo obtener resultados más fiables. Además dependiendo de cómo se lo aplique en el espacio interior, influirá en la percepción y confort visual de los usuarios como se mencionará en el capítulo 3.

3.1 Iluminación con LEDs

3.1.1 Generalidades

Un LED (Light Emitting Diode) es un dispositivo semiconductor que emite luz cuando pasa corriente a través de él. Este semiconductor está unido a dos terminales (ánodo y cátodo) que cuando circula corriente eléctrica produce un efecto llamado electroluminiscencia, fenómeno que transforma la energía eléctrica en radiación visible (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015).

La luz emitida por un LED es monocromática, produce una radiación de banda estrecha y el color de la luz depende de los materiales empleados para producirla. Se puede generar luz LED en todos los colores saturados del espectro visible, desde el violeta y el azul hasta el rojo, pasando por el verde.

Para la producción de luz blanca no existen materiales semiconductores correspondientes, por lo que actualmente se emplean dos tecnologías para obtener luz blanca: la mezcla RGB (tricromatismo) o la conversión de luminiscencia (bicromatismo). La reproducción cromática de diodos luminosos blancos llega a actualmente a un IRC de 90 y se dispone LEDs en blanco cálido, blanco neutro, blanco de luz diurna, desde 2500 K hasta 8000 K (ERCO, 2017).

Bicromatismo combina un LED azul con un material luminiscente (emisor de luz), que convierte parte de la luz azul en luz blanca (o mejor dicho “amarilla”). La composición de este material luminiscente determina la temperatura de color de la luz resultante.

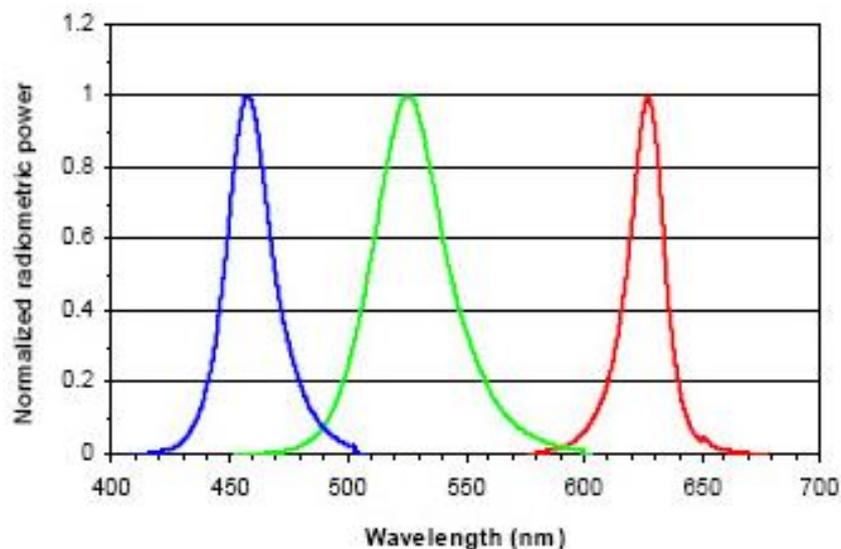


Figura 5. Longitud de onda del espectro de LED RGB
Fuente. Krol, 2013

Por otro lado, el **Tricromatismo** se obtiene por la combinación de tres diodos luminosos, con colores de luz rojo, verde y azul (RGB), los mismos que permiten mezclar los colores de luz dentro de una gran gama de colores, y de ese modo producir también el blanco. El control compensa los diferentes flujos luminosos de los LEDs RGB.

Los LEDs RGB pueden producir una luz “blanca” de cierta calidad, válida para algunas situaciones poco exigentes, pero esta luz compuesta por tres espectros monocromáticos no es lo suficientemente buena para usos y aplicaciones funcionales, donde la calidad visual es prioritaria (Sá, 2015).

Como respuesta a esta problemática, actualmente se puede encontrar en el mercado de la iluminación artificial LEDs o fluorescentes (Viva-Lite) de espectro completo, los mismos que reproducen de cerca la intensidad y la gama de colores de la luz natural.

La **Luz de espectro total o Full Spectrum Lighting**, se refiere a fuentes de luz que producen un espectro lumínico que cubre todo el rango de luz visible (380-700 nm), es decir ofrece una distribución de energía espectral uniforme, sin interrupciones en la reproducción espectral, con partes del espectro UV, con una temperatura de color de ± 5500 K y un IRC mínimo de 95 (Viva-Lite, 2017), a diferencia de los LEDs RGB que solo contiene tres picos de color y su espectro es discontinuo.

Existen empresas como SAKMA Electrónica Industrial S.A. o Ledmotive Technologies que trabajan con LEDs que cubren totalmente el espectro visible.

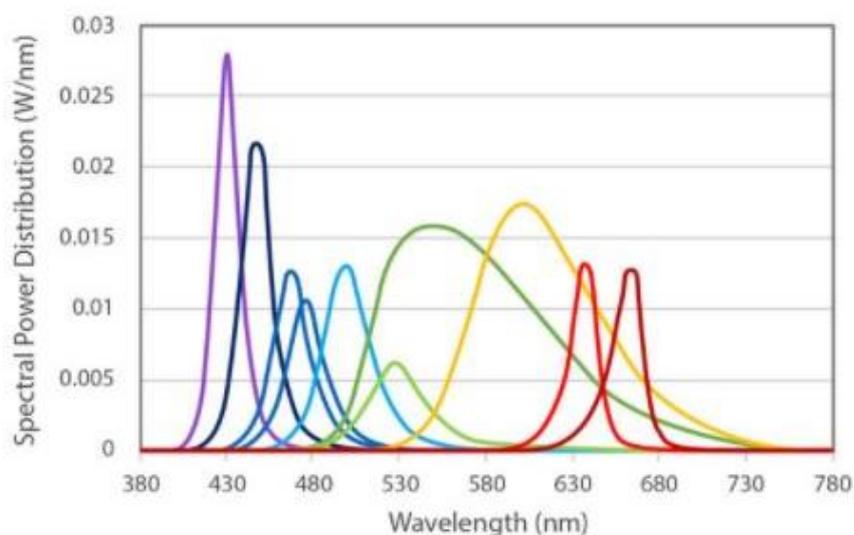


Figura 6. Longitud de onda del espectro LED de Ledmotive
Fuente. Ledmotive, 2017

En el caso de Ledmotive, utilizan una bombilla de LED que contiene 10 canales, es decir 10 tipos de LED, que la suma de todas ellas da las amplitudes de una curva de intensidades características como se muestra en la figura 6. El sistema lumínico Ledmotive se expondrá más adelante en el capítulo 4.

3.1.2 Características y ventajas de los LEDs

La elección de la tecnología LED para el presente trabajo de investigación, surgió de las varias ventajas que presenta frente a las fuentes de luz artificial convencionales.

De acuerdo con ETAP Lighting (2015) y la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2015), las principales ventajas de los LEDs son:

Sus **pequeñas dimensiones**, que permiten una gran flexibilidad y simplicidad de diseño.

La posibilidad de alta eficiencia energética, está determinada por todo el diseño: la densidad de corriente, la óptica y la disipación de calor. Los LEDs con una temperatura de color más alta (5000 K), es decir una luz más fría, alcanzan más de 180 lm/W ofreciendo un nivel de eficiencia superior que los mismos LEDs con temperaturas de color más bajas (2700 y 4000 K). El material luminiscente utilizado para crear un blanco cálido contiene más rojo y su rendimiento es inferior al del amarillo, por ello el rendimiento general del LED es menor.

Alta eficiencia en colores. Debido a su elevada saturación de color, no se necesitan filtros de color y por ser fuentes de luz prácticamente monocromáticas, permiten obtener una amplia gama de colores.

Mayor resistencia a golpes y a vibraciones que las fuentes de luz tradicionales. Los LED son fuentes de luz en estado sólido que carecen de filamentos, de tubos de descarga y de las frágiles ampollas de vidrio, confiriendo una mayor robustez a las instalaciones de iluminación.

No posee radiación ultravioleta e infrarroja, evitando así el deterioro de los materiales o elementos iluminados. Son muy adecuados para entornos en los que interese evitar este tipo de radiaciones como museos, comercios con productos alimenticios o tiendas de ropa. Aunque el LED en sí genera calor, lo dirige hacia su parte posterior, lejos del objeto que se desea iluminar.

Vida útil prolongada, hasta 50,000 horas dependiendo del sistema y la capacidad de disipación térmica de la solución adoptada. Se entiende que este periodo el flujo luminoso cae hasta el 70% de su valor inicial.

Fácilmente regulables en un amplio intervalo. Los LEDs pueden regularse de manera eficaz en un amplio intervalo (casi desde el 0% al 100%) o controlarse de forma dinámica empleando métodos de regulación estandarizados como DALI, 1-10V o TouchDim, por lo que son muy adecuados para integrarse en entornos programados y dinámicos. Más adelante, en el capítulo 4, se mencionarán algunas bombillas biodinámicas que utilizan aplicaciones para smartphone de los mismos fabricantes que regulan la iluminancia y la temperatura de color correlacionada.

Según la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2015), los LEDs pueden regularse aplicando dos técnicas diferentes: la regulación analógica y la regulación con PWM.

La regulación analógica significa que la amplitud de la intensidad de paso es reducida, es decir, es de forma continua y sin oscilaciones como se muestra en la figura 7a. Esto permite que el ojo humano perciba estos cambios de temperatura de color de forma natural, tal como se aprecia en los cambios de la luz solar.

En cuanto a la regulación con PWM, la amplitud se mantiene constante, pero el flujo de intensidad es interrumpida según una determinada frecuencia PWM. Cuanto mayor sean estas interrupciones, menor será la intensidad media efectiva a través del LED y, por lo tanto, también se reducirá la luminosidad percibida (figura 7b).

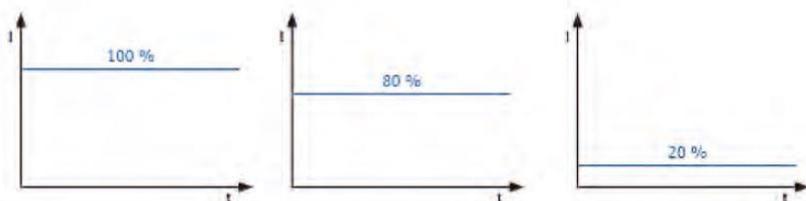


Figura 7a. Regulación analógica con diferentes niveles de regulación.

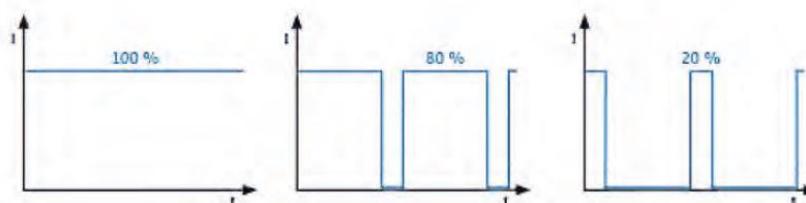


Figura 7b. Regulación con PWM.

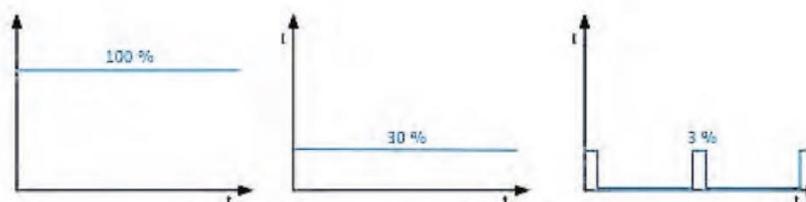


Figura 7c. Regulación combinada analógica y PWM.

Fuente. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2015

Otra opción es realizar una combinación de regulación analógica y PWM (figura 7c), para así alcanzar un comportamiento optimizado de regulación. Por ejemplo, la regulación analógica puede ser utilizada para niveles de regulación de entre 100% y 30%, para niveles inferiores al 30% se puede combinar a regulación PWM sin ningún efecto.

Así como tiene ventajas los LEDs, también posee inconvenientes y uno de los mayores problemas que tienen los LEDs es la **disipación del calor**. A pesar que los LEDs no emiten rayos infrarrojos, entre un 45% y un 90% de la energía que se aplica se convierte en calor. Este calor es disipado dentro del propio diodo y es necesario que pueda abandonar el chip para que funcione adecuadamente.

Los LEDs no son capaces de soportar temperaturas elevadas ni cambios de temperatura de color sin que su vida útil se vea afectada. Es por ello que los LEDs necesitan de un disipador para que el calor concentrado se libere al ambiente.

Normalmente los disipadores de calor suelen tener forma de estructura metálica (surcos o aletas) que ayudan a gestionar la temperatura y son muy necesarios cuando la potencia de la luminaria es muy alta. En el caso de las luminarias diseñadas por Ledmotive, los LEDs utilizados reproducen el espectro completo de la luz, por lo que su sistema se basa en programar la temperatura de color correlacionada (T_{cc}) de acuerdo al recorrido del Sol en el día. Como el LED tiene que pasar de una temperatura de color a otra constantemente, en su diseño se incorporó unos surcos (ver foto 6) para ayudar a disipar el calor concentrado.



Foto 6. Módulo básico iluminación espectral Ledmotive (izquierda) y spotlight espectral completo para base o rail (derecha).

Fuente. Iconia Design, 2015

3.2 Criterios de iluminación que determinan el ambiente lumínico y el confort visual.

La iluminación artificial en interiores es muy importante ya que puede influir de manera positiva o negativa en el usuario, dependiendo de cómo se lo aplique. Tanto el nivel de iluminación como el confort visual están íntimamente relacionados, ya que permiten que el usuario sea capaz de realizar sus tareas y obtenga una sensación de bienestar que de un modo indirecto también contribuya a un elevado nivel de productividad y que las actividades se lleven a cabo sin ningún riesgo.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2005), los criterios fundamentales en iluminación que determinan el ambiente o entorno luminoso son:

3.2.1. Distribución de luminancias

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 1, la luminancia es la energía luminosa emitida o reflejada en dirección al ojo de un observador y lo que es visible o se puede ver está limitado por el contraste de un objeto y el fondo sobre el que se ve.

Una luminancia de adaptación bien equilibrada es necesaria para aumentar: **la agudeza visual** (capacidad para distinguir dos objetos que se encuentran próximos), **la sensibilidad al contraste** (discriminación de diferencias de luminancia relativamente pequeñas), **la eficiencia de las funciones oculares** (tales como acomodación, convergencia, contracción de la pupila, movimientos de ojo, etc.).

La distribución de luminancias en el campo de visión también afecta el confort visual, por lo que se debe evitar las **luminancias demasiado elevadas** que pueden dar lugar a deslumbramientos, **contrastes de luminancia demasiados altos** que causan fatiga debido a la readaptación constante de los ojos, **luminancias y contrastes de luminancias demasiados bajos** que pueden dar como resultado un ambiente visual mortecino y no estimulante.

3.2.2. Nivel de iluminancia

La iluminancia y su distribución en el área de la tarea y en el área circundante tienen un gran impacto en cómo una persona percibe y realiza la tarea visual de un modo rápido, seguro y confortable.

Las **iluminancias recomendadas en el área de tarea** tienen en cuenta los aspectos psicofisiológicos tales como el confort visual y el bienestar, los requisitos para las tareas visuales, ergonomía visual, seguridad y economía.

En condiciones de iluminación normales se requiere aproximadamente de 20 lux para discernir características de la cara humana, siendo éste el valor máximo más bajo para la escala de iluminancia, pero en áreas ocupadas de modo continuo, la iluminancia mantenida no será menor de 200 lux.

Por otro lado, la **iluminancia de áreas circundantes inmediatas** debe proporcionar una distribución de luminancias bien equilibrada en el campo de visión. Las grandes variaciones espaciales en iluminancias alrededor del área de tarea pueden provocar tensiones y molestias visuales.

Así mismo la uniformidad dentro del área de la tarea y las áreas circundantes inmediatas nunca serán menor que los valores dados en la tabla 6.

Iluminancia de la tarea (lux)	Iluminancia de áreas circundantes inmediatas (lux)
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	E _{tarea}
Uniformidad ≥ 0,7	Uniformidad ≥ 0,5

Tabla 6. Uniformidades y relación entre iluminancias de áreas circundantes inmediatas al área de la tarea.

Fuente. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 1 (proceso metodológico), la fase experimental de la presente investigación se realizará en el aula C-B4 de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAB).

Al pertenecer a un establecimiento educativo, los niveles de iluminación adecuados proporcionarán a los estudiantes y profesores un ambiente agradable y estimulante, es decir, un confort visual que les permita seguir sus actividades sin demandar un esfuerzo visual.

Según la Comisión de Normalización Europea (2002), la iluminación dentro de un centro educativo puede tener algunas problemáticas, como por ejemplo cuando las luminarias dentro del área de trabajo producen deslumbramientos directos e indirectos o cuando la temperatura de color y la potencia de las lámparas son inadecuadas ocasionando que la escritura realizada sobre un cuaderno sea indescifrable debido al exceso o a la falta de luz.

En la tabla 7 se puede observar tanto los niveles de iluminancia, el índice de deslumbramiento unificado y el índice de reproducción cromática de las distintas áreas de un edificio educativo.

El espacio donde se realizará el experimento corresponde al tipo de interior *Aulas, aulas de tutorías*, el mismo que requiere de una iluminancia de 300 lux, 19 UGR (Índice de deslumbramiento unificado) y 80 Ra.

3.2.3. Deslumbramiento

De acuerdo con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2005), es la sensación producida por áreas brillantes dentro del campo de visión y puede ser experimentado bien como deslumbramiento molesto o como perturbador (ver tabla 8).

En espacios interiores, el deslumbramiento molesto puede producirse a partir de la visión directa de luminarias o ventanas sin protección, pero si está en los límites de control de deslumbramiento molesto, el deslumbramiento perturbador no representa un problema.

EDIFICIOS EDUCATIVOS				<u>Observaciones</u>
Tipo de interior, tarea, actividad	Em lux	UGRL	Ra	
Áreas de circulación y pasillos	100	25	80	
Halls de entradas	200	22	80	
Aulas comunes de estudio y aulas de reunión	200	22	80	
Aulas, aulas de tutorías	300	19	80	La iluminación debería ser controlable
Aulas para clases nocturnas y educación de adultos	500	19	80	La iluminación debería ser controlable
Sala de lectura	500	19	80	La iluminación debería ser controlable
Pizarra	500	19	80	Evitar reflexiones especulares
Mesa de demostraciones	500	19	80	En salas de lectura 750 lux
Aulas de arte	500	19	80	
Aulas de prácticas y laboratorios	500	19	80	
Talleres de enseñanza	500	19	80	
Aulas de dibujo técnico	750	16	80	

Tabla 7. Iluminancia para establecimientos educativos UNE 12464.1

Fuente. Comisión de Normalización Europea, 2002

Las reflexiones muy brillantes en la tarea visual pueden alterar la visibilidad de la tarea. Las reflexiones de velo y deslumbramiento reflejado pueden ser reducidas mediante la adopción de las siguientes medidas:

- Disposición de la luminaria y puestos de trabajo
- Acabados de las superficies (superficies mates)
- Limitación de luminancia de luminarias
- Área luminosa aumentada de la luminaria
- Techo brillante y paredes brillantes

ÍNDICE DE DESLUMBRAMIENTO UNIFICADO (UGR)	
10	No deslumbramiento
16 -22	Soportable
22 -28	Inconfortable
>28	Intolerable - Deslumbramiento perturbador

Tabla 8. Índice de Deslumbramiento Unificado (URG)

Fuente. Serra Florensa & Coch Roura, 1995

3.2.4. Color en el espacio visual

A través de los conos, el ojo humano que funciona conectado al cerebro, puede percibir y diferenciar los distintos colores que emite la luz.

La luz, ya sea natural o artificial, posee una serie de características cromáticas que están representadas principalmente por dos atributos: la apariencia de color de la fuente de luz y su capacidad para reproducir los colores, que afectan la apariencia de color de objetos y personas iluminadas (rendimiento de color).

La apariencia de color (T_{cc})

La “apariencia de color” de una lámpara se refiere al color aparente (cromaticidad) de la luz emitida. Es cuantificada por su temperatura de color correlacionada (T_{cc}) y proporciona una información psicológica, estética y de lo que se considera natural.

En el alumbrado natural, el ser humano no puede cambiar la temperatura de color correlacionado (T_{cc}), pero en el alumbrado artificial si se lo puede hacer.

Como se indicó en el capítulo 2, la luz solar puede cambiar la temperatura de color de manera dinámica durante todo el día, es impredecible y es variable, mientras que la luz artificial puede ser programada o preestablecida dependiendo del diseño de la bombilla y del uso que se le vayan a dar.

Rendimientos de colores (R_a)

En el caso de la luz artificial, lo ideal es que el índice de reproducción cromática (IRC) llegue a valores muy próximos a 100, que es el valor máximo proporcionado por una fuente de luz natural. La cifra disminuye, al disminuir la calidad de la reproducción cromática.

De acuerdo a la norma UNE EN 12464-1, las lámparas con un IRC menor de 80 no deben ser usadas en aquellos espacios interiores en los que trabajen personas que permanezcan durante periodos largos de tiempo.

Para la experimentación, se necesitará de unos LEDs que tengan un IRC de 90, que es un valor aceptable para una fuente de luz artificial.

TEMPERATURA DE COLOR Y RENDIMIENTO DE COLOR			
TIPOS DE LUZ	Apariencia de color	Temperatura de color (T_c K)	Rendimiento de color (R_a)
LUZ ARTIFICIAL	Cálida	Inferior a 3300°K	Lámparas incandescentes = 100
	Intermedia	3300°K a 5300°K	Lámparas fluorescentes = Entre 70 y 90
	Fría	Superior a 5300°K	Lámparas de sodio de baja presión = 0

Tabla 9. Grupos de apariencias de color de lámparas.

Fuente. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2005

3.3 Percepción visual del ambiente luminoso

La percepción visual se puede entender como la obtención de conocimiento del mundo físico que nos rodea a partir de la disposición óptica. El espacio arquitectónico es visible gracias a la interacción existente de sus elementos materiales con la luz que lo revela. Pero el estímulo primario de la visión no es suficiente para generar un juicio de valor y otorgar cualidades que identifican a ese espacio percibido, se necesita de la percepción para construir las ideas e imágenes que se tiene del espacio.

Es por ello, que lo visual y lo háptico (percepción del mundo mediante el tacto) confluyen en un solo momento perceptivo, que logra la unidad de la información y permite entender y valorar el espacio (Vélez Ortiz, 2012).

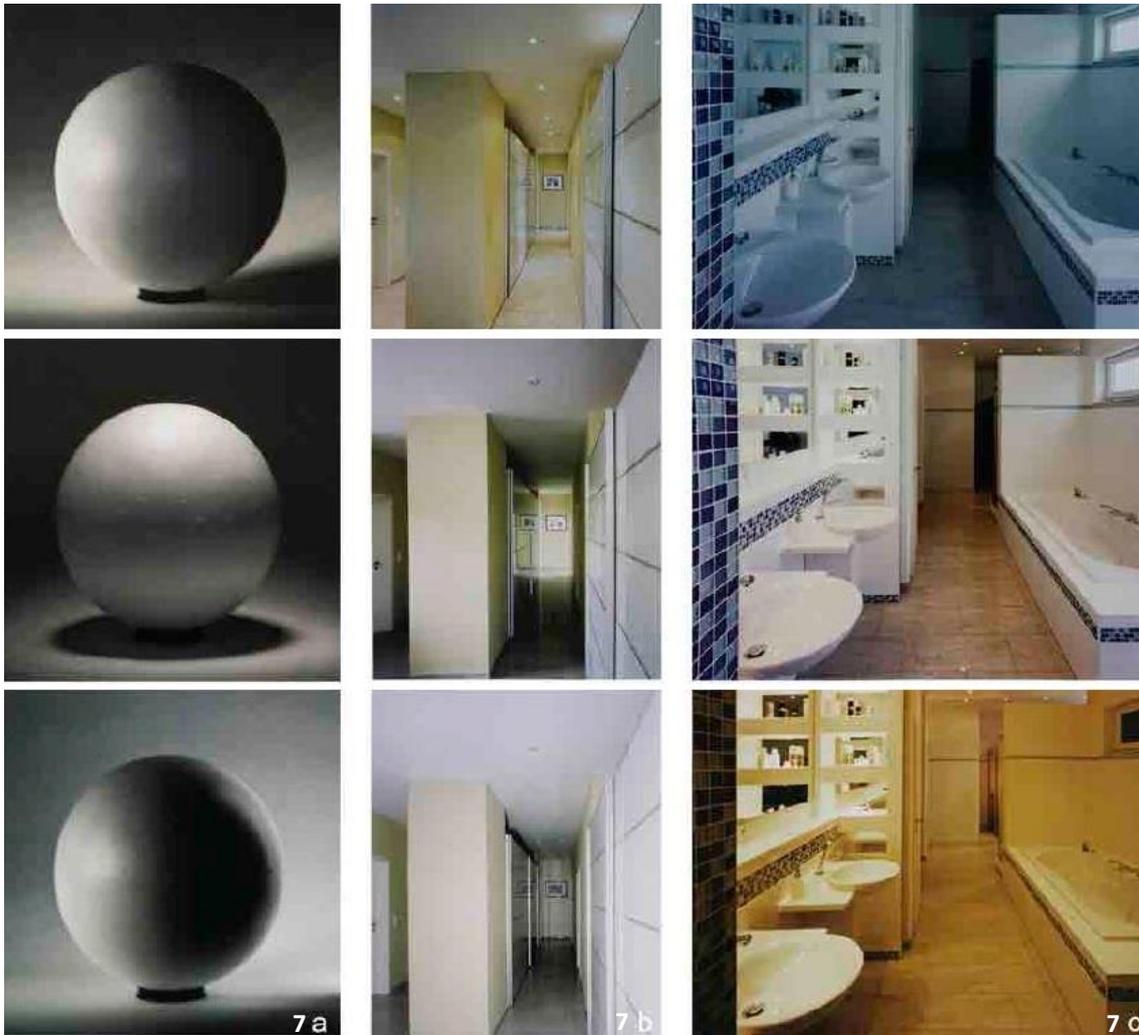


Foto 7a. Modelado de los objetos según la iluminación.

Foto 7b. Cambio en la percepción de profundidad del espacio según la iluminación.

Foto 7c. Cambio en la percepción del espacio por el color de la fuente lumínica.

Fuente. Meneses Bedoya, 2015

La imagen generada a partir de la percepción es la que permite representar el espacio, plasmado en ideas que lo sustentan y caracterizan, convirtiéndolo en único, pero variable de acuerdo al juicio de valor de cada persona.

La posibilidad de representación de un espacio no construido también depende de la percepción, pero no de estímulos visuales, sino de imágenes obtenidas de vivencias anteriores de espacios, en los cuales nos basamos para la construcción de una nueva espacialidad (Meneses Bedoya, 2015).

Dependiendo de cómo esté iluminado un espacio, se puede cambiar la percepción de profundidad, altura, color, ambiente o materialidad, por lo que se puede concluir que un espacio no se forma a sí mismo sino que depende de la interacción de sus elementos arquitectónicos y materiales bajo el influjo de la luz y de la capacidad de percibir y valorar estas cualidades.

El ojo humano tiene la capacidad de adaptarse a distintos niveles de iluminación dentro de un amplio margen entre 100000 lux y 0.003 lux, siendo capaz de distinguir entre objetos claros y oscuros cuando la iluminación varía lentamente, como es el caso de la luz natural en interiores. La capacidad de percepción visual, con luz natural, se mantiene prácticamente constante dentro de dicho margen, a pesar de reducirse el nivel de iluminancia (Yáñez Parareda, 2008). Esta capacidad perceptiva está descrita por la ley de la constancia del contraste (Ley de Weber-Fechner), estando determinada por ciertos factores que inciden en ella como son:

Sensibilidad diferencial al contraste

Es la capacidad que permite establecer las diferencias perceptivas dentro del campo visual. La falta de contrastes, tanto de iluminancia como de la luminancia, obliga al usuario a forzar la agudeza visual. El contraste de iluminancias y luminancias es necesario para mejorar la calidad perceptiva, que mejora con el aumento del nivel de iluminación. Por otro lado, un excesivo contraste puede producir deslumbramiento, molestia en la visión y dificultades perceptivas (Folguera Caveda & Muros Alcojor, 2013).

La agudeza visual

Es la capacidad para discriminar los más pequeños detalles de objetos muy próximos. Depende principalmente del nivel de iluminación y puede variar dependiendo de los factores lumínicos psicológicos y fisiológicos como la luminancia ambiental, los colores, la edad, etc. (Folguera

Caveda & Muros Alcojor, 2013). Si aumentamos la iluminancia, mejoraremos la agudeza visual especialmente si partimos de un bajo nivel de iluminación (Yáñez Parareda, 2008).

Rapidez de percepción

Es el tiempo necesario para captar un detalle, el cual decrecerá a medida que se aumente la iluminancia.

Duración del esfuerzo visual

Determina la fatiga en la función visual reduciendo su rendimiento. El esfuerzo visual será mayor cuanto menor sea el nivel de iluminación.

Adaptación luz - oscuridad

En la adaptación visual, los conos y bastones se sensibilizan a la luminancia media del campo visual en todo momento y requieren de un cierto tiempo para adaptarse a condiciones nuevas de forma eficaz. Cuando se pasa de un espacio muy iluminado a otro espacio que tiene luz tenue o baja, tiene que transcurrir varios minutos para que el ojo pueda discernir los detalles del entorno con poca iluminación. Análogamente, si se pasa de una zona oscura a otra iluminada, hay unos instantes de ceguera (Pérez Vega, 2006).

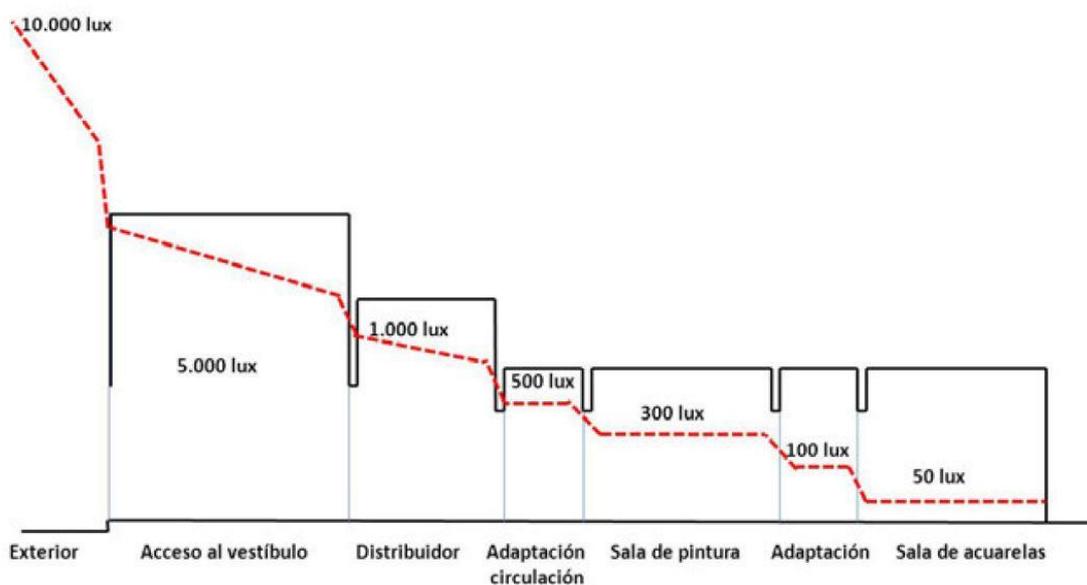


Figura 8. Ejemplo de transición de día en los espacios de un museo

Fuente. Folguera Caveda & Muros Alcojor, 2013

En general, se dice que para pasar de la luz a la oscuridad se necesita de un tiempo superior a 30 minutos y para hacerlo de la oscuridad a la luz más de 30 segundos (Serra Florensa & Coch Roura, 1995), por lo que la adaptación se produce más rápidamente al pasar de la oscuridad a la luz que al revés.

Así, las condiciones de una buena iluminación como ocurre en el día, la visión llamada *fotópica* (más de 3 cd/m²) es nítida, detallada y los colores se distinguen muy bien. Para niveles intermedios, la capacidad para distinguir los colores disminuye cuando baja la cantidad de luz, ocasionando una sensibilidad más de colores azules que de amarillos, este tipo de visión es llamada *mesiópica*. Y por último cuando los niveles de iluminación son inferiores (0,25 cd/m²), desaparece la sensación de color y la visión es más sensible a tonos azules, este tipo de visión es llamada *escotópica* (García Fernández).

Por tal motivo, toda fuente de luz que emita valores cercanos al máximo de la visión diurna (555 nm) tendrá un rendimiento energético óptimo ya que se producirá la máxima sensación luminosa en el ojo con el mínimo consumo de energía. Pero si la fuente no ofrece una buena reproducción cromática, puede ocasionar resultados contraproducentes.

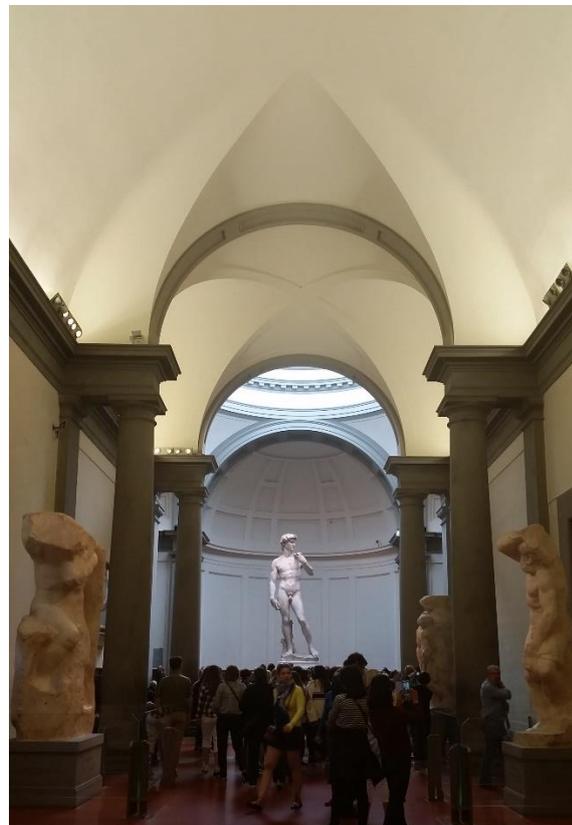


Foto 8. Ejemplo de espacios de transición dentro de un museo. Hall Museo de Louvre (izquierda). Espacio con luz natural y artificial en Galería de la Academia de Florencia.

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DE LUZ NATURAL CON LEDS EN EL INTERIOR DE UN ESPACIO

4.1	Iluminación biodinámica	49
4.2	Simulación de luz natural programada	57
4.3	Simulación de luz natural instantánea	63

CAPÍTULO 4.

SIMULACIÓN DE LUZ NATURAL CON LEDS EN EL INTERIOR DE UN ESPACIO

A diferencia de la luz natural, la luz artificial es más flexible, está siempre disponible y puede iluminar y convertir en utilizables los espacios que están muy alejados de la luz diurna. La iluminación artificial puede activarse en cualquier momento como escena luminosa y puede regularse en proporción de luz difusa y luz dirigida, obteniendo un efecto luminoso muy similar a la luz diurna. En el capítulo 4 se mencionarán los sistemas artificiales utilizados en la actualidad que reproducen las características lumínicas de la luz natural con tecnología LED y sus efectos en la percepción y confort visual en las personas.

4.1. Iluminación biodinámica

La iluminación inteligente como es la biodinámica, es una nueva concepción de luz artificial que no solamente se basa en su función de alumbrar sino también toma en cuenta sus consecuencias psico-fisiológicas en las personas.

Este tipo de iluminación artificial, llamada también iluminación biológica, se asemeja al ritmo temporal del sol a lo largo del día y la noche.

A diferencia de otras lámparas que emiten luz monocromática como las de sodio de baja presión, las lámparas biodinámicas pueden reproducir todas las longitudes de ondas del espectro visible (luz de espectro total) tal como lo hace el sol, por lo que se consideran ideales para la salud y bienestar humano.

Los espacios donde se puede aplicar este tipo de iluminación pueden ser en restaurantes, bares, hoteles, e incluso en lugares donde se necesitan de una buena calidad de luz como viviendas, hospitales, oficinas y centros educativos.

Según iGuzzini (2005), la luz biodinámica se puede resumir en cuatro aspectos:

– **Efectos fisiológicos de la luz sobre el hombre**

La luz biológica potencia la actividad y la atención debido al nivel de iluminación y la temperatura de color del ambiente, además aumenta la capacidad de estimulación del ambiente.

– **Efectos psicológicos de la luz en el hombre**

Las personas se sienten más cómodos con la temperatura de color correspondiente a la temperatura en grados centígrados de su lugar de procedencia.

– **Dimensión temporal de la luz artificial**

La luz biodinámica aprovecha la posibilidad de la luz artificial de funcionar como un sincronizador secundario del organismo.

– **Características cromáticas de la luz artificial**

El uso simultáneo de lámparas fluorescentes con diferentes temperaturas de color crea un espectro luminoso más armónico y equilibrado.

4.1.1. Bombillas biodinámicas existentes en el mercado

Existen en el mercado varios fabricantes de luminarias que están recreando las propiedades físicas de la luz solar en el diseño de sus lámparas con la ventaja de que los usuarios puedan ajustar la intensidad y cantidad de la luz, cambiar el perfil cromático, es decir, el color de la luz, e incluso cambiar el ángulo de incidencia en función de la hora del día, dando paso a un abanico de posibilidades en estos dispositivos inteligentes.

En la búsqueda de información para el presente trabajo de investigación, se han encontrado 2 tipos principales de conectividad: los que funcionan mediante Wi-Fi y los que funcionan por Bluetooth.

A continuación se mencionarán algunos de estos sistemas de iluminación inteligentes que actualmente se encuentran en el mercado de la luminotecnica.

Bombillas que funcionan por Wi-Fi

Las bombillas que comúnmente se encuentran son las bombillas con comunicación Wi-Fi, ya que permiten tener mayor alcance, se pueden conectar en remoto y guardar la información y configuraciones en la nube, teniendo más ventajas sobre las bombillas con conexión a bluetooth.

LIFX

La empresa LiFi Labs, Inc. ha desarrollado una bombilla LED biodinámica llamada LIFX (pronunciado LIFE-X) que funciona con conexión Wi-Fi a Internet mediante un sistema de control lumínico que se descarga a un smartphone o tableta con iOS 8.0+ o Android 4.0+. Con este sistema, la bombilla puede regularse tanto en intensidad como en color según las necesidades del usuario.

En la fase experimental del presente trabajo de investigación, se utilizaron las bombillas LIFX debido a que fueron donadas anteriormente a la ETSAB, aprovechando así de los recursos que se dispone.

Las bombillas biodinámicas LIFX que se utilizarán en el experimento tienen una potencia de 11W (utilizando su brillo máximo), con su flujo luminoso de 1055 lm que es equivalente a 75W en una bombilla convencional y con casquillo E27 Edison Screw (ver tabla 10).

La conexión entre la bombilla y el router es directa, es decir que no necesita de otro dispositivo que haga de puente. El funcionamiento del sistema consiste en que una de las bombillas es la “master bulb” o bombilla maestra y utilizando un smartphone (Android o iOS) se pueda hacer conexión para que las demás bombillas se enciendan.

El software de la bombilla LIFX permite ajustar y regular el brillo y color de la luz, programar distintos ambientes y temporizadores de activación y reposo. Además con la aplicación en el móvil se puede activar y controlar las bombillas de manera individual, por áreas o en todo el espacio y funciona también como una bombilla normal apagándola y encendiéndola con un interruptor convencional.



Foto 9. Bombilla biodinámica LIFX y datos de iluminación de la bombilla
Fuente. LIFX, 2017

Actualmente la empresa LiFi Labs, Inc. está trabajando junto con Purple Communications, Inc. en una nueva bombilla inteligente llamada Purple POP Wi-Fi, la misma que tiene como finalidad de parpadear cuando el usuario tiene una llamada entrante, dando una señal visual a las personas sordas o con problemas de audición individual. La tecnología utiliza un enfoque de conectividad que funciona en enlace directo a la plataforma de Purple, garantizando que las notificaciones siempre estén activadas y que los usuarios nunca pierdan una llamada (LiFi Labs, Inc., 2016).

Philips HUE

La marca Philips fue la primera en implementar un diseño de bombilla con comunicación Wi-Fi y su diseño proporciona varias funciones interesantes como es sincronizar la luz con la música y películas, ajuste de las bombillas para que automáticamente se enciendan y se apaguen cuando no se esté en casa o cambiar el tono de luz de la bombilla con el color de una imagen.

A diferencia de las bombillas LIFX, Hue necesita de un puente para conectarse al router por un cable ethernet y poder gestionar hasta 50 bombillas LED especiales. Además se puede controlar el sistema Philips Hue desde cualquier dispositivo con los controles inteligentes que provee la empresa, se puede ajustar la luminosidad, crear temporizadores y cambiar los colores fácilmente.

La marca Philips ofrece a sus usuarios una gama de productos que se dividen en tres tipos: White and color ambiance, White ambiance y White.



Foto 10. Bombilla Philips HUE y puente Bridge Philips
Fuente. Philips, 2017

Stack classic light

Stack classic light es el primer producto lanzado por la empresa Stack que busca, al igual que Philips Hue y LIFX, el confort lumínico por medio de la iluminación circadiana.

Las bombillas incorporan en su interior sensores de movimiento por radiofrecuencia (RF) que no solo detectan el movimiento (encendido y apagado de luces) sino también el ambiente, ya que se ajustan automáticamente a la temperatura de color y el brillo en función de la hora del día y la luz natural dentro de la habitación generando una reducción en el consumo de energía entre un 60 y 80% (Rhodes, 2014) comparado con otras bombillas LED.

Por las mañanas Alba emite luz con tonalidades azules, durante el día la luz es más blanca y conforme el sol se va ocultando, la luz es cálida.

Las bombillas se controlan a través de un hub y una aplicación del smartphone. Una vez conectadas al hub, con la aplicación se puede tener 5 modos de luz diferentes y establecer el tiempo de brillo y temperatura de color controlados de forma manual desde allí.

Los controles de la aplicación son sensibles y tarda un tiempo las luces en responder, sin embargo el sistema es de fácil uso y los sensores son muy precisos (Argeros, 2016).



Foto 11. Bombilla Alba de Stack
Fuente. Stack, 2017

Bombillas que funcionan por bluetooth

Las bombillas con conexión bluetooth tienen un alcance de 10 metros, no necesitan de un emisor extra ya que se lo utiliza mediante un smartphone y tampoco necesitan de un dispositivo extra para funcionar como es el caso de la iluminación por Wi-Fi.

Lümen

Lümen es la primera bombilla creada con RGBW bluetooth por la empresa TABU en el año 2012. La bombilla está compuesta por un transformador, un microcontrolador, el módulo de bluetooth y un LED RGB de 3W. Su carcasa es de aluminio y ayuda a disipar de mejor forma el calor y prolongar la vida útil de sus componentes (Falcón Yepes, 2015).

Lümen también produce una luz con el espectro completo de colores y una brillante luz cálida al igual que las otras bombillas que funcionan por Wi-Fi mencionadas anteriormente.

Con la tecnología bluetooth no solamente permite controlar la bombilla de forma inalámbrica, sino también permite programar diferentes funciones como es el modo despertador, el cual fija una hora determinada para que la luz de la bombilla se encienda gradualmente hasta alcanzar el máximo de luminosidad. El producto es muy versátil pero la potencia de los LEDs utilizados en la bombilla es inferior comparado con otras lámparas en el mercado.



Foto 12. Bombilla Lümen de TABU

Fuente. Lümen, 2017

Sistemas de control de iluminación

Así como hay bombillas con la capacidad de reproducir todos los colores del espectro visible, también existen en el mercado sistemas de control de luz que se adaptan a lámparas que no poseen la tecnología de regular la luz o cambiar la temperatura de color mediante la aplicación un smartphone.

Scena

La empresa SIMON ha creado un sistema de iluminación que controla y moldea espacio a través de la luz y el color. A través de los módulos de control (pantalla táctil, teclado auxiliar y la aplicación del smartphone App Scena) permite el control de la temperatura de color y de luminosidad de una luminaria biodinámica, calculando de forma automática el momento del amanecer y anoecer en función de la localización geográfica seleccionada. Este sistema obvia las condiciones exteriores, por lo que importa poco si en el exterior está lloviendo o está nublado, simplemente se lo programa para que calcule el ciclo circadiano de forma natural.

Actualmente el sistema Scena está enfocado a sistemas de control profesional para espacios como hoteles, oficinas, restaurantes pero no para residencias. Su sistema es por conexión Wired (cableado) y es compatible con todos los tipos de luminarias y protocolos de iluminación como DALI, DMX, 1-10 V, PWM.

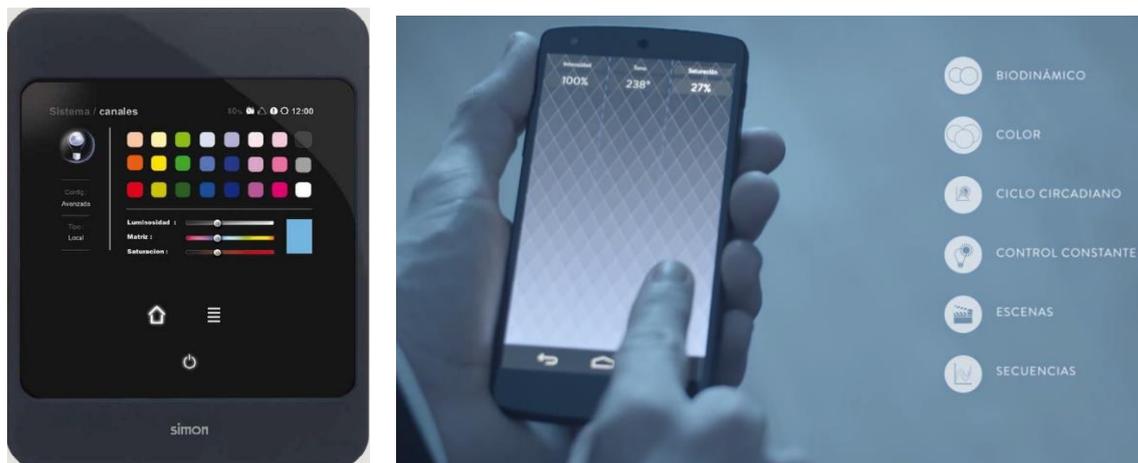


Foto 13. Sistema de control de iluminación Scena de la empresa SIMON
Fuente. SIMON, 2017

En resumen, hay muchos productos de iluminación como bombillas LED biodinámicas o sistemas de control de luz que proporcionan a sus usuarios la facilidad de personalizar sus espacios con intensidades y colores de luz variadas. Dependiendo de las especificaciones técnicas de cada bombilla, se puede conocer cuál es la mejor opción para iluminar los espacios, ya sea para que aporte propiedades lumínicas adecuadas y por otro lado que proporcione funciones que se adapten a las necesidades del usuario.

Según Andreu (2014) hay que tener en cuenta 5 factores a la hora de seleccionar bombillas LED. La primera es la potencia (W) que define los vatios que consume cada dispositivo, el segundo es el factor de potencia (PF) que se refiere al aprovechamiento energético que una bombilla hace

de la electricidad que le llega. A mayor PF, mayor ahorro energético y monetario y en el caso de las bombillas LED su PF es mayor de 0.8 que indica que tiene un 80% de potencia de luz y una pérdida de 20%. El tercer factor es el flujo luminoso (lm) que representa la cantidad de luz que provee la lámpara. Una bombilla de buena calidad puede producir más luz (lm) con menos potencia (W), mejorando la calidad y el ahorro de la iluminación.

En el caso de las bombillas LIFX, tiene un flujo luminoso de 1055 lm, siendo el valor más alto que el resto de bombillas de referencia.

El cuarto factor es la temperatura de color (K), que en el caso de las bombillas biodinámicas poseen el espectro total de la luz visible, pudiendo regular el color de la luz con relación al ciclo circadiano. Y el último factor es el índice de reproducción cromática (CRI o RA) que indica porcentualmente la calidad y fiabilidad de la luz que emite la bombilla en comparación con la luz natural. Lo ideal es que esté lo más próximo al 100%, es decir que esté más cerca a la luz y color natural, por lo general el CRI de las bombillas biodinámicas LED están a un 80%, lo cual no está tan mal ya que se aproxima a la viveza y brillo de los colores naturales.

BOMBILLAS LED BIODINÁMICAS DE REFERENCIA				
Empresa	LiFi Labs, Inc.	PHILIPS	STACK	TABU
Modelo	LIFX	Philips HUE	Stack classic light	Lumen
Formato	A19	A60	A19	A19
Tipo de casquillo	E27	E27	E27	E27
Lumen	1055 lm	806 lm	800 lm	400 lm
Potencia	11W	9W	12W	7W
Dimensiones	63mm x 117mm	62mm x 110mm	–	66mm x 134mm
Peso del producto	243 g	200 g	–	272 g
Angulo de apertura	130°	160°	180°	–
Temperatura de color	2500 - 9000 K	2000 - 4000 K	2200 - 5000 K	–
CRI	80+	80+	80+	–
Dimming	Software dimming vía smartphone	Software dimming vía smartphone	Software dimming vía smartphone	–
Conexión	Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi	Bluetooth 4.0
Vida útil	22,8 años (3 horas por día)	25000 horas	20000 horas	30000 horas
Acabado	Blanco perla	Blanco perla	Blanco perla	Blanco perla
Puente	NO	SI	SI	–
Precio por bombilla	\$60,00	39,90 €	\$28,00	\$70,00

Tabla 10. Resumen de las especificaciones técnicas de bombillas LED biodinámicas de referencia.

Fuente. Varios. Elaboración propia

4.2. Simulación de luz natural programada

4.2.1. Ledmotive

Ledmotive es una spin-off del Instituto de Investigaciones en Energía de Cataluña (IREC), que en el 2011 creó un sistema lumínico que ha sido patentado como “Dispositivo, sistema y método optoelectrónico para obtener un espectro de luz ambiente y modificar una luz emitida” y además aprobada en 15 países de Europa y Australia.

Ledmotive es un sistema de iluminación capaz de leer, procesar y reproducir cualquier espectro de luz con tecnología LED en tiempo real, es decir la luz en el interior seguirá automáticamente la variación del espectro solar durante el día y así determinar el correcto funcionamiento de los ritmos biológicos circadianos y los patrones de vigilia y sueño de los usuarios. El sistema Ledmotive se conforma de tres elementos:

Módulos LED

Los módulos VEGA reproduce todo el espectro lumínico combinando 10 tipos diferentes de LED en un procesador donde la suma de ellos se traduce en un tipo de luz determinada. Las lámparas Ledmotive modulan la intensidad de cada LED de forma independiente, de manera que se puede obtener cualquier tipo de curva en intensidad y longitud de onda, transmitiéndose en un color característico (Forcales, 2017).



Foto 14. Módulo LED
Fuente. Ledmotive, 2017

Grabador espectral

La captación de la temperatura de color de la luz que se quiera conservar de un específico lugar es posible con el espectrómetro portátil. Este dispositivo posee una buena resolución de longitud de onda que registra cualquier luz en cualquier momento. Se conecta de forma inalámbrica al smartphone o tablet y graba cualquier secuencia de luz.

Entre las especificaciones técnicas del espectrómetro portátil está su resolución que es de 7nm, el rango espectral va de 380nm a 780nm, el número de píxeles es de 256, su conectividad es mediante Wi-Fi y Bluetooth y el software puede ser iOS, Android, PC o Mac.



Foto 15. Espectrómetro portátil con Wi-Fi
Fuente. Ledmotive, 2017

Plataforma creadora de luz

Con la herramienta de creación de luz es posible recrear espectros grabados por el espectrómetro portátil y, por lo tanto, crear una biblioteca de patrones lumínicos para que se pueda compartir en una plataforma virtual. De esta forma se podrán utilizar las configuraciones de otros usuarios que más les agrade y que consideren idóneas para iluminar sus actividades cotidianas como leer, estudiar, entre otros. Además proporciona comunicación para controlar los módulos LED, pudiendo editar la apariencia y propiedades de cualquier luz.



Foto 16. Light creator platform
Fuente. Ledmotive, 2017

Función y aplicaciones Ledmotive

Según Ledmotive (2017), la exactitud espectral y la precisión en el sistema lumínico Ledmotive es su mayor compromiso. Esto lo logran a través del uso de motores multicanal LED que abarcan el rango visible sin dejar espacios en la distribución de potencia espectral (SPD), logrando imitar cualquier espectro de luz solar en comparación con las tecnologías basadas en RGB que sólo cubren una parte limitada del espectro visible.

Además, la fidelidad espectral se logra por un espectrómetro CMOS ubicado en el interior de la luminaria, el cual corrige constantemente las señales del regulador de LED PWM para que coincida exactamente con el espectro objetivo.

Dentro del sistema se encuentra un microprocesador, el mismo que controla la lectura del espectrómetro integrado a la luminaria y procesa la información obtenida. En función del modo de operación se proporciona a cada LED un nivel apropiado de intensidad luminosa, de tal forma que la suma de sus contribuciones reproduce un espectro deseado.

Este sistema lumínico además ofrece un control absoluto de las propiedades espectrales de la luz de manera análoga como un reproductor de mp3 (Tra Infografía, 2015). De este modo, una determinada luz podría ser guardada en soporte digital para una posterior reproducción o distribución electrónica en la red.

Otras de las aplicaciones se pueden mencionar que el espectrómetro integrado en el producto Ledmotive analiza la luz constantemente reflejada por los objetos de la oficina y también reconoce mediante algoritmos computacionales a los usuarios que se desplazan en el espacio, personalizando de esta manera sus preferencias lumínicas. Al ser posible el seguimiento y el reconocimiento de personas u objetos, el sistema se puede usar en otras aplicaciones como seguridad o control en pacientes afectados por alguna dolencia o enfermedad neurológica en hospitales o centros sanitarios.

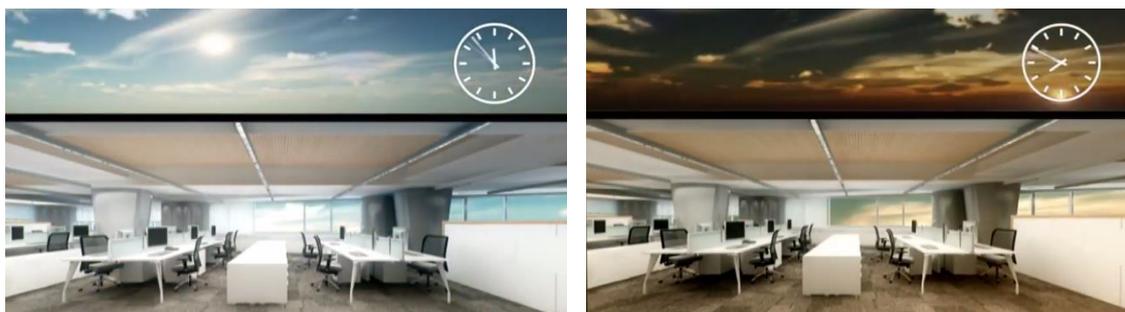


Figura 9. Simulación del funcionamiento del sistema Ledmotive en el interior de una oficina en el día y en la noche.
Fuente. Tra Infografía, 2015

4.2.2. CoeLux

CoeLux es quizás uno de los mayores exponentes de la simulación de luz natural que existe actualmente en el mercado. La empresa italiana reproduce el espectro solar utilizando LEDs de bajo consumo que recrea, de forma artificial, la difusión y transmisión de la luz solar en la atmósfera, simulando rayos de sol que atraviesan un cielo azulado y que entra por los paneles instalados como lucernarios o ventanas.

El efecto se consigue por la nanotecnología que utiliza la empresa, que recrea el proceso de dispersión de Rayleigh en sus paneles, reconstruyendo el efecto de las nanopartículas que hay en la atmósfera, las responsables de que la luz se disperse y de que el cielo sea azul. Cuando la luz del LED atraviesa los paneles, el espectro de luz resultante es igual a la luz natural exterior (Alameda, 2014).

Estos paneles están diseñados para espacios donde la luz natural no puede llegar como hospitales, gimnasios, oficinas, estacionamientos subterráneos, etc.

Actualmente la tecnología CoeLux ofrece tres tipos diferentes de escenarios: tropical, mediterránea y nórdica, que se puede programar de acuerdo al estado de ánimo del usuario. Las clases de paneles que ofrece CoeLux son:

CoeLux 45.

Simula una iluminación típica mediterránea, con un buen equilibrio entre luz y sombra y con un ángulo de elevación solar de 45 grados. Hay tres tipos, CoeLux 45 LC, CoeLux 45 SQUARE (foto 17c. y foto 18), CoeLux 45 HC. La diferencia entre los tres es que uno es para cielorraso (lucernario) y el otro para pared (ventana) y sus dimensiones varían entre sí.

CoeLux 60.

Se trata de un lucernario para espacios en los que se necesite una simulación de luz tropical, bastante vertical, con un mayor contraste de luminancia y sombra y un nivel mínimo de brillo. Su ángulo de elevación solar es de 60 grados.

Al inicio, la tecnología de CoeLux fue diseñada para el campo de la medicina. Según Paolo Di Trapani, fundador y CEO de CoeLux, explica que puede ser útil para mejorar el bienestar de pacientes que han de permanecer largos periodos de tiempo privados de la luz solar, como los que reciben tratamientos de medicina nuclear (Alameda, 2014).



Foto 17a. CoeLux cielo y sol en una tienda de ropa (CoeLux 60).



Foto 17b. CoeLux cielo y sol dentro de Spazio INnovazione of Ars et Inventio.



Foto 17c. Simulación de luz natural en espacios interiores (CoeLux 45 SQUARE).

Fuente. CoeLux, 2017

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 1, la exposición a la luz natural influye tanto en lo psicológico como en lo fisiológico en una persona y su privatización puede ocasionar depresión, malhumor o trastornos como el TAE (Trastorno Afectivo Estacional).

Tanto Ledmotive como CoeLux muestran que es posible reproducir la luz del sol mediante software programados de iluminación artificial, experimentando esa sensación de bienestar y de conexión con el exterior. La ilusión que se crea en el cerebro del usuario permite que éste no se sienta encerrado dentro del espacio, si no que perciba la luz como un medio de contacto inmediato con su entorno.

En CoeLux, ese contacto se lo hace mediante los paneles que simulan ventanas y lucernarios, ya que la relación con el exterior, además de ser lumínico, es visual, y por ende la sensación de estar viendo los rayos del sol y el cielo azulado lo hace más realista.

Pero ¿qué sucede cuando la luz proyectada artificialmente en el interior no concuerda con la luz emitida en el exterior? Se crea una distorsión de la realidad, provocando confusión del tiempo, hora y condiciones meteorológicas en el que se vive. La relación interior – exterior realmente no existe, siendo incoherente el espacio interior con su mismo entorno. La respuesta puede estar en transmitir las condiciones lumínicas de la luz del sol al interior mediante la tecnología LED de manera instantánea, de tal forma que la misma luz que se tiene fuera, se tiene dentro, estableciendo una continuidad en ambas zonas.



Foto 18. Simulación de luz natural en espacios interiores de oficina (CoeLux 45 SQUARE).

Fuente. CoeLux, 2017

4.3. Simulación de luz natural instantánea

Como se mencionó antes, los sistemas lumínicos que simulan la luz natural utilizan softwares donde programan el ciclo del sol durante el día y lo reproducen en sus luminarias. A diferencia de ello, la presente investigación propone bases para la realización de un sistema de iluminación que reproduzca las condiciones lumínicas exteriores pero de manera instantánea con LEDs, creando así una conexión entre el interior y el exterior.

De acuerdo con Folguera Caveda & Muros Alcojor (2013), la luz artificial puede cumplir con tres aspectos de la luz natural como:

Compensación de las oscilaciones de la luz natural

La luz artificial puede adaptarse a las variaciones de la luz solar como intensidad, color, dirección, etc., con sistemas de variación progresiva o instantánea de manera que dichas variaciones no afecten excesivamente a la capacidad visual.

La luz natural, al ser tan variable e impredecible, puede ser trasladada y reproducida de forma artificial con tecnología LED. Para que la ilusión sea creíble se debe de utilizar LEDs que cubran todas las longitudes de ondas del espectro visible para que la luz producida sea similar a la luz solar. La instantaneidad de la luz natural del sistema lumínico propuesto pretende establecer un vínculo no visual con el exterior mediante la luz simulada, así como las ventanas crean una conexión visual interior – exterior.

Transición y adaptación a las condiciones nocturnas

La luz artificial puede crear unos niveles y cualidades de transición de manera que, con determinados tipos de luces, se puedan crear efectos similares a los de la luz natural durante un tiempo y que de noche permitan servir a las necesidades previstas básicas o del diseño.

En el caso del sistema lumínico de la propuesta, la luz artificial emitida es el resultado de las lecturas realizadas con un fotosensor que capta la temperatura de color de la luz natural exterior durante el día y lo reproduce inmediatamente a las lámparas LED. Cuando se acerca la noche y la luz natural es escasa, los LEDs trabajan como una lámpara artificial convencional, a diferencia de los conductos solares que necesitan de iluminación artificial complementaria para alumbrar en la noche.

Acomodación por las transiciones interior – exterior, de día y de noche

En situación dinámica del usuario entrando o saliendo de un espacio interior, es conveniente resolver la acomodación visual durante la transición entre estos espacios que tienen niveles de iluminación muy diferenciados.

El ojo necesita de un tiempo de adaptación al pasar de un espacio a otro con valores de iluminancia muy diferentes. Este tiempo varía si el cambio se hace de un espacio iluminado a un espacio oscuro o al revés. La adaptación se produce más rápidamente al pasar de la oscuridad a la luz que al revés.

Con la simulación de luz natural instantánea, la transición visual interior – exterior va a ser continua ya que la percepción cromática del exterior será igual a la luz reproducida en el interior y por lo tanto no habrá diferencia alguna en la temperatura de color de ambos ambientes.

Según M.C. Lam (1977) la necesidad de la orientación en el tiempo nos da expectativas definidas de cómo debería ser la luz y la oscuridad en el exterior jugando un papel importante en la evaluación de cualquier entorno luminoso, estableciendo niveles de referencia en el cerebro contra el ambiente inmediato. Cuando el ambiente interior es más brillante que la escena exterior durante el día, la sensación de oscuridad visual resulta contradictoria con respecto a la orientación en el tiempo. Un ejemplo de ello son los sistemas de simulación de luz natural programada que, al no corresponder con los parámetros lumínicos exteriores reales, crea una desconexión visual interior – exterior.

Los espacios que carecen de ventanas u otro elemento arquitectónico que permite visualizar las condiciones exteriores, son los indicados para implementar sistemas de simulación de luz natural instantánea. Con el sistema lumínico propuesto, el usuario podrá orientarse en el tiempo y espacio debido a la luz percibida en el espacio interior sin necesidad de tener una ventana que le comunique cuáles son las condiciones exteriores de ese momento.

4.3.1. Descripción del sistema de iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs

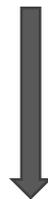
De acuerdo con lo conversado en SAKMA Electrónica Industrial S.A.U. y Ledmotive Technologies S.L., se debe de considerar ciertos elementos para el funcionamiento del prototipo de simulación de luz natural instantánea con LEDs.

1. Fotosensor



Se necesitará de un fotosensor que mida constantemente las condiciones lumínicas exteriores como es la temperatura de color (T_c). Se ubicará en la parte exterior del edificio evitando los obstáculos que provocan sombras e interfieran con la luz que recibe el sensor.

2. Interfaz



El interfaz es el medio de comunicación entre el sensor y la lámpara LED. Puede ser un software que procese el paquete de datos (valores de T_c) que le envía el fotosensor y lo convierta en información codificada para que las lámparas LED entienda, procese y reproduzca instantáneamente la luz exterior.

3. Control de mando



Para controlar la cantidad de luz que emite las lámparas LEDs, se recomienda utilizar la modulación PWM. La señal digital PWM es aquella que la intensidad se mantiene constante durante un determinado intervalo de tiempo, tras el cual la señal cambia a otro valor constante.

Al variar la temperatura de color correlacionada, la modulación PWM hace que el cambio sea sutil, sin interrupciones, como lo hace la luz natural.

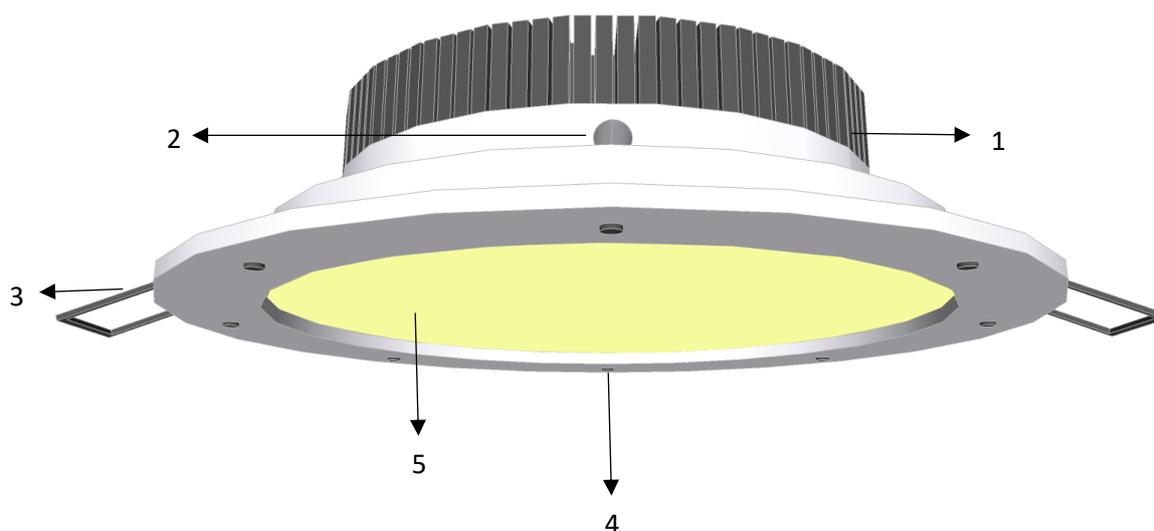
4. Lámparas LED

Para el prototipo recomiendan el uso de LEDs de espectro completo, ya que reproducen fielmente la luz natural cubriendo todo el espectro visible. Además, los LEDs que se utilizarán en el prototipo necesitan tener un índice de reproducción cromática alto (90).

Independientemente de la T_{cc} que se esté reproduciendo, si el LED no tiene un IRC alto, no tendrá la capacidad de representar fielmente los colores de los objetos en el interior, tal como lo hace la luz natural.

Se realizó un esquema de cómo podría ser el diseño de la luminaria (figura 9) y los componentes que llevaría. La luminaria tiene la forma y el diseño de un ojo de “buey”, tiene las dimensiones de 56cm de diámetro exterior y 44cm de diámetro interior (dimensiones del difusor de los conductos solares del aula C-B4) y posee un disipador de calor el cual permite gestionar la temperatura emitida por el LED.

Para el experimento se utilizará bombillas biodinámicas LIFX LED RGB que dispone la ETSAB. A pesar de no ser de tipo full spectrum, su IRC es de 90, lo cual es un valor muy aceptable para un LED.



COMPONENTES DE LA LUMINARIA PROPUESTA

- 1 - DISIPADOR DE CALOR
- 2 - ORIFICIO PARA PASAR LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS
- 3 - MUELLES DE FIJACIÓN AL TECHO (EMPOTRABLE)
- 4 - MARCO DE ACERO FOSFATADO
Y PINTADO BLANCO EPOXI POLIESTER (56CM DE DIÁMETRO)
- 5 - CRISTAL TRANSPARENTE, SERIGRAFIADO U OPAL

Figura 9. Luminaria propuesta para implementar en el aula C-B7.

Fuente. Elaboración propia

4.3.2. Implementación del sistema de iluminación de traslación de luz instantánea con LEDs en las aulas de la ETSAB

El objetivo del trabajo de investigación es plantear un sistema lumínico que reproduzca las condiciones exteriores de manera instantánea con tecnología LED e implementarlo en las aulas de la ETSAB como es la C-B5, C-B6, C-B7, C-B8, C-B9 Y C-B10. Las aulas mencionadas disponen de iluminación artificial proporcionada por lámparas fluorescentes e iluminación natural de las ventanas, por lo que se propone reemplazar las luminarias fluorescentes por el sistema lumínico de la propuesta.



Foto 19. Condición actual aula C-B7.

Fuente. Elaboración propia

Figura 11. Ubicación de aulas de la ETSAB donde se implementará el sistema lumínico propuesto.

Fuente. ETSAB, 2017

Como las 6 aulas donde se quiere implementar el sistema son prácticamente similares (tienen casi la misma área y las mismas condiciones lumínicas interiores), se eligió el aula C-B7 como el espacio para proyectar gráficamente el sistema de iluminación que se propone en la investigación.

Actualmente el aula C-B7 posee 30 lámparas fluorescentes suspendidas del techo y dispuestas una a lado de otra, tienen 1.50m de longitud con una potencia de 56W, lo cual refleja un alto consumo de energía por día. Los tubos fluorescentes poseen dos dispositivos para su encendido (reactancia y cebador) lo que provoca un gasto de energía por sí mismos.

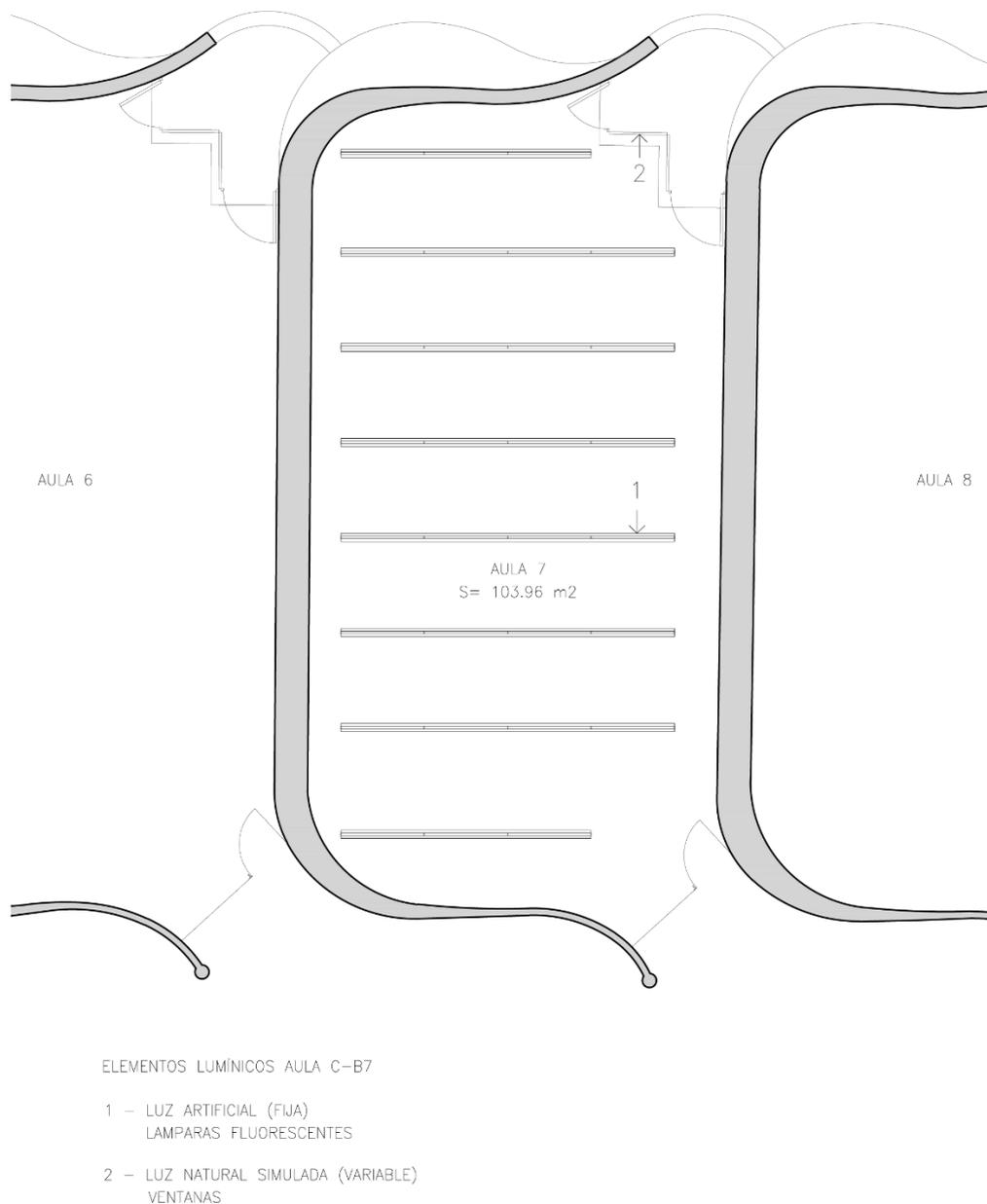


Figura 12. Plano de condición actual del aula C-B7.

Fuente. Elaboración propia

Con la aplicación del sistema de iluminación LED en las aulas, se pretende disminuir el consumo energético de las lámparas fluorescentes y proporcionar una mejor calidad de luz.

En la tabla 11, se muestra la cantidad de energía que consume las lámparas fluorescentes y los LEDs. En el caso de los tubos fluorescentes, el consumo diario de energía es de 20,16 KWh, mientras que las lámparas LED solo consumen 2,08 KWh.

Consumo de energía de lámparas fluorescentes vs LED en el aula CB-7						
Tipo de iluminación artificial	Cantidad	Potencia (W)	Equipos auxiliares (W)	Horas diarias	Energía consumida	Consumo diario KWh
Lámparas fluorescentes	30	56	11,20	10	20160	20,16
Lámparas LED	13	16	0	10	2080	2,08

Tabla 11. Consumo de energía de lámparas fluorescentes vs LEDs en el aula C-B7

Fuente. Elaboración propia

Se obtiene un ahorro significativo de un 80% a un 90% si se reemplaza las lámparas fluorescentes existentes por las lámparas LED de la propuesta considerando solo un aula de clases. Si se replica en el resto de aulas, el ahorro sería mucho mayor para la ETSAB.

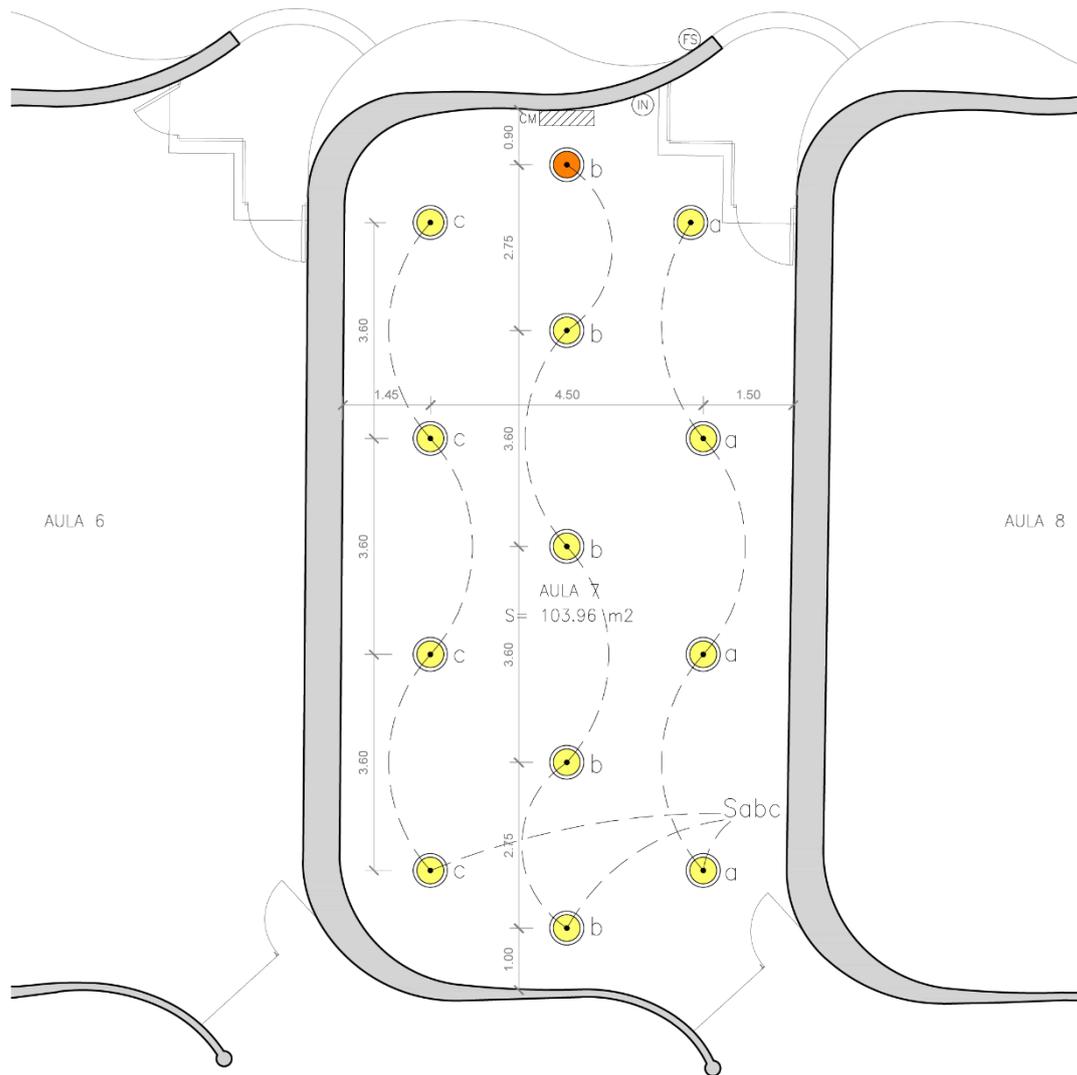
Costo de consumo de energía de lámparas fluorescentes vs LED en el aula C-B7					
Tipo de iluminación artificial	Consumo diario KWh	Euros/KWh	Total costo diario	Total costo mensual	Total costo anual
Lámparas fluorescentes	20,16	0,11 €	2,18 €	65,42 €	795,88 €
Lámparas LED	2,08	0,11 €	0,22 €	6,75 €	82,12 €
Ahorro con LEDs			1,96 €	58,67 €	713,77 €

Tabla 12. Costo de consumo de energía de lámparas fluorescentes vs LEDs en el aula C-B7

Fuente. Elaboración propia

A diferencia de la condición de iluminación actual, se propone instalar 9 luminarias LED con distribución de retícula de elementos puntiformes alternadas para conseguir un efecto monótono o uniforme del techo, descartando la posibilidad de tener una iluminación diferenciada. Como se mencionó anteriormente, el diseño redondo de las luminarias se realizó pensando en simular a un conducto solar, ya que la luz que produce los dispositivos de la propuesta simula las condiciones lumínicas exteriores y por lo tanto se quiso maximizar la ilusión de estar recibiendo una luz directa del Sol de un “solar tube” con el diseño de la luminaria.

Plano de conexión eléctrica de las luminarias de la propuesta



PROPUESTA SISTEMA LUMÍNICO DE LUZ
NATURAL INSTANTÁNEA CON LEDS
AULA C-B7

- Ⓢ 1 - FOTOSENSOR
- Ⓜ 2 - INTERFAZ
- CM 3 - CONTROL DE MANDO
- 4 - LÁMPARAS LED DE ESPECTRO COMPLETO
- (rojo) LÁMPARA LED MASTER
- (amarillo) LÁMPARAS LED ESCLAVOS
- Sabc INTERRUPTOR TRIPLE
- CONEXIÓN ELÉCTRICA

Figura 13. Plano de instalación eléctrica propuesta para el aula C-B7.

Fuente. Elaboración propia

En el plano de la conexión eléctrica de las luminarias con LED, se puede observar la distribución de las luminarias en tres filas y de forma alternada, las mismas que se conectan a un interruptor triple y funcionan como una iluminación artificial convencional.

La ventaja que tiene el sistema de iluminación de luz instantánea con LEDs es que en el día las luminarias brindan al usuario las características propias de la luz natural, lo cual genera un bienestar físico y psicológico en la persona, y por la noche, o cuando el nivel de iluminación exterior es bajo, el sistema permite tener las características propias de la luz artificial.

Dependiendo del tipo de actividad que se realice en el aula, el sistema lumínico puede proporcionar la temperatura de color y la cantidad de luz que más conviene. Por ejemplo si el tipo de actividad en la clase es relajada como conferencias, exámenes, etc., se programaría un nivel bajo de iluminación con luz cálida y para una clase más dinámica o activa como talleres o debates, se programaría un nivel alto de iluminación con luz fría.

Como se mencionó anteriormente, el sistema de iluminación de la propuesta necesita de la implementación de 4 elementos electrónicos y lumínicos para que funcione, los mismos que se observan en la figura 14. El primero de ellos es el fotosensor (FS) que se encontrará situado en la parte exterior tomando lecturas de temperatura de color cada 5 minutos y que lo captará el interfaz (IN). Tanto el fotosensor como el interfaz se conectarán vía Wi-Fi, de esta manera será más fácil la conexión. Una vez procesada la información en el interfaz, se procederá a enviar el paquete de datos a la lámpara LED “maestra” quien se encargará de emitir la información lumínica al resto de lámparas que trabajan en régimen de esclavo. En el transcurso del día, el sensor captará valores de temperatura de color que será posible transmitirlos de manera instantánea y automática a las lámparas LED con el sistema lumínico planteado.

Además el sistema cuenta con un panel de control donde se podrá verificar la temperatura de color que se tiene en ese momento y regular la cantidad de luz que emiten las luminarias. El control de mando funcionará como la app del móvil de las bombillas LIFX, donde se podrá manejar las condiciones lumínicas interiores del aula como el color y la intensidad de la luz, una vez que el día haya acabado y se requiera de las funciones artificiales del LED. Además, con el panel de control, las luminarias pueden funcionar de manera independiente o en conjunto, dependiendo del ambiente lumínico que se requiere en el aula.

La obtención de los aparatos electrónicos se hará mediante el contacto de empresas de iluminación que están relacionados con el tema de la iluminación biodinámica en el mercado como Ledmotive. Si se adquiere los dispositivos por separado, se tendrá que verificar la compatibilidad entre ellos para que de esta manera puedan funcionar correctamente.

4.3.3. Comparación de sistema de simulación de luz natural instantánea con conductos solares.

Se puede realizar una comparación de las posibles ventajas y desventajas de los conductos solares con el sistema de iluminación dinámica – instantánea con LEDs de la propuesta. La comparación permitirá analizar ambos sistemas que poseen las mismas características lumínicas pero que provienen de diferentes fuentes de luz.

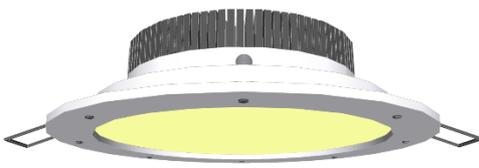
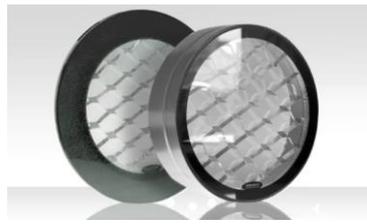
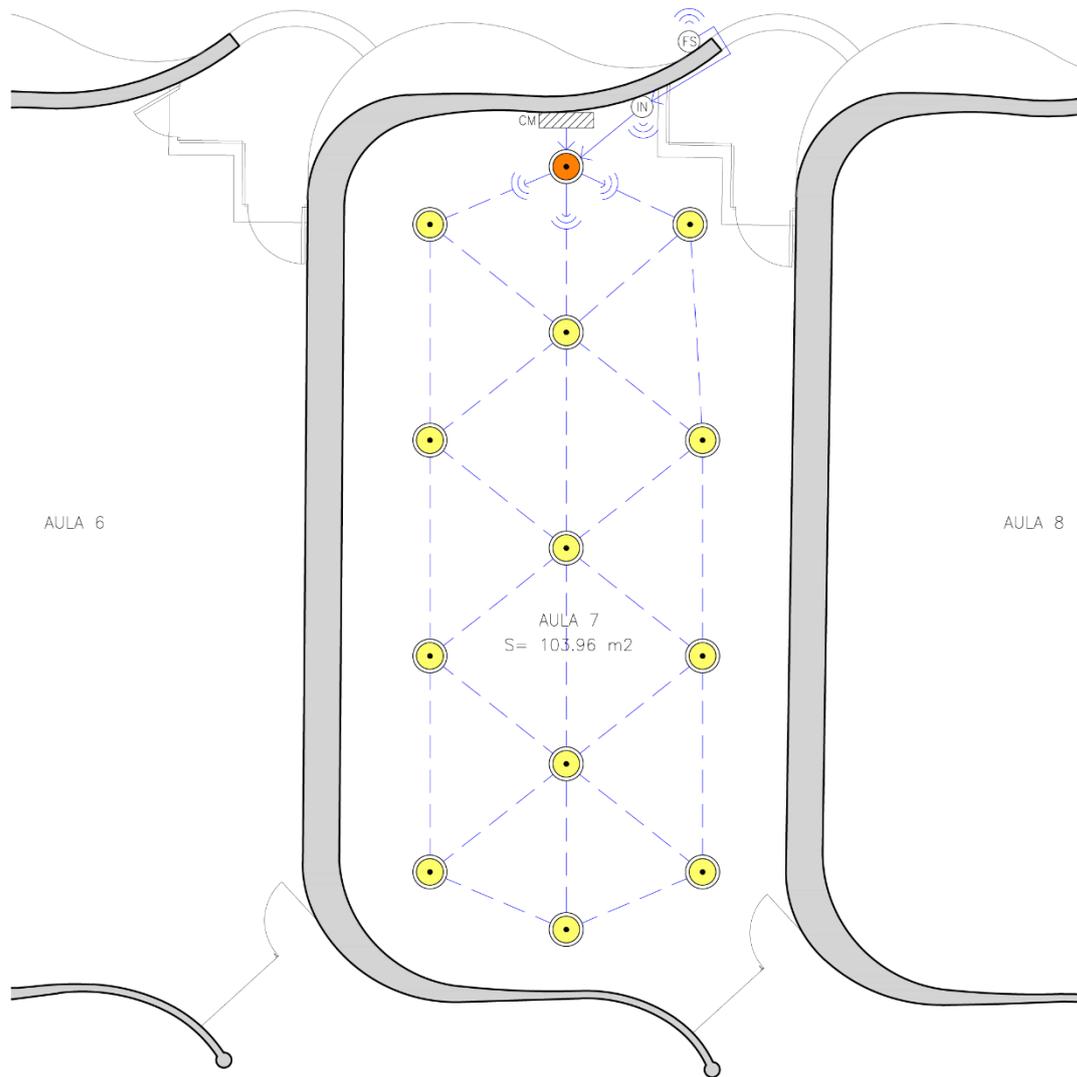
	SISTEMA DINÁMICO - INSTANTÁNEO SISTEMA LUMÍNICO PROPUESTA	SISTEMA DINÁMICO - INSTANTÁNEO CONDUCTOS SOLARES
Fuente	Luz artificial - LEDs	Luz natural
Tipo de iluminación	Cenital	Cenital
Montaje	Fácil, ya que no requiere de intervención en la estructura del edificio, solo conexiones eléctricas.	Difícil, ya que requiere de intervención en la estructura del edificio y su montaje dependerá del tipo de cubierta (inclinada, plana, etc.)
Mantenimiento	Mantenimiento leve, ya que periódicamente se debe de verificar el estado de los dispositivos electrónicos para que funcione correctamente.	Si requiere, ya que entre las juntas del domo, difusor y base pueden entrar insectos, polvo y suciedad si no está bien sellado, interrumpiendo el paso de la luz solar.
Ubicación	Al ser un sistema de alumbrado artificial se puede ubicar en cualquier lugar, incluso en sótanos o parqueaderos, en lugares aislados con el exterior.	No se puede colocar en cualquier lugar, solo en espacios con relación directa a la cubierta o en espacios que no superen la longitud máxima recomendada del tubo.
Ausencia de luz de noche	Cuando no hay suficiente luz, la misma lámpara LED proporciona energía eléctrica necesaria.	Cuando no hay suficiente luz, necesita de iluminación artificial extra para poder alumbrar el aula.
Apagado de luz	Mediante el control de mando se puede apagar la luz o mediante el interruptor como lámparas artificiales convencionales.	Sistema de cierre motorizado
Radiación	No emite radiación ultravioleta ni infrarroja, es decir no emite calor por ser LED.	Por ser fuente de luz solar, emite el espectro total de radiación electromagnética.
Vida útil	Vida útil prolongada	Garantía de 10 años
Costo de instalación	A valorar. Se intuye que el costo será menor ya que a diferencia del conducto solar, solo necesita realizar conexiones eléctricas.	A valorar. El costo será elevado ya que implica interferir en la arquitectura del lugar, se necesita impermeabilizar, etc.
Consumo diario KWh	2,08 KWh, es decir 0,22 € diarios	La fuente de luz es natural, por lo que el consumo de energía es 0.
		

Tabla 13. Cuadro comparativo entre sistema lumínico de luz natural instantánea con conductos solares.
Fuente. Elaboración propia

Plano de conexión de los dispositivos electrónicos del sistema lumínico de la propuesta



PROPUESTA SISTEMA LUMÍNICO DE LUZ
NATURAL INSTANTÁNEA CON LEDS
AULA C-B7

-  1 - FOTOSENSOR
-  2 - INTERFAZ
-  3 - CONTROL DE MANDO
- 4 - LÁMPARAS LED DE ESPECTRO COMPLETO
-  LÁMPARA LED MASTER
-  LÁMPARAS LED ESCLAVOS
-  CONEXIÓN WI-FI
-  CONEXIÓN ENTRE LÁMPARAS LED

Figura 14. Plano de instalación del sistema lumínico propuesto en el aula C-B7.

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO 5. FASE EXPERIMENTAL

5.1 Descripción del experimento 75

5.2 Encuestas 82

5.3 Resultados 84

5.4 Conclusiones del experimento 129

CAPÍTULO 5.

FASE EXPERIMENTAL

En este capítulo se detallará paso a paso el procedimiento que se siguió para conseguir los resultados de la investigación.

5.1 Descripción del experimento

5.1.1 Lugar del experimento

El espacio seleccionado para realizar el experimento es el aula C-B4, ubicado en el nivel 0 de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAB) de la Universidad Politécnica de Catalunya. Actualmente el aula está iluminada artificialmente con lámparas fluorescentes que se suspenden del techo y también de luz natural proporcionada por los conductos solares y por las ventanas ubicadas a un extremo del aula.

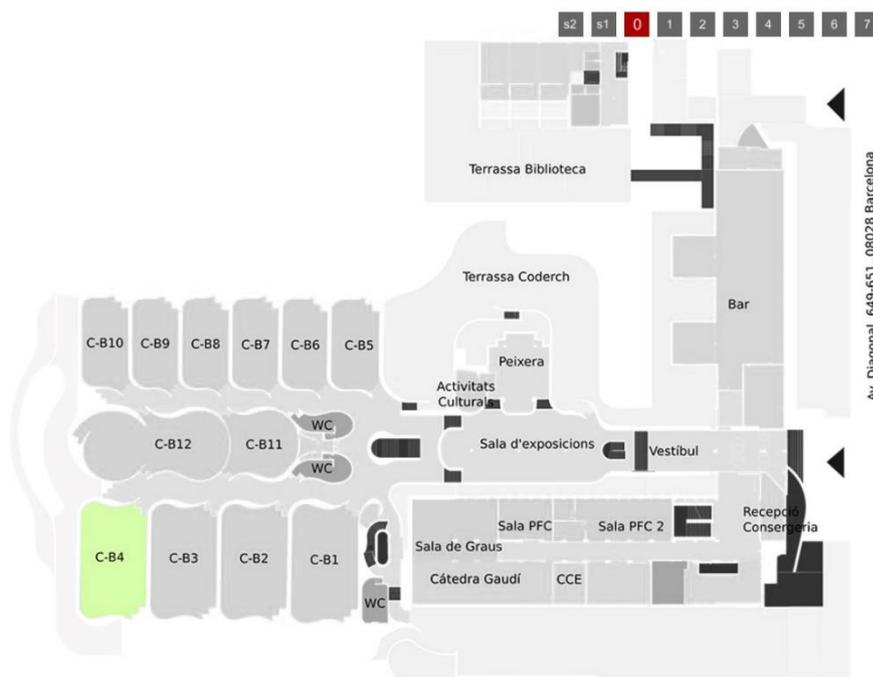


Figura 15. Ubicación del aula C-B4 en la ETSAB.

Fuente. ETSAB, 2017

Los conductos solares DEPLOSUN dentro del aula poseen un sistema de cierre motorizado que está conectado a un interruptor, por lo que es posible obstaculizar la luz del sol para convertir el aula en sala de proyecciones o presentaciones.

Además, para conseguir un máximo ahorro energético, se le incorporó a la iluminación artificial existente unos fotosensores que miden la luz natural disponible. En el día, los fotosensores regulan la potencia de los fluorescentes aportando solo la luz artificial necesaria y ya en la noche trabajan al cien por cien (Espacio Solar, 2008).

5.1.2 Verificación y obtención de dispositivos

Se eligió esta aula ya que en un Trabajo de Fin de Máster anterior se realizó una simulación de luz natural y se dejaron instaladas dentro de los conductos solares 5 bombillas biodinámicas de la marca LIFX, por lo que fueron aprovechadas para la realización de este experimento.

Las bombillas se encuentran suspendidas y fijadas en una barra de madera ubicada debajo de la compuerta del conducto para que no afecte el funcionamiento de cierre automatizado.

Antes de proceder con la realización de las encuestas, se hizo una verificación del estado y funcionamiento de los dispositivos a utilizar.



Foto 20. Bombilla biodinámica LIFX (derecha) y espectrómetro Sekonic Spectromaster C-700 (izquierda).
Fuente. Elaboración propia

En el caso del espectrómetro, se tuvo que adquirir ya que la ETSAB no disponía de este aparato lumínico. El espectrómetro utilizado es el Termo colorímetro Sekonic Spectromaster C-700, el mismo que permite medir de manera muy precisa el espectro de luz de fuentes como LED, HMI, fluorescente tungsteno, flash con cable y luz natural. Para el experimento se necesitó de este espectrómetro para tomar medidas de temperatura de color correlacionada de la luz natural en diferentes horas del día (cada 5 minutos) para posteriormente programarlas de manera instantánea, a través de la aplicación de LIFX a las bombillas.



Foto 21. Montaje de las bombillas LIFX dentro de los conductos solares.

Fuente. Sosa, 2016

En el caso de las bombillas LIFX, se tuvieron que retirar de los conductos solares para resetearlas y conectarlas a la red Wi-Fi del router y así controlarlas a través de la aplicación de LIFX para Android en el móvil.

Para reconfigurar cada una de las bombillas se procedió a colocarlas en una lámpara de escritorio para poderlas apagar y encender 5 veces de modo constante. Una vez realizado el procedimiento, la bombilla se cambia de color a rojo, verde y azul, mostrando que es un tipo de LED RGB.



Foto 22. Proceso de restablecimiento de las bombillas LIFX mediante el modo de encendido y apagado.

Fuente. Elaboración propia

5.1.3. Definición de elementos y condiciones lumínicas

En el aula de clases C-B4 de la ETSAB, se puede encontrar tanto iluminación cenital proporcionada por la combinación de conductos solares y lámparas fluorescentes, como iluminación lateral de las ventanas. Además las bombillas biodinámicas LIFX que se instalaron previamente en los conductos solares para realizar la simulación de luz natural instantánea, también forma parte de la iluminación artificial cenital.

Se tomaron en cuenta los elementos lumínicos del aula para analizar la temperatura de color que proporciona cada fuente de luz y así determinar las condiciones de iluminación que se aplicarán en el experimento. Las pruebas de medición de Tcc de los elementos lumínicos se realizaron el día martes 20 de junio de 2017 con el espectrómetro Sekonic Spectromaster C-700.

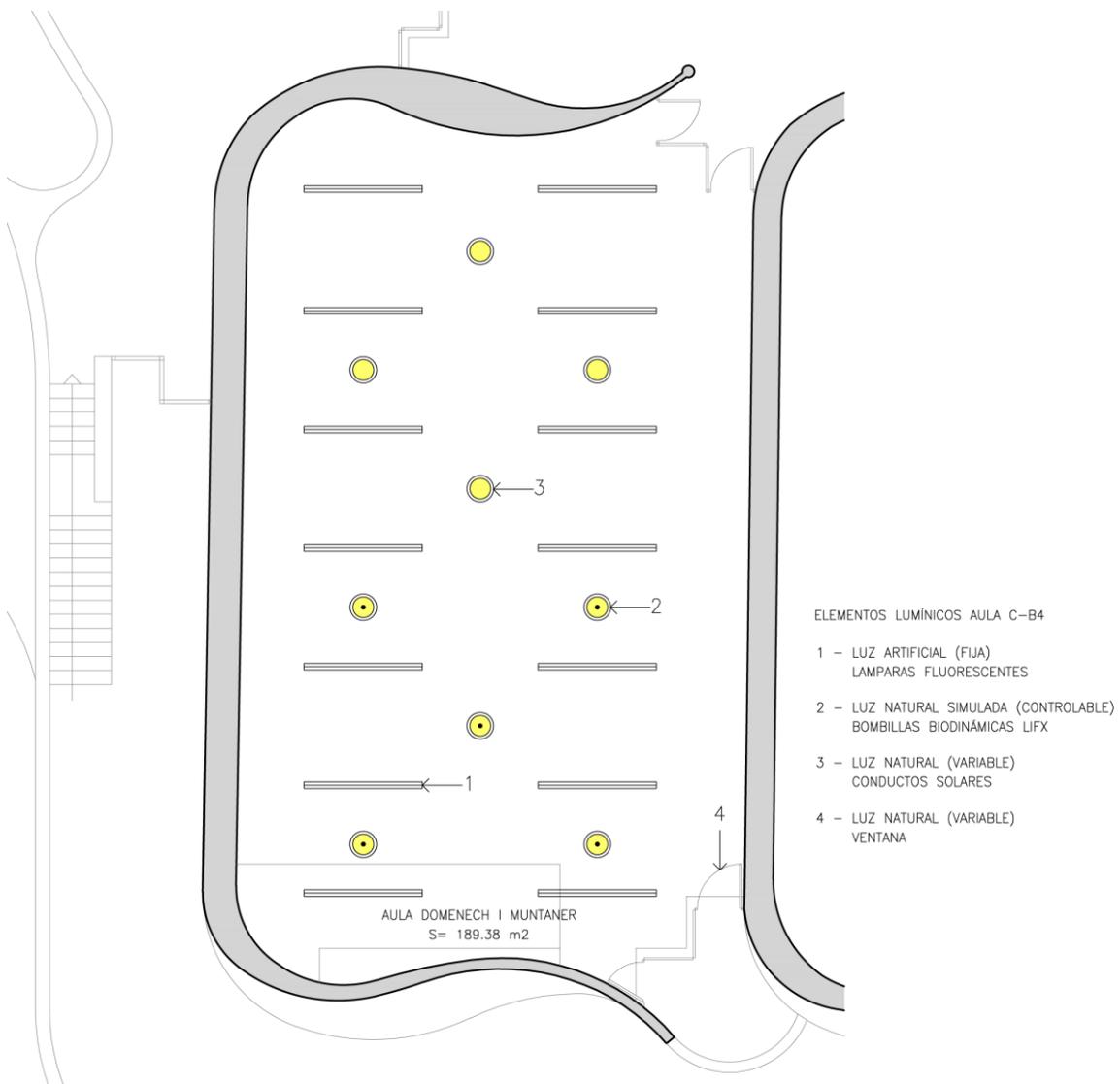


Figura 16. Elementos lumínicos que componen la iluminación natural y artificial dentro del aula C-B4

Fuente. Elaboración propia

Elementos lumínicos

- Lámparas fluorescentes.** Existen en el aula 14 lámparas fluorescentes. Su distribución proporcionan uniformidad en la iluminación del espacio interior, siendo un elemento complementario a la iluminación natural de los conductos solares.

La temperatura de color (T_{cc}) de las lámparas fluorescentes es fija, es decir no es modificable, por lo que su T_{cc} está predeterminada desde su fabricación.

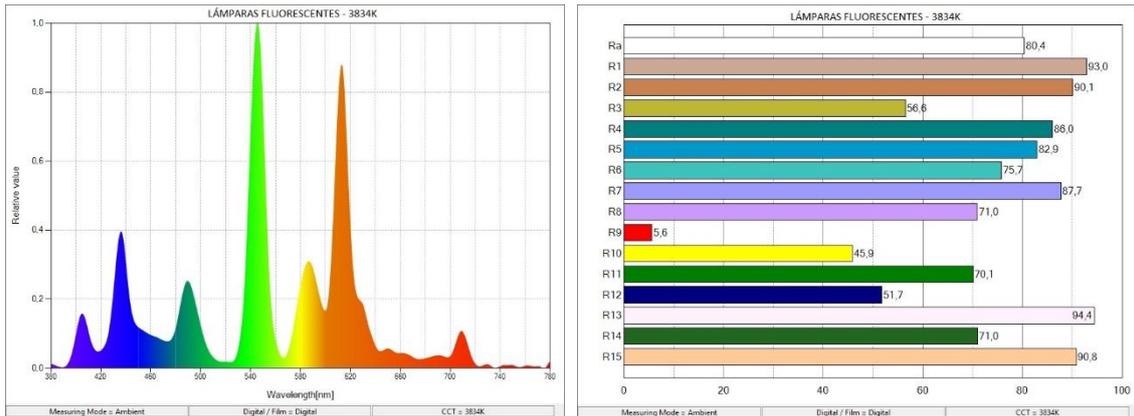


Figura 17. Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz artificial. Lámparas fluorescentes

Fuente. Elaboración propia

- Bombillas biodinámicas LIFX.** Se colocaron dentro de los conductos solares 5 bombillas LED de la marca LIFX para realizar la simulación de luz natural instantánea. Como se mencionó anteriormente en el capítulo 4, la temperatura de color correlacionada (T_{cc}) de las bombillas se puede cambiar desde la app de LIFX en el smartphone, y dependerá de la lectura que realice el espectrómetro con respecto a la temperatura de color de la luz natural en ese momento.

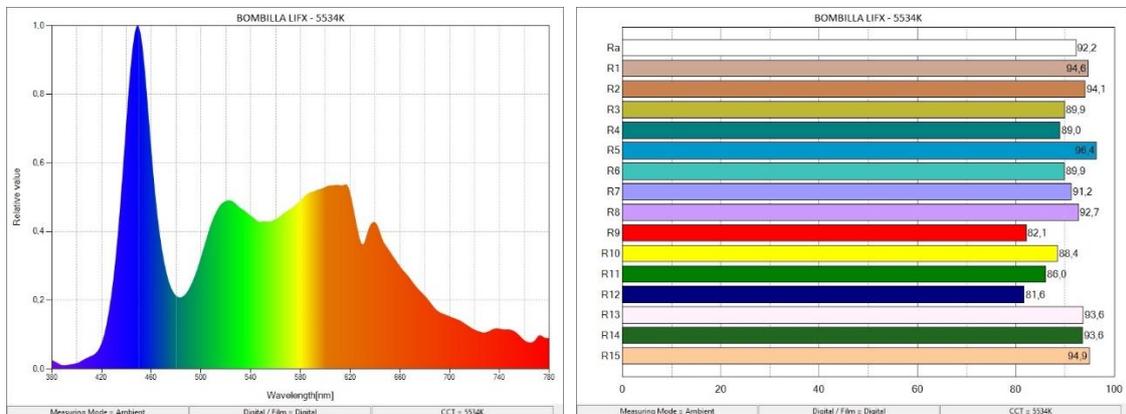


Figura 18. Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz artificial. Bombillas biodinámicas LIFX a 5500K.

Fuente. Elaboración propia

En la figura 10 se puede observar que las bombillas se programaron a 5500 K en la app de LIFX (5534 K medición en el espectrómetro) ya que la lectura de temperatura de color se realizó a las 10 de la mañana. A pesar de que las bombillas son RGB, su IRC logra llegar a 92,2 siendo un valor muy próximo al de la luz natural.

- 3. Conductos solares.** En el aula hay 9 conductos solares, los mismos que cuentan con difusores que ayudan a distribuir de forma homogénea la luz proveniente del exterior en el interior del espacio. Al ser iluminación natural, la temperatura de color es variable durante todo el día y por lo tanto es imposible predecir sin aparatos de medición la temperatura de color de una hora determinada.

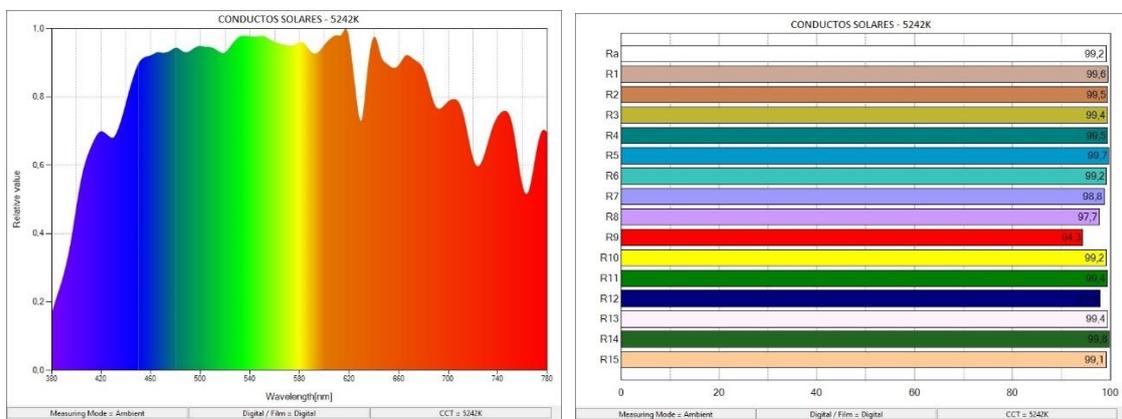


Figura 19. Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz natural. Conductos solares DEPLOSUN.

Fuente. Elaboración propia

- 4. Ventana.** Al igual que los conductos solares, la luz natural proveniente de las ventanas es variable, por lo que la temperatura de color cambia en el transcurso del día. Tanto la temperatura de color de la luz natural procedente de los conductos solares y de las ventanas es igual como muestra las figuras 12 y 13.

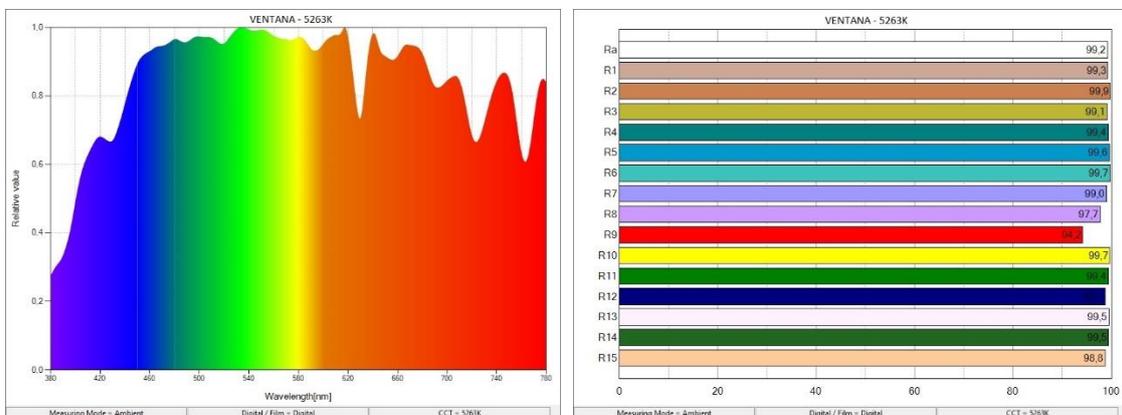


Figura 20. Distribución espectral e índice de reproducción cromática de una fuente de luz natural. Exterior de ventana en el aula C-B4.

Fuente. Elaboración propia

Condiciones lumínicas

Con los elementos lumínicos señalados anteriormente, se establecieron dos condiciones para el experimento dentro del aula:

Condición 1. Ingreso de luz natural por ventanas (4) y conductos solares (2) combinado con luz artificial de las lámparas fluorescentes (1). La condición 1 es la situación actual del aula.



Foto 23. Iluminación natural y artificial existente en el aula C-B4. Condición 1

Fuente. Elaboración propia

Condición 2. Ingreso de luz natural por ventanas (4) combinado con luz natural simulada con LEDs (3) e iluminación artificial de las lámparas fluorescentes (1). La condición 2 es la situación creada para el experimento.

Al tener solo 5 bombillas LIFX en los conductos solares, el nivel de iluminación no era suficiente en todo el área del aula, por lo que se decidió utilizar también las lámparas fluorescentes y así tener una iluminación más uniforme.



Foto 24. Iluminación natural y artificial propuesta en el aula C-B4. Condición 2

Fuente. Elaboración propia

Condición 3. Ingreso de luz natural por ventanas (4) combinado con iluminación artificial de las lámparas fluorescentes (1).

Se estableció una Condición 3, donde los participantes evaluarán el grado de satisfacción que tienen con respecto a la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural exterior. Definirán si el confort visual que se obtiene a través de esta luz es más agradable o menos agradable que la condición 2.



Foto 25. Iluminación natural y artificial existente en el aula C-B4. Condición 3
Fuente. Elaboración propia

5.2. Encuestas

Las encuestas se realizaron en función de conocer y valorar la percepción y confort visual de los participantes dentro del espacio iluminado de forma natural y artificial. Las preguntas se formularon a partir de conocer la edad y género del participante y su percepción con respecto al nivel de luminancia, iluminancia y deslumbramiento, y la cromaticidad en el espacio visual como es la apariencia y el rendimiento de color. Además la valoración de la relación interior – exterior mediante la luz percibida con el sistema lumínico de simulación de luz natural se contempla en la encuesta.

Se diseñó un modelo de encuesta que contiene 15 preguntas para la Condición 1 y 17 preguntas para la Condición 2 y 3. Las primeras 15 preguntas se repiten tanto para la Condición 1 como para la Condición 2 con el fin de comparar la sensación de bienestar que tienen los participantes bajo el efecto de la luz natural y la luz natural simulada.

La pregunta 1 hasta la pregunta 5 evalúa la percepción de cromaticidad visual, la pregunta 6 hasta la pregunta 8 evalúa la relación interior – exterior de la luz de los conductos con respecto

a la luz exterior y la pregunta 9 hasta la pregunta 15 valora el confort visual de la iluminación dentro del aula. El método de evaluación utilizado fue la escala de Likert, donde (1) es Totalmente en desacuerdo y (4) es Totalmente de acuerdo.

El experimento se realizó el día lunes 26 de junio del 2017 y se dividió en tres periodos: A las 10h00, 14h00 y 18h00. La duración de cada experimento en las horas indicadas fue de 30 minutos y se dividió en dos fases: Los primeros 15 minutos se estableció la condición 1 y los 15 minutos restantes la condición 2 y 3.

En el transcurso del experimento, se realizaron lecturas de temperatura de color correlacionada (T_{cc}) de la luz natural exterior con el espectrómetro y se reprodujeron dichas temperaturas de forma instantánea a las bombillas biodinámicas por medio de la programación manual en la aplicación para smartphone de LIFX. Las variaciones de T_{cc} en las bombillas se realizaron cada 5 minutos.

5.2.1 Participantes y pre-instrucción

Debido a que los estudiantes de Arquitectura de la ETSAB culminaron sus clases antes del día del experimento, los participantes seleccionados eran estudiantes del Máster Universitario MBArch de la ETSAB y estudiantes de otras universidades.

Antes de iniciar el experimento, se dieron las instrucciones de cómo debería ser llenada la encuesta. Además se les indicó cuáles eran los elementos lumínicos del aula considerados en la encuesta, sin mencionar la existencia de las bombillas biodinámicas LIFX dentro de los conductos solares para que no influyeran en los resultados de las encuestas.



Foto 26. Participantes de la encuesta realizada en el aula C-B4
Fuente. Elaboración propia

5.3 Resultados

5.3.1. Hora de la mañana. 10h00

Entre las 10h00 y 10h30 se registró con el espectrómetro una variación mínima de los valores de temperatura de color. El valor más bajo fue de 5214K y el más alto fue de 5628K, los mismos que se programaron simultáneamente en las bombillas LIFX. Debido a que la app de LIFX solo permite cambiar el color de la luz en valores de 500, durante los 30 minutos que duró la encuesta, se varió la temperatura de color de las bombillas en 5000K y 5500K.

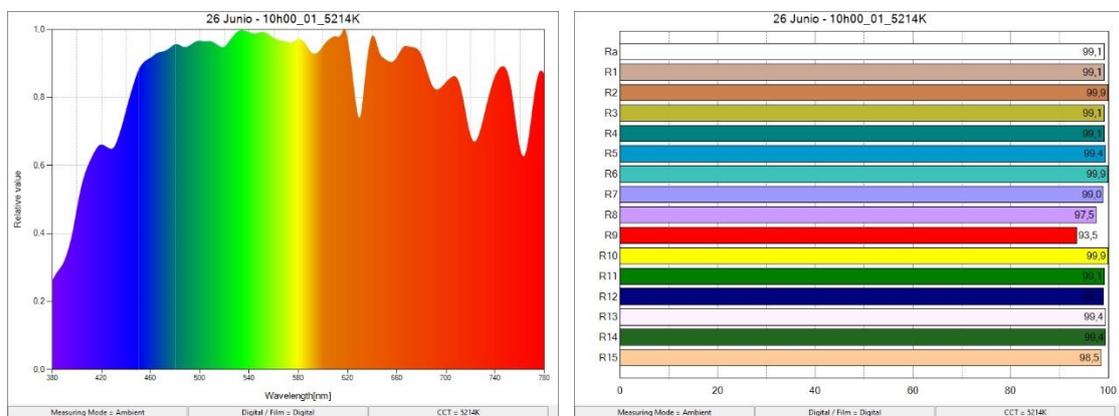


Figura 21. Distribución espectral (izquierda) e índice de reproducción cromática (derecha) de la luz exterior a 5214K.

Fuente. Elaboración propia

Características de los participantes

Para el experimento de las 10h00, se encuestaron a 15 participantes (7 mujeres y 6 hombres). Sus edades oscilaban entre 25 y 34 años, siendo 25 la edad con mayor porcentaje.

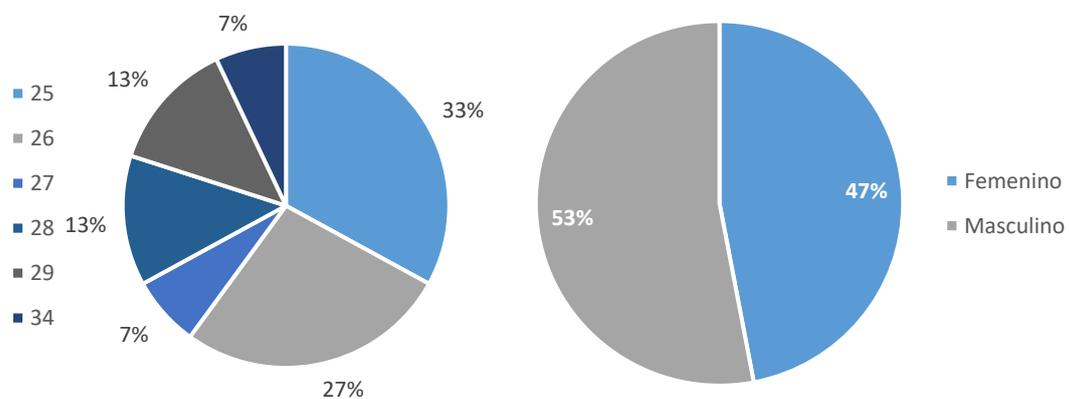
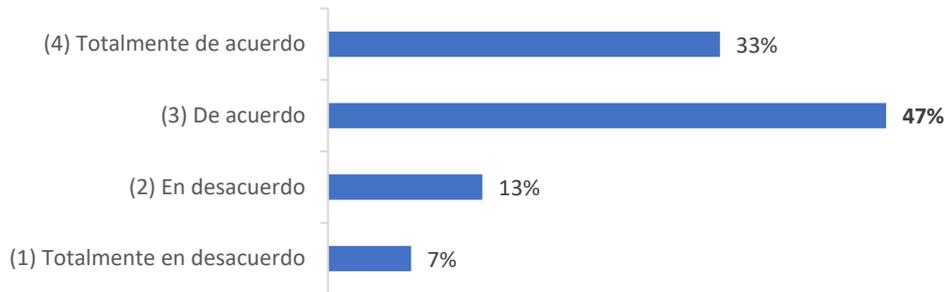


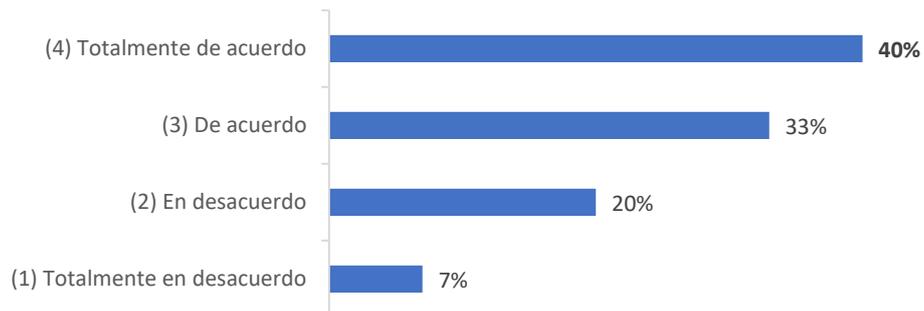
Figura 22. Edades de los participantes (izquierda) y distribución de género de los participantes (derecha) a las 10h00. **Fuente.** Elaboración propia

Condición 1. Ingreso de luz natural por ventanas y conductos solares combinado con luz artificial de las lámparas fluorescentes.

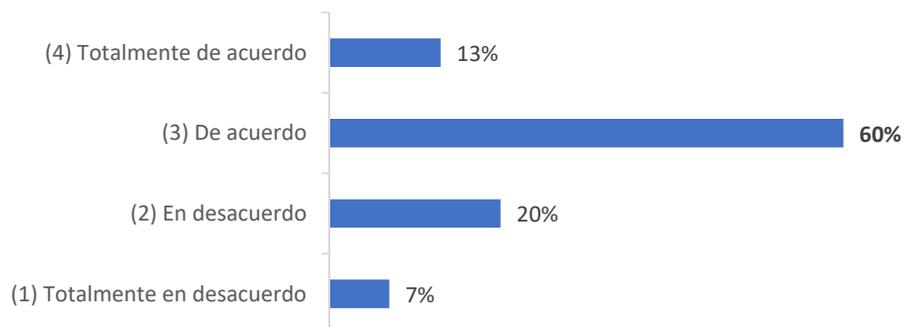
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



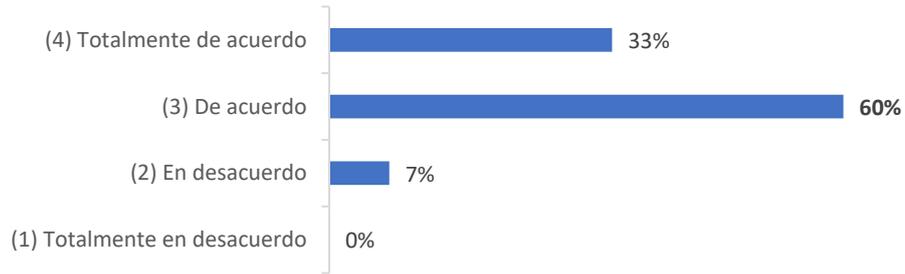
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



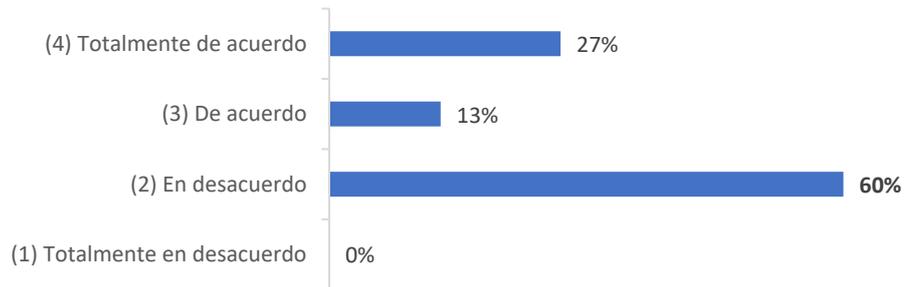
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



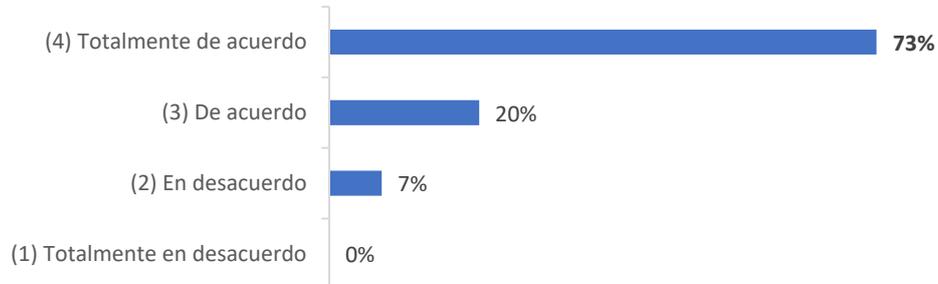
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



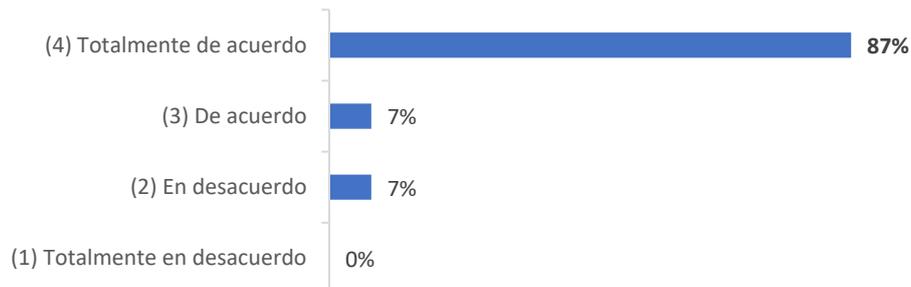
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



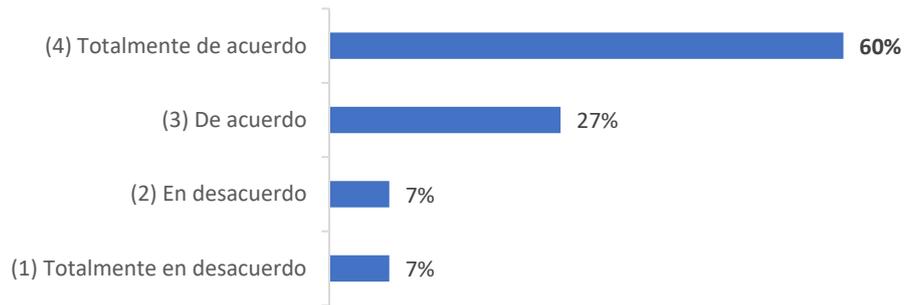
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.



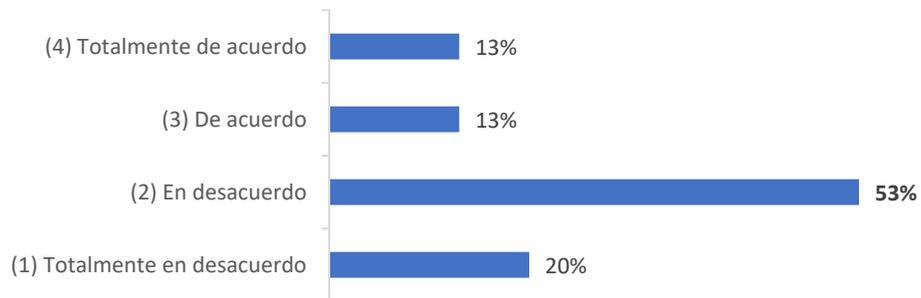
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



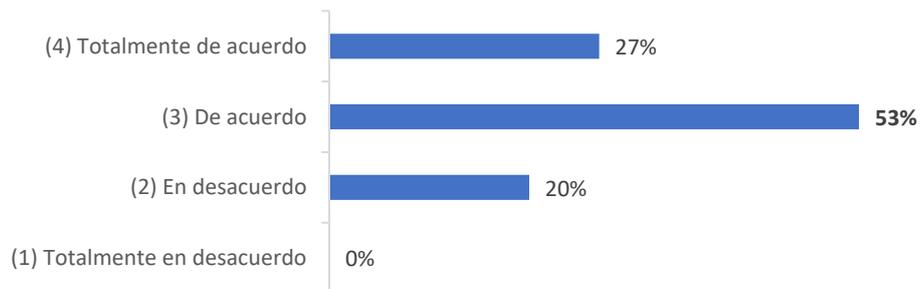
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



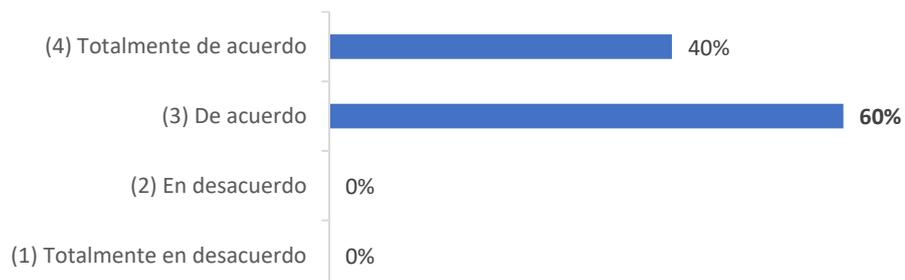
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



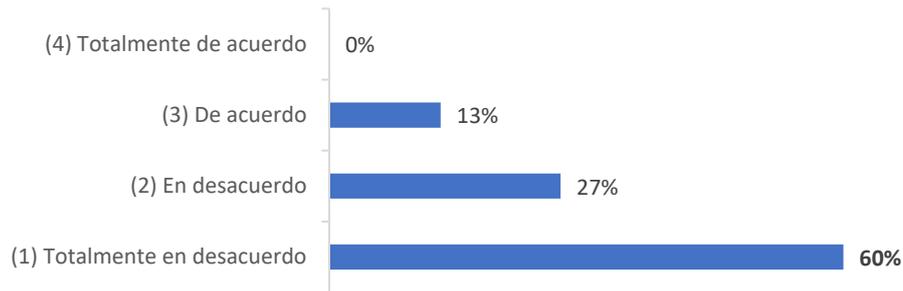
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.



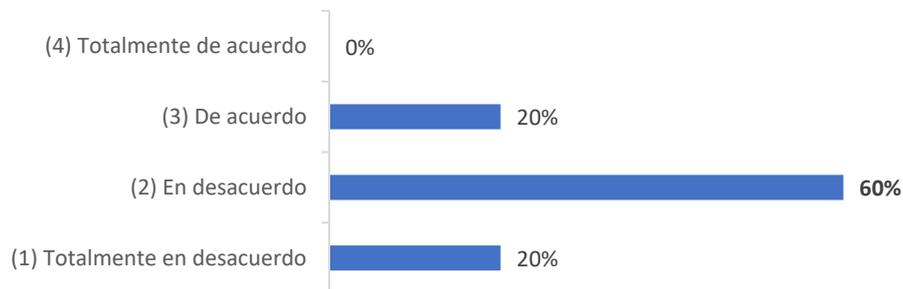
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.



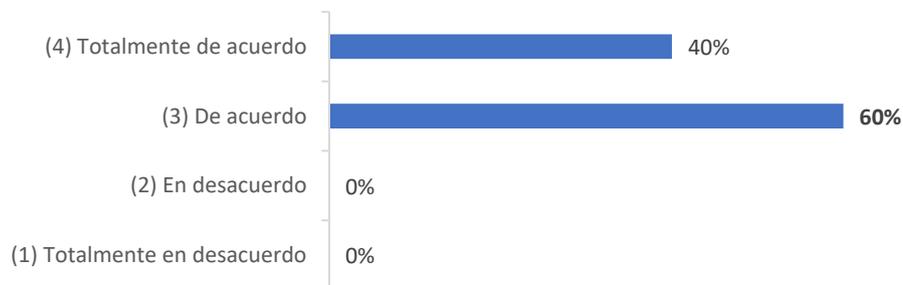
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.



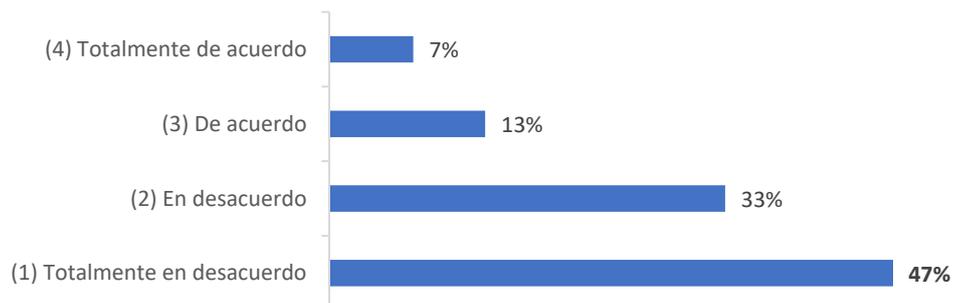
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



14. Puede diferenciar correctamente los colores.

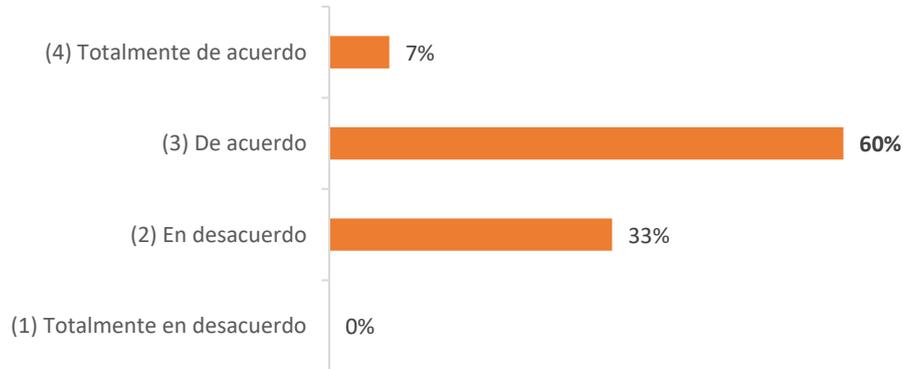


15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).

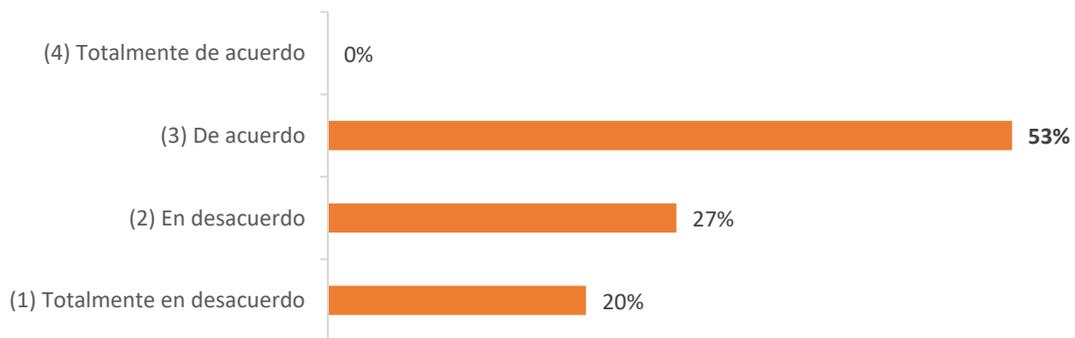


Condición 2. Ingreso de luz natural por ventanas combinada con luz natural simulada con LEDs e iluminación artificial de las lámparas fluorescentes.

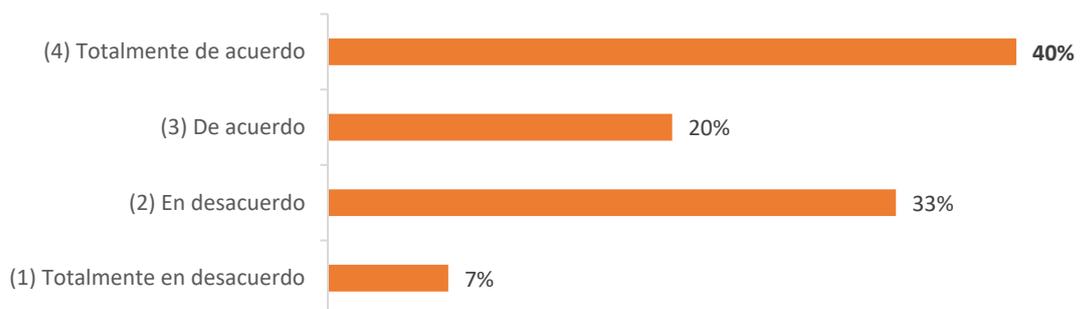
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



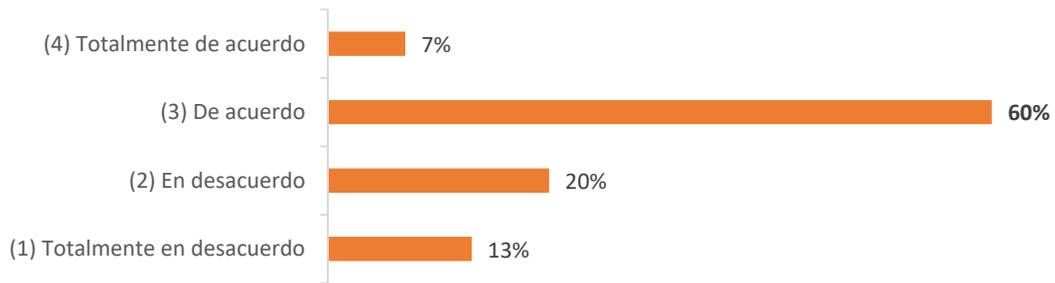
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



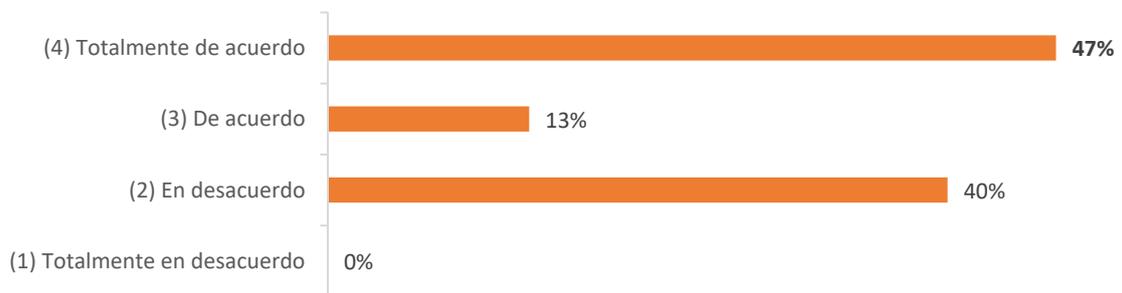
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



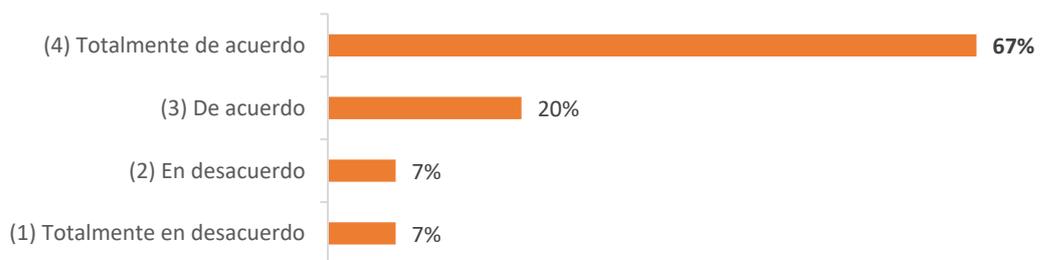
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



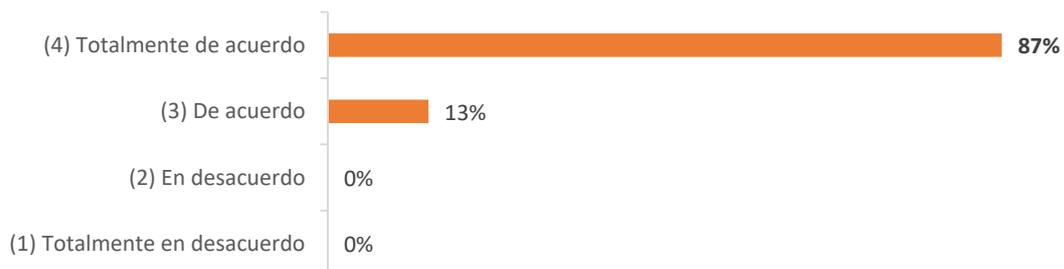
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



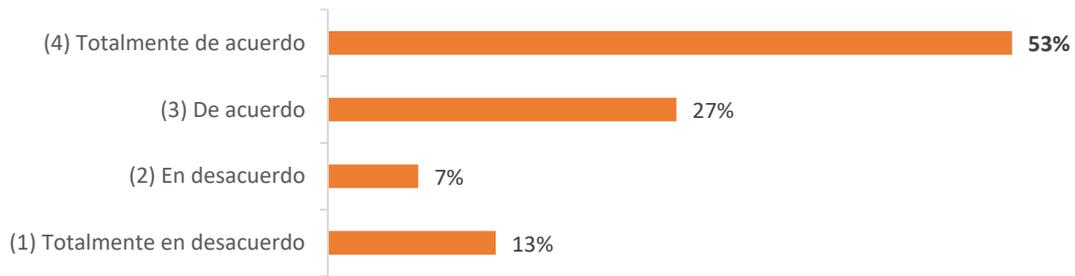
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.



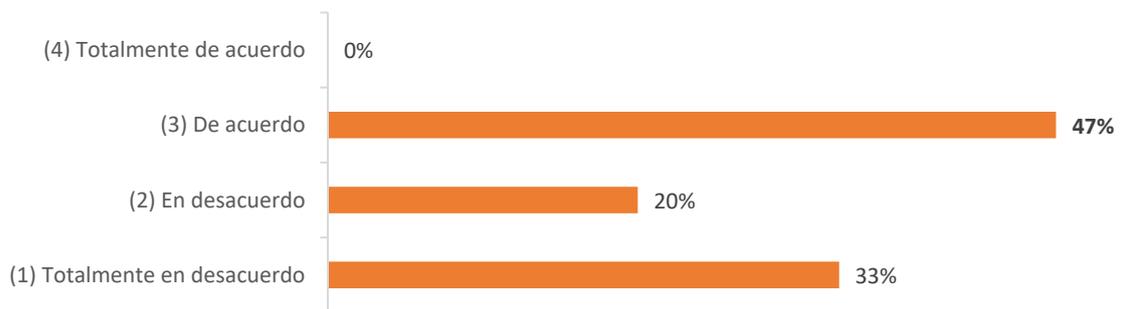
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



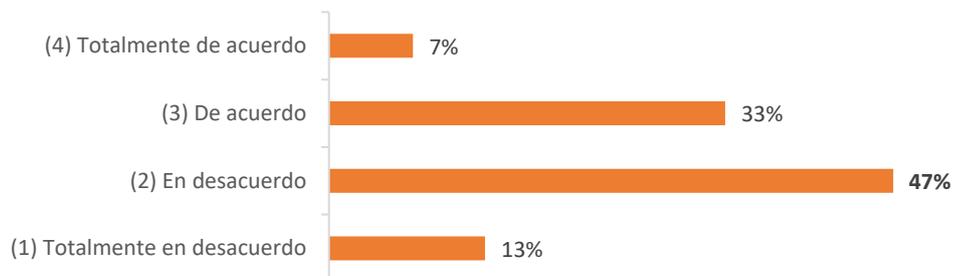
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



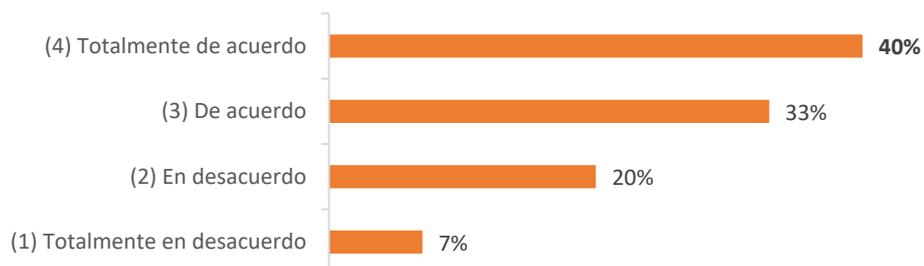
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



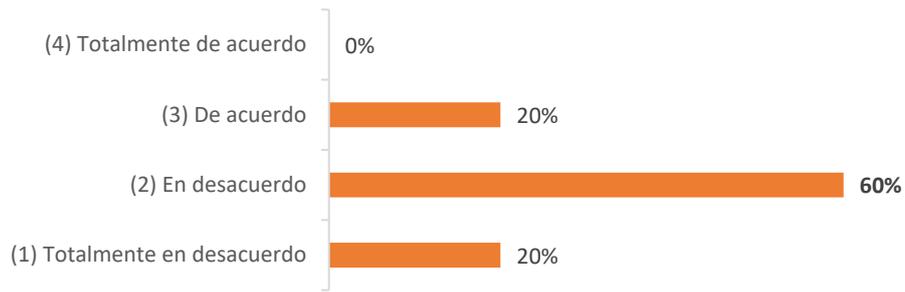
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.



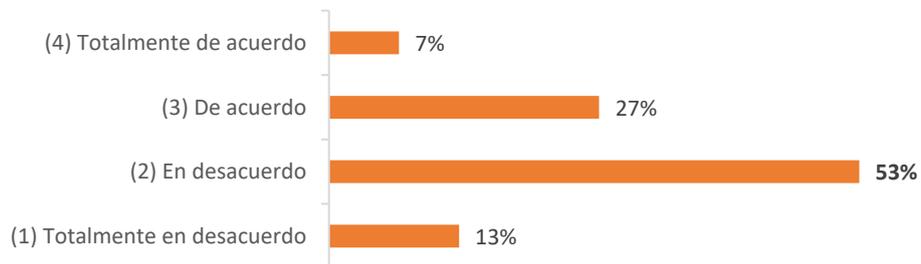
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.



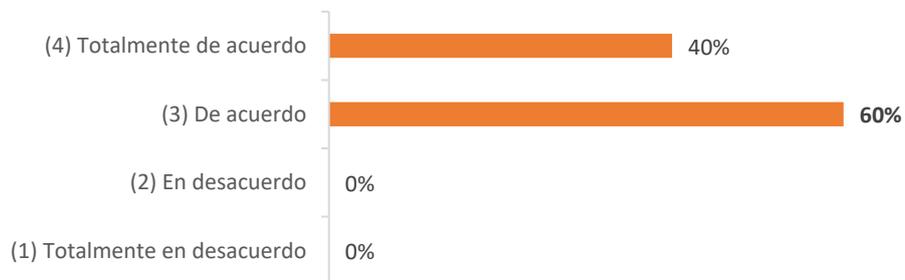
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.



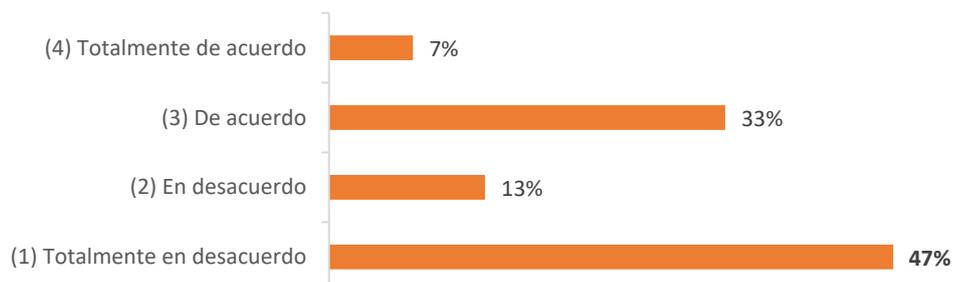
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



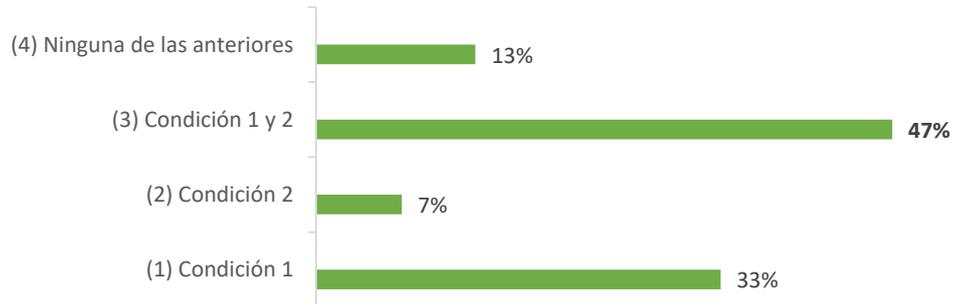
14. Puede diferenciar correctamente los colores.



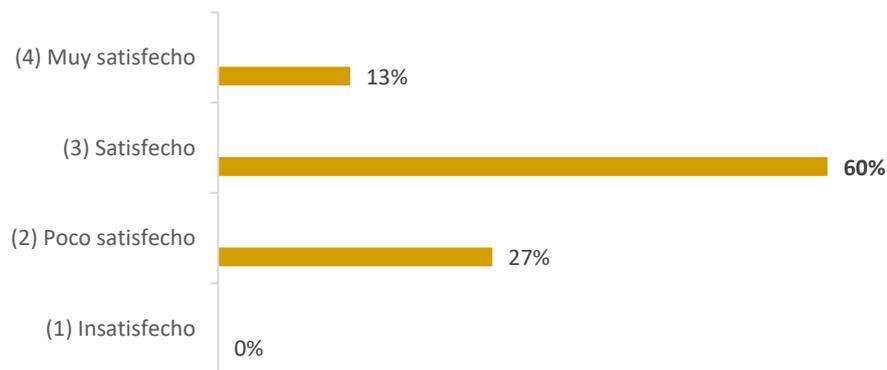
15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).



16. ¿Cuál de las condiciones de iluminación percibidas anteriormente le parece la más adecuada para iluminar el interior del aula?



17. Indique el grado de satisfacción del confort visual interior - exterior que se obtiene a través de la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural de las ventanas. Contrástela con la condición 2.



10H00 - Análisis comparativo de la Condición 1 y la Condición 2

Preguntas de percepción de cromaticidad visual

Las respuestas de la Condición 1 demuestran que los participantes reconocen que la luz de los conductos solares es igual a la luz exterior, donde el 40% de los encuestados están totalmente de acuerdo y un 33% están de acuerdo. Con respecto a la iluminación dentro del aula, el 60% de los encuestados están de acuerdo con la luz que proporciona las ventanas y los conductos solares y piensan que si es suficiente para alumbrar el aula, además ese mismo porcentaje consideran adecuada la iluminación de los conductos solares pero están en desacuerdo con la iluminación de las ventanas (60%). Esta puede ser porque los elementos que proporcionan iluminación cenital están distribuidos en toda el aula, mientras que las ventanas están ubicadas a un costado del espacio interior.

Con respecto a la Condición 2, los encuestados pudieron diferenciar claramente la iluminación natural simulada de la artificial proporcionada por las lámparas fluorescentes. Se obtuvo un 60% que estuvieron de acuerdo con esta diferencia, reconociendo a la luz simulada con las bombillas como natural.

Se obtuvieron respuestas positivas en esta hora del día como se ve reflejada en la pregunta 2, donde un 53% de los encuestados estuvieron de acuerdo con que la luz simulada de los conductos se parece a la luz natural. Al igual que la condición 1, un 60% estuvieron de acuerdo y consideraron adecuada la iluminación de los conductos solares.

Preguntas de relación interior – exterior mediante la luz percibida

Las preguntas de relación interior – exterior mediante la luz natural percibida a través de los conductos solares, se pudo analizar en la Condición 1 que los participantes consideran muy necesaria la existencia de ventanas (73% totalmente de acuerdo) y además la reconocen como un elemento de conexión visual con el exterior (87% totalmente de acuerdo). Además de las ventanas, también identifican al conducto solar como un elemento de conexión no visual con el exterior, donde el 60% de los participantes están totalmente de acuerdo con la pregunta 8.

Por otro lado, la Condición 2 también refleja una similitud a la Condición 1, ya que un 67% de los encuestados están totalmente de acuerdo en considerar muy necesaria la existencia de la ventana y un 87% piensan que también es un elemento visual con el exterior. En la pregunta 8, los encuestados consideran la luz natural simulada en los conductos solares como elementos de conexión no visual con el exterior (53% totalmente de acuerdo), teniendo un porcentaje menor que la pregunta 7 pero siendo positiva la respuesta.

Preguntas de confort visual

En la condición 1, los encuestados estuvieron en desacuerdo cuando contestaron la pregunta 9 relacionada a la sensación de calor que causa la luz producida por los conductos solares (53%). La misma respuesta se obtuvo en la pregunta 13, donde estuvieron en desacuerdo sobre la existencia de sombras molestas sobre la superficie de trabajo (60%). En la pregunta 12 y 15, la respuesta de los encuestados fue totalmente en desacuerdo cuando contestaron sobre si existían brillos desagradables en la superficie de trabajo y si la iluminación en el aula le causaba fatiga visual. Finalmente en la pregunta 10, 11 y 14 estuvieron de acuerdo cuando se les preguntó sobre el color de la luz que observaban de los conductos solares era la misma que la

luz exterior, sobre la iluminación en la superficie de trabajo y si se podía diferenciar claramente los colores.

En la condición 2, tanto la pregunta 2 como la pregunta 10 están relacionadas ya que las dos mencionan la comparación de la temperatura de color de la luz natural simulada con la luz natural exterior. En la pregunta 2, los encuestados respondieron que estaban de acuerdo con respecto a la similitud de la luz natural reproducida artificialmente con la luz natural exterior (53%), pero al preguntar puntualmente sobre el color de la luz que emite el conducto solar (bombillas LIFX) y su relación con la luz exterior (pregunta 10), su respuesta fue diferente ya que el 47% de los participantes respondieron estar en desacuerdo. Esto se debe a que al tratar de comparar los dos tipos de fuentes lumínicas, los participantes dirigían su mirada a los conductos solares notando una leve diferencia a la condición anterior (presencia de las bombillas LIFX) por lo que variaron su respuesta.

Las demás preguntas relacionadas al confort visual, el 40% de los encuestados están totalmente de acuerdo sobre la iluminación sobre la superficie de trabajo, 60% de acuerdo sobre la diferenciación correcta de los colores, 60% y 53% en desacuerdo con respecto a brillos desagradables y sombras molestas en el espacio de trabajo respectivamente y por último un 47% están totalmente en desacuerdo en haber percibido algún malestar visual por la iluminación en el aula.

Pregunta 16 y 17

En la pregunta 16, los encuestados optaron por la Condición 1 y 2 como el tipo de iluminación más adecuada para iluminar el aula (47%), lo cual indica que no notan alguna diferencia entre ellas y se sienten cómodos estando en cualquiera de las dos condiciones. Con respecto a la pregunta 17, un 60% de los participantes se sienten satisfechos bajo la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes y la iluminación natural de las ventanas, lo que refleja que la luz artificial es la adecuada para iluminar el aula de clases.

5.3.2. Hora de la tarde. 14h00

Entre las 14h00 y 14h30 se registró con el espectrómetro una variación mínima de los valores de temperatura de color. El valor más bajo fue de 5744K y el más alto fue de 5762K, los mismos que se programaron simultáneamente en las bombillas LIFX. Debido a que la app de LIFX solo permite cambiar el color de la luz en valores de 500, durante los 30 minutos que duró la encuesta, la temperatura de color de las bombillas se fijó en 6000K.

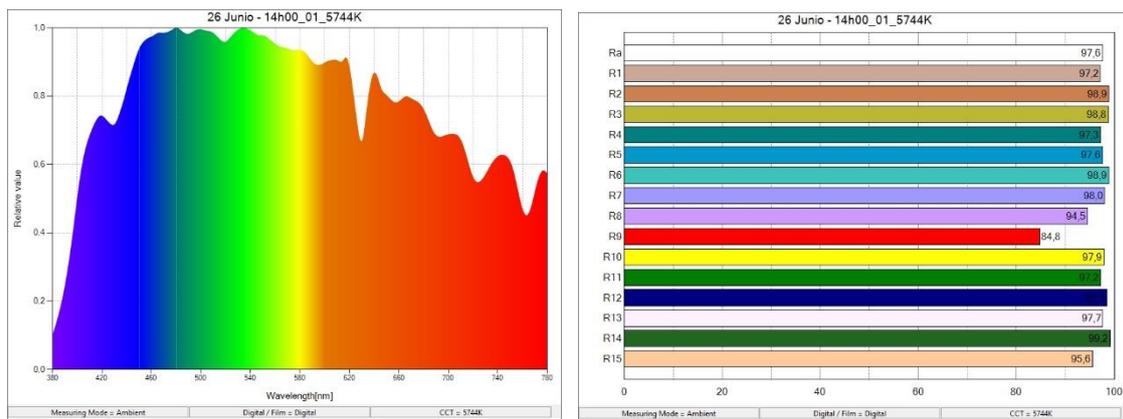


Figura 23. Distribución espectral (izquierda) e índice de reproducción cromática (derecha) de la luz exterior a 5744K.

Fuente. Elaboración propia

Características de los participantes

Para el experimento de las 14h00, se encuestaron a 10 participantes (6 mujeres y 4 hombres). Sus edades oscilaban entre 24 y 34 años, siendo 26 la edad con mayor porcentaje.

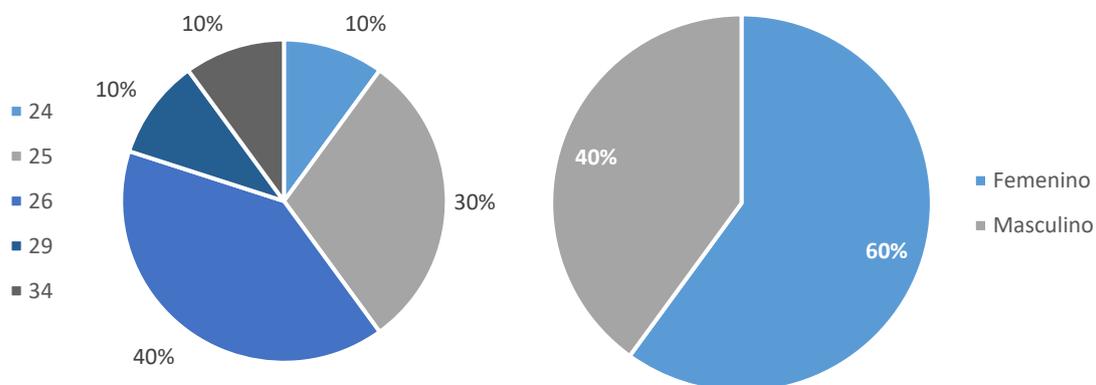
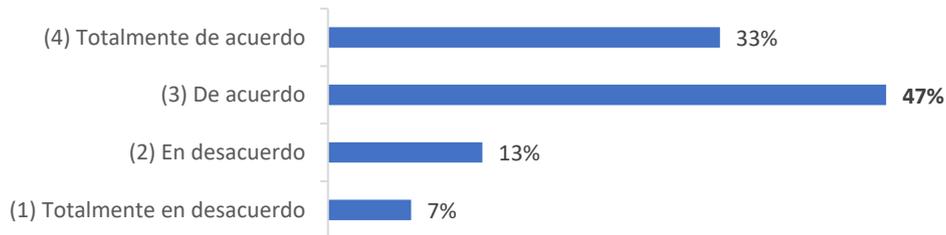


Figura 24. Edades de los participantes (izquierda) y distribución de género de los participantes (derecha) a las 14h00.

Fuente. Elaboración propia

Condición 1. Ingreso de luz natural por ventanas y conductos solares combinado con luz artificial de las lámparas fluorescentes.

1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



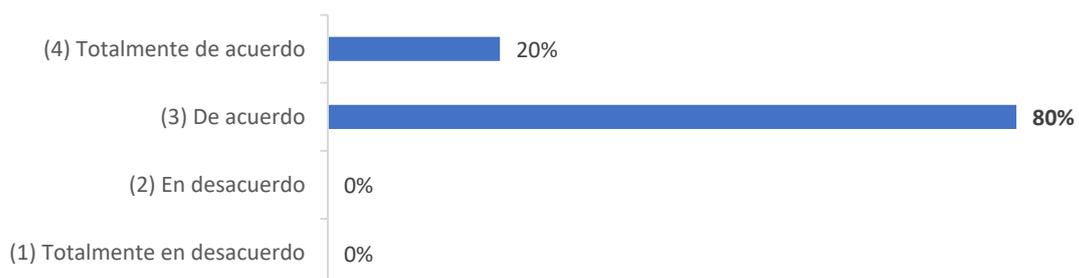
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



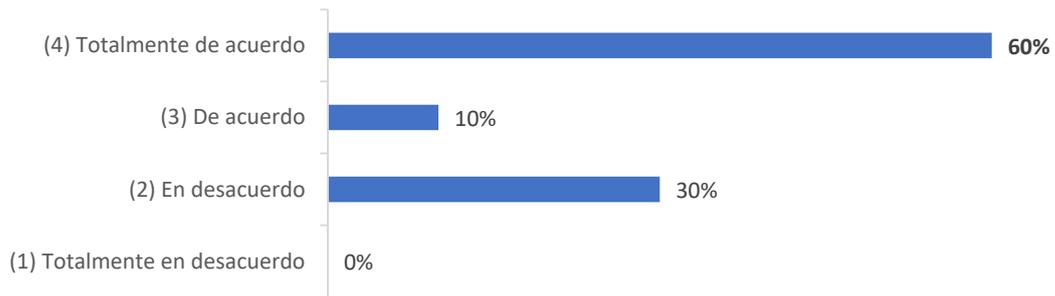
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



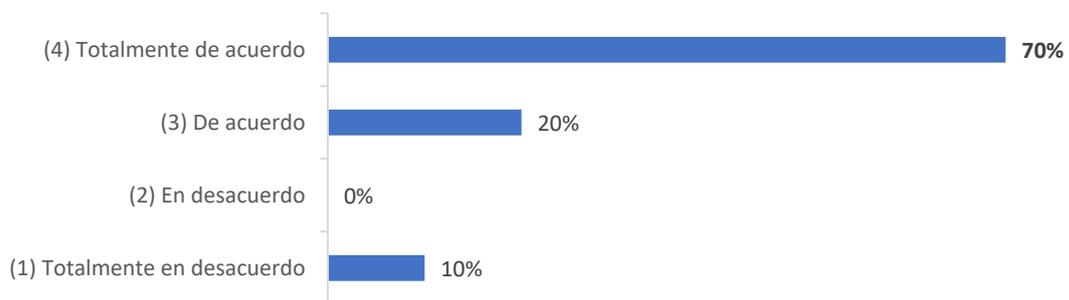
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



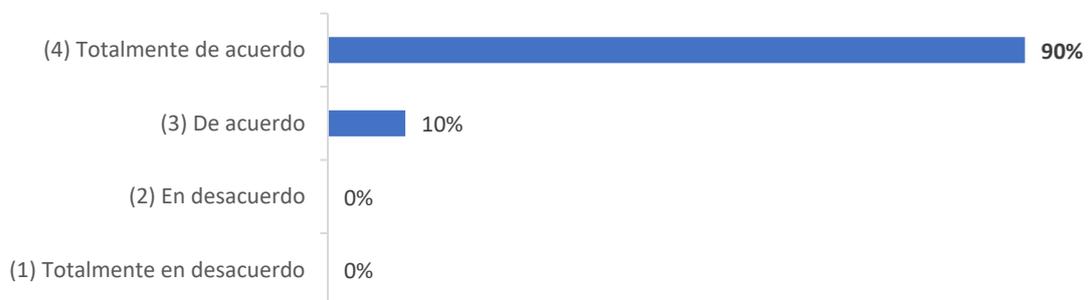
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



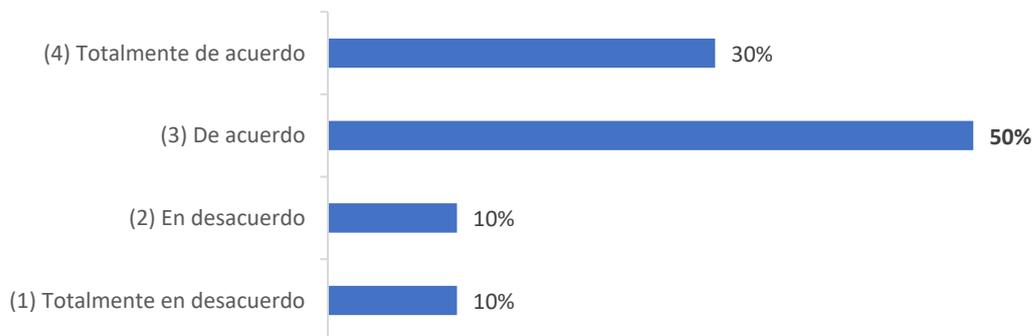
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas



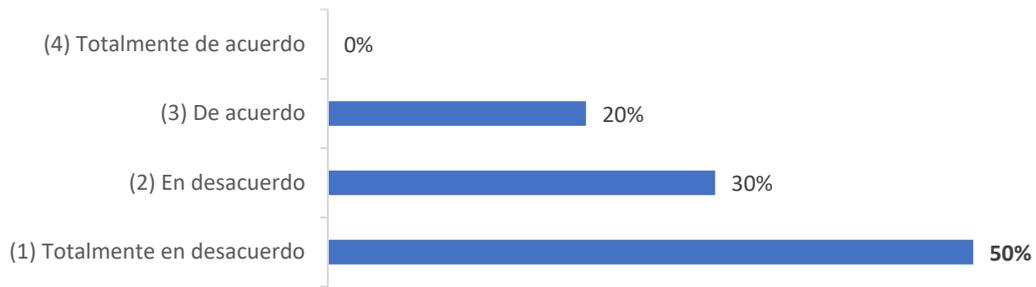
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



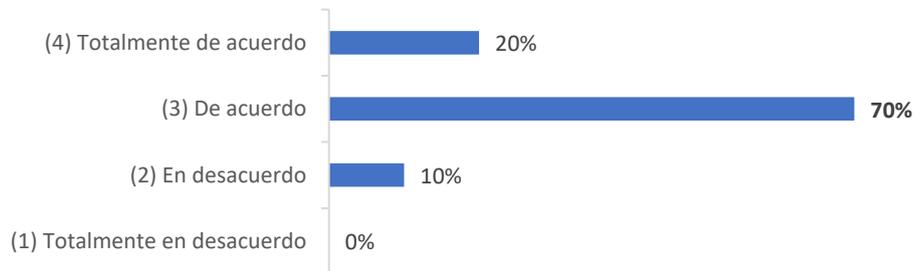
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



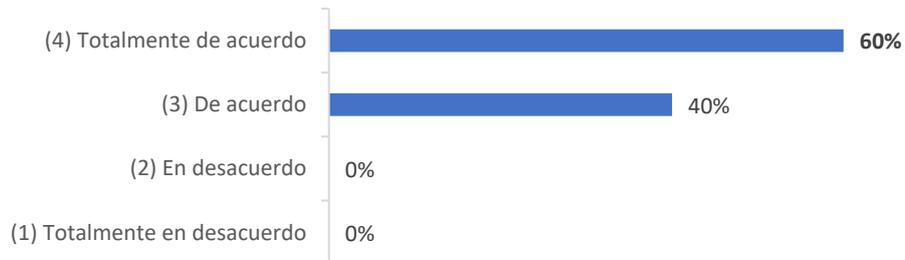
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



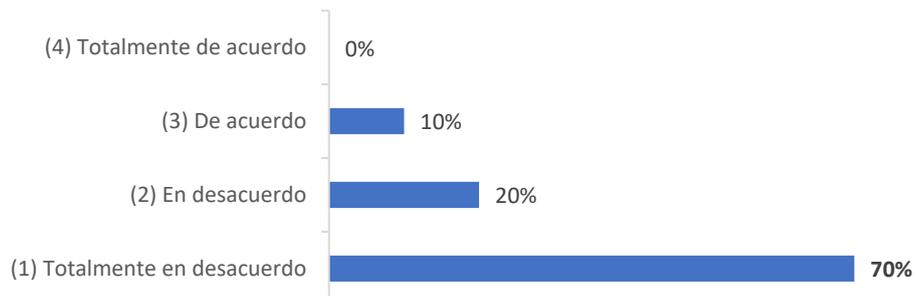
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.



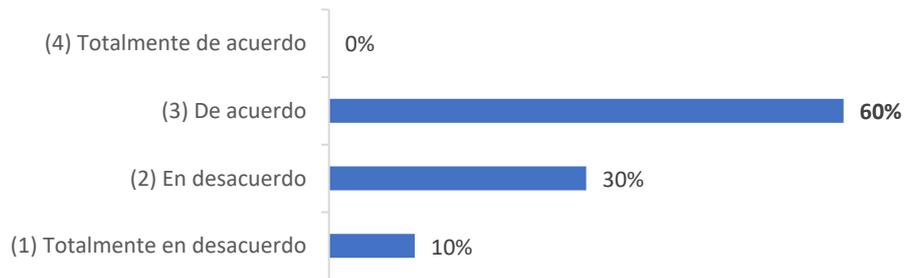
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.



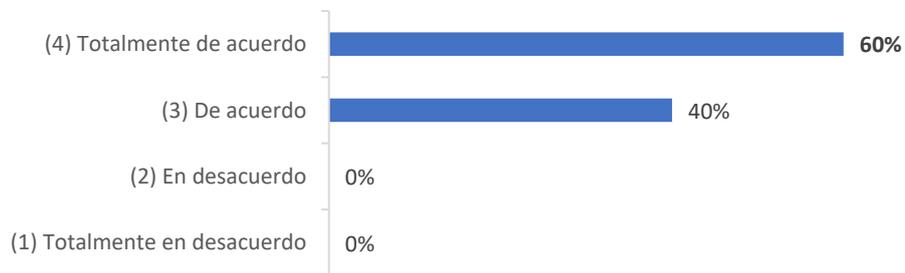
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.



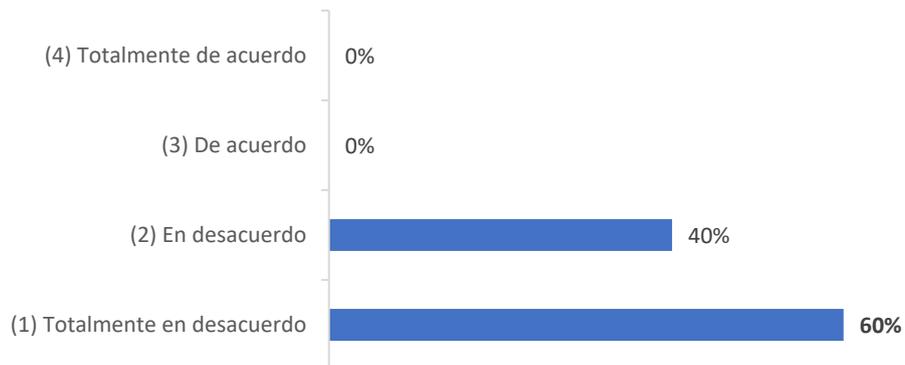
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



14. Puede diferenciar correctamente los colores.

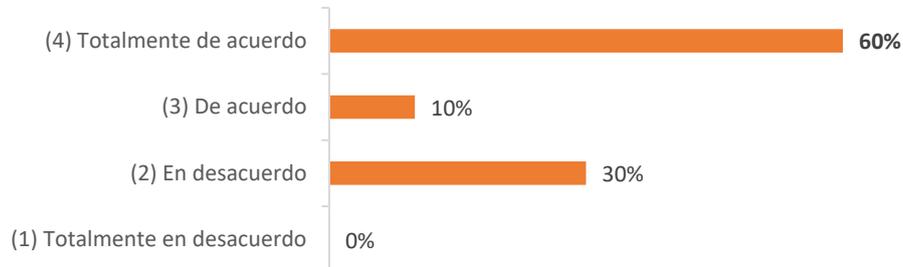


15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).

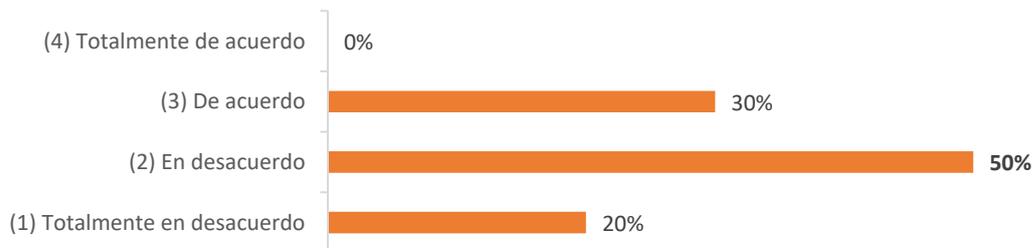


Condición 2. Ingreso de luz natural por ventanas combinada con luz natural simulada con LEDs e iluminación artificial de las lámparas fluorescentes.

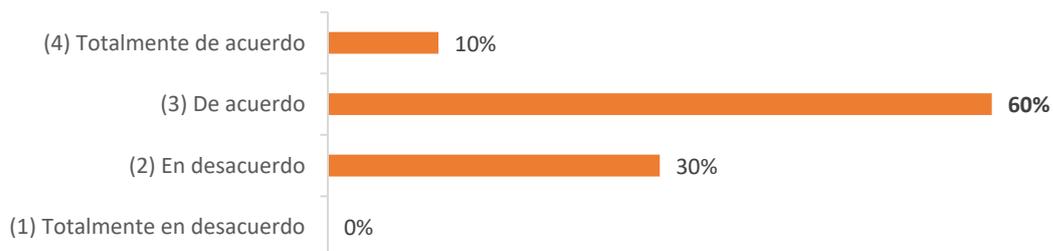
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



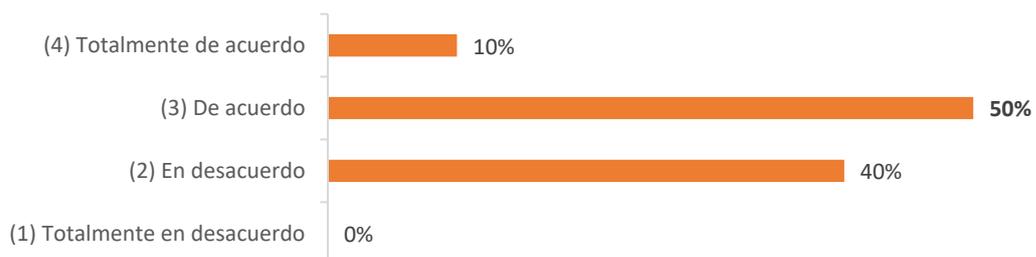
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



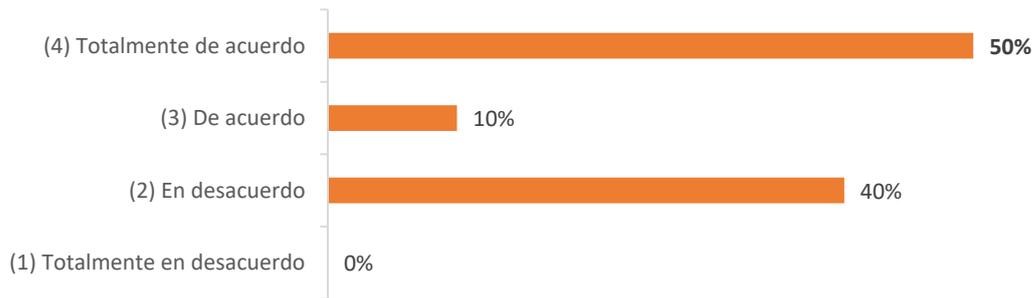
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



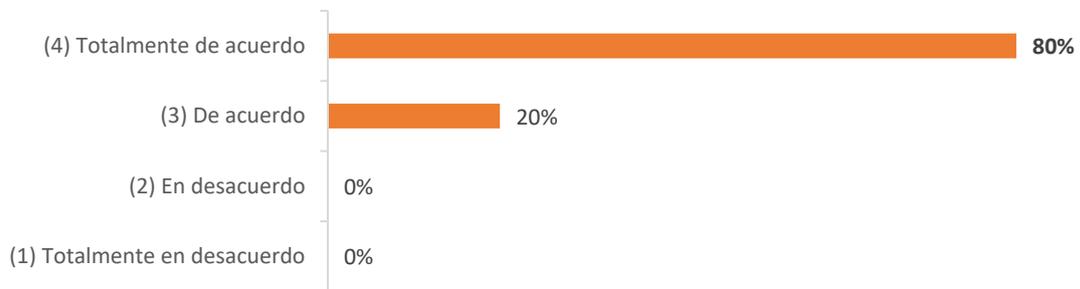
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



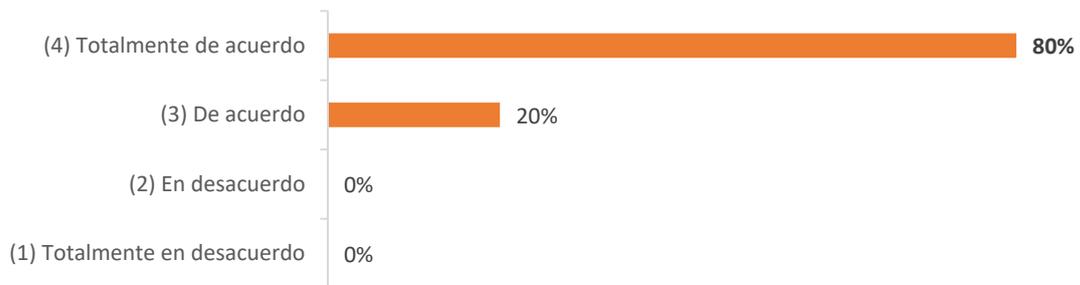
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



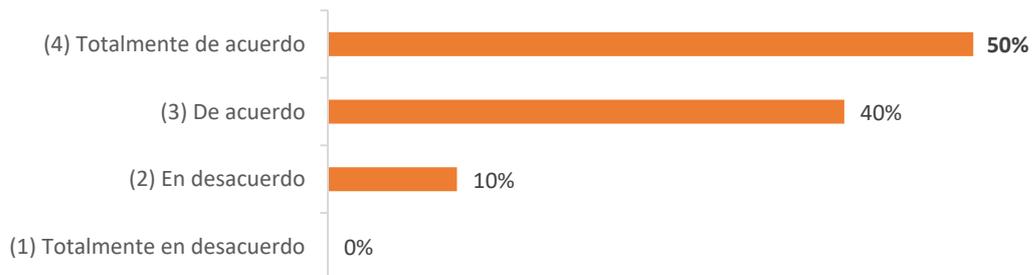
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.



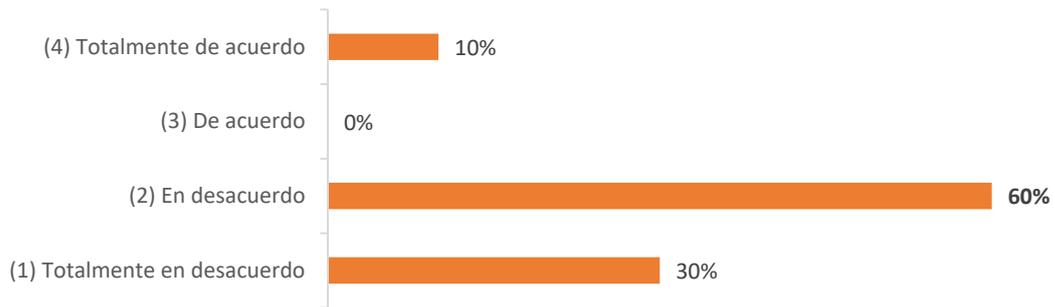
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



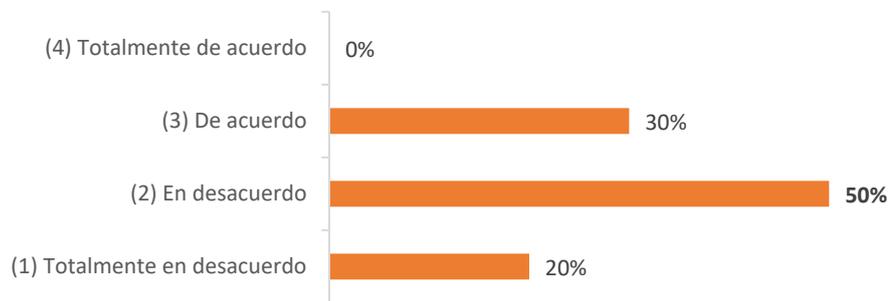
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



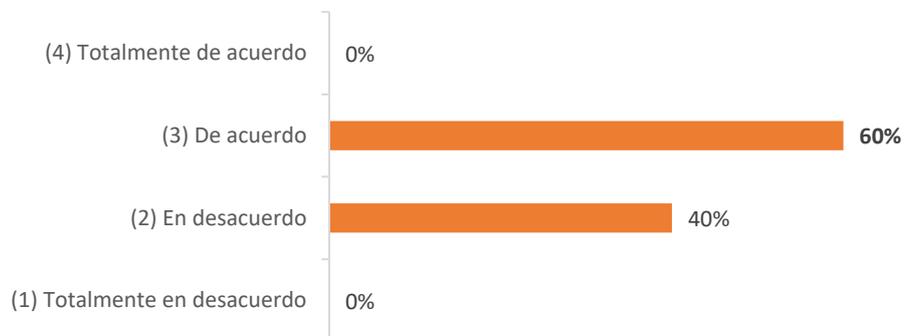
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



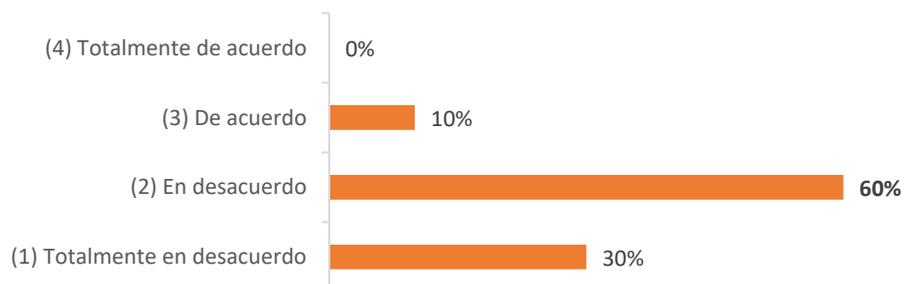
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.

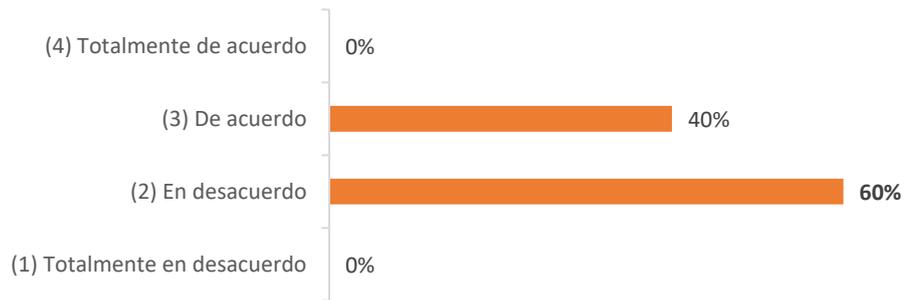
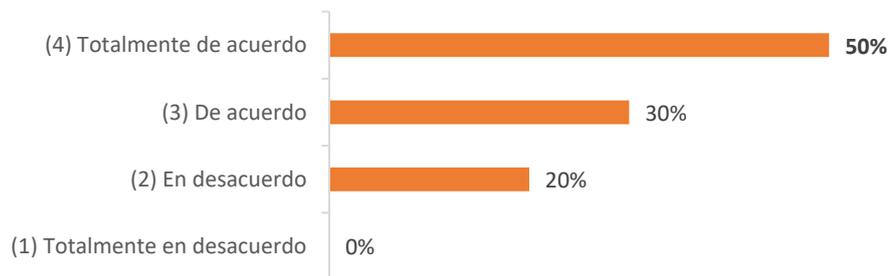
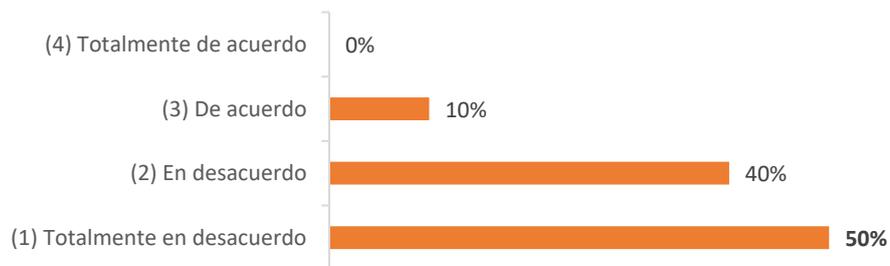


11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.

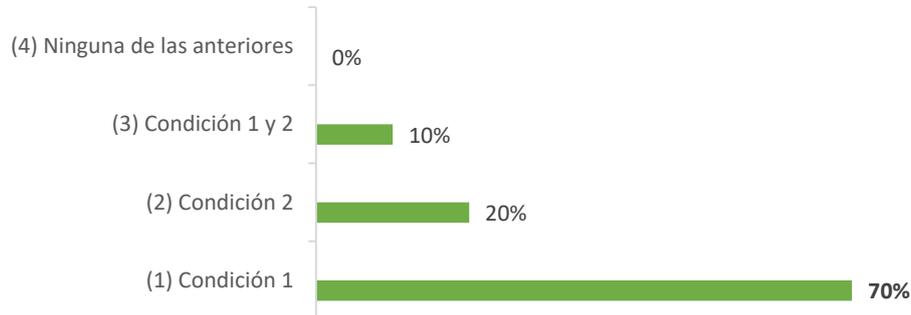


12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.

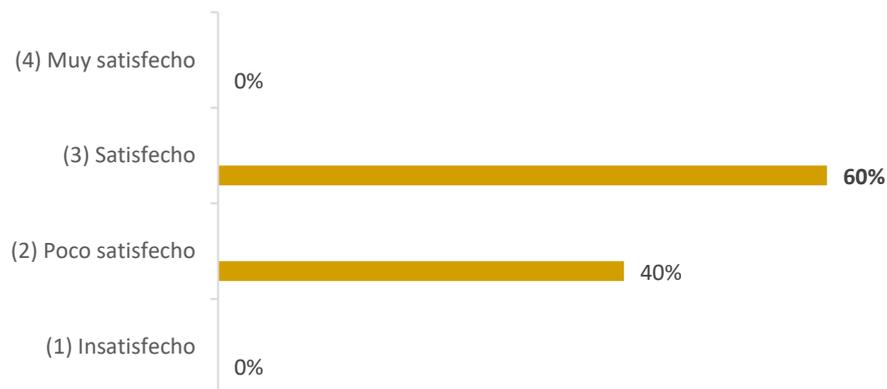


13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.**14. Puede diferenciar correctamente los colores.****15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).**

16. ¿Cuál de las condiciones de iluminación percibidas anteriormente le parece la más adecuada para iluminar el interior del aula?



17. Indique el grado de satisfacción del confort visual interior - exterior que se obtiene a través de la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural de las ventanas. Contrástela con la condición 2.



14H00 - Análisis comparativo de la Condición 1 y la Condición 2

Preguntas de percepción de cromaticidad visual

En la Condición 1, los encuestados pudieron diferenciar claramente los conductos solares y la luz de las lámparas fluorescentes (40% totalmente de acuerdo), aunque con una leve diferencia de un 30% que estaban de acuerdo y 30% en desacuerdo. Así mismo sucede en la pregunta 2, donde un 40% (totalmente de acuerdo) indica que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior, pero un 30% dice que están de acuerdo y 30% en desacuerdo.

En la pregunta 3 y 4, los encuestados consideraron suficiente la luz de las ventanas y los conductos solares para iluminar el aula (60% de acuerdo) y además estuvieron de acuerdo con la iluminación de los conductos solares (80%).

También un 60% de los encuestados estuvieron totalmente de acuerdo con la iluminación de las ventanas.

En la Condición 2, un 60% de los participantes indicaron que están totalmente de acuerdo con respecto a la diferenciación de la luz natural simulada con LEDs y la luz artificial de las lámparas fluorescentes, pero estuvieron en desacuerdo cuando se les preguntó sobre la similitud entre la luz natural simulada y la luz natural exterior (50%). A pesar que la respuesta fue negativa en la pregunta 2, en la pregunta 4 les pareció adecuada la iluminación de los conductos solares con bombillas LIFX, manifestando su comodidad en el aula aunque los LEDs no simulen fielmente el color de la luz natural.

Preguntas de relación interior – exterior mediante la luz percibida

Con respecto a la Condición 1, el 70% (totalmente de acuerdo) de los encuestados consideran muy necesaria la existencia de ventanas y el 90% (totalmente de acuerdo) lo definen como un elemento de conexión visual con el exterior. Por otro lado, el 50% (de acuerdo) de los participantes observan los conductos solares como elementos lumínicos de conexión no visual con el exterior.

En la Condición 2, los participantes también consideran necesaria la existencia de ventanas además de la luz natural simulada (80% totalmente de acuerdo) y también consideran a la iluminación natural reproducida con LEDs como un elemento lumínico de conexión no visual con el exterior (50% totalmente de acuerdo).

Preguntas de confort visual

En la Condición 1, el 50% de los encuestados no sienten calor con la luz recibida de los conductos solares, además respondieron que la iluminación del aula no ocasiona brillos desagradables ni les causó fatiga visual (70% y 60% respectivamente). En la pregunta 10 y 13 respondieron que estaban de acuerdo con la similitud del color de los conductos solares con la luz exterior (70%) y con la ausencia de sombras molestas en la superficie de tarea (60%). En la pregunta 11 y 14, los participantes estuvieron totalmente de acuerdo en relación a la iluminación sobre la superficie de trabajo (60%) y la correcta diferenciación de los colores (60%).

En la Condición 2, los encuestados respondieron que estaban en desacuerdo (60%) con respecto a la similitud del color de la luz de las bombillas LIFX dentro de los conductos solares con la luz exterior. Además estuvieron en desacuerdo con la pregunta 12 y 13, donde un 60% respondieron que no existen brillos desagradables ni sombras molestas en las superficies de trabajo. Un 60% de los encuestados están de acuerdo con la iluminación sobre la superficie y un 50% están totalmente de acuerdo en que pueden diferenciar correctamente los colores.

Pregunta 16 y 17

Con respecto a la pregunta 16, el 70% de los participantes respondieron que prefieren la Condición 1 (iluminación natural de los conductos solares) y que les parece la más adecuada para la iluminación dentro del aula. Por otro lado, la pregunta 17 los encuestados respondieron que se sienten satisfechos (60%) con la iluminación de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural exterior.

5.3.3. Hora de la tarde – noche. 18h00

Entre las 18h00 y 18h30 se registró con el espectrómetro una variación mínima de los valores de temperatura de color. El valor registrado fue de 5396K, el mismo que se programó simultáneamente en las bombillas LIFX. Debido a que la app de LIFX solo permite cambiar el color de la luz en valores de 500, durante los 30 minutos que duró la encuesta, la temperatura de color de las bombillas se fijó en 5000K.

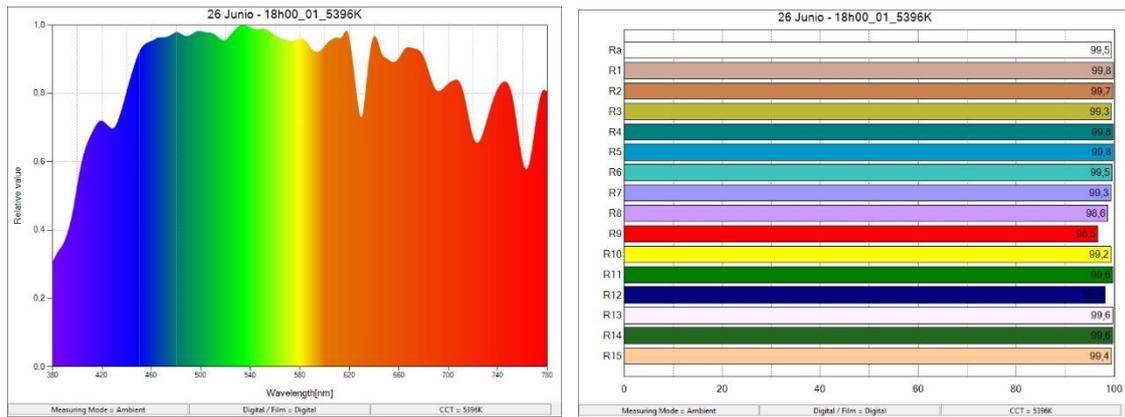


Figura 25. Distribución espectral (izquierda) e índice de reproducción cromática (derecha) de la luz exterior a 5396K.

Fuente. Elaboración propia

Características de los participantes

Para el experimento de las 18h00, se encuestaron a 12 participantes (8 mujeres y 4 hombres). Sus edades oscilaban entre 23 y 30 años, siendo 26 la edad con mayor porcentaje.

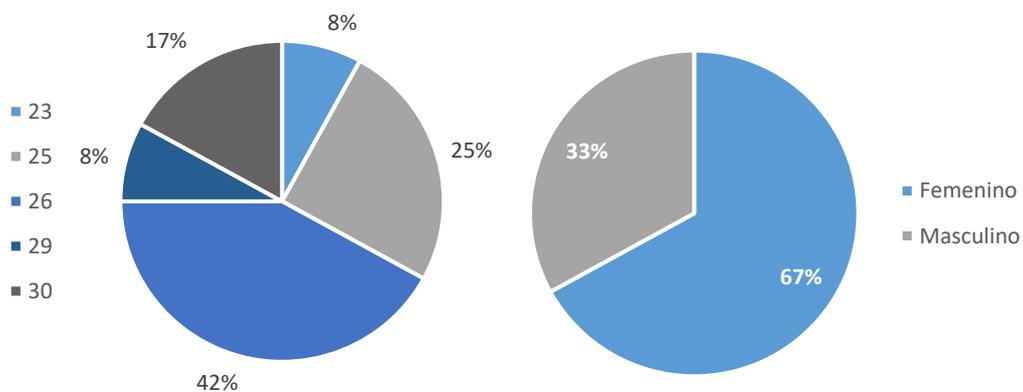
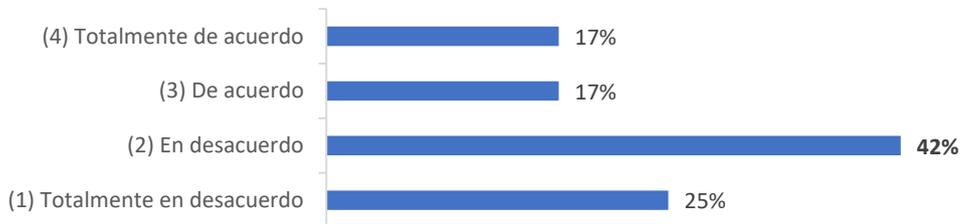


Figura 26. Edades de los participantes (izquierda) y distribución de género de los participantes (derecha).

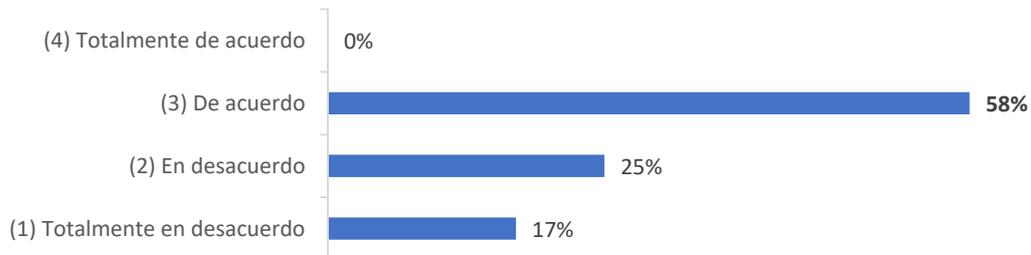
Fuente. Elaboración propia

Condición 1. Ingreso de luz natural por ventanas y conductos solares combinado con luz artificial de las lámparas fluorescentes.

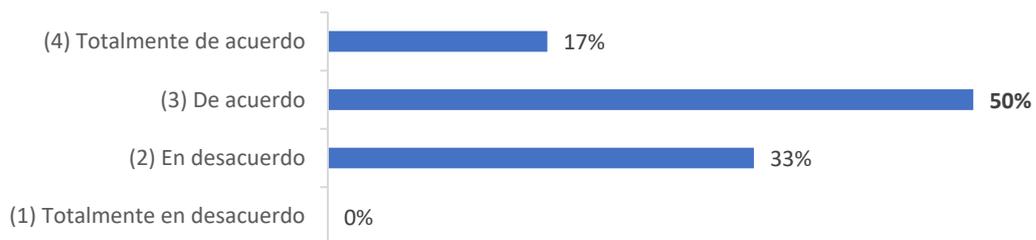
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



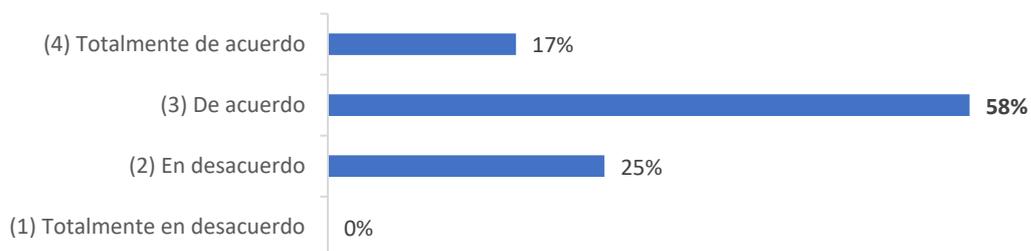
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



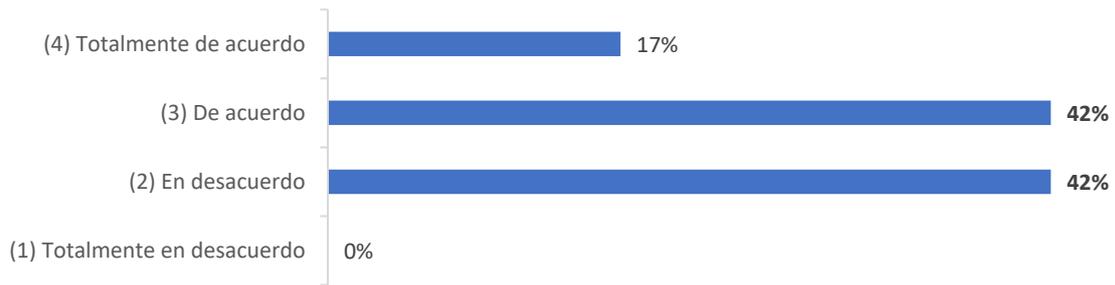
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



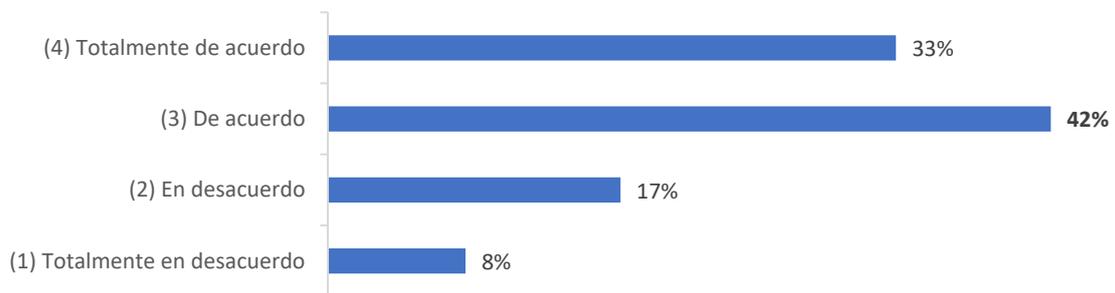
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



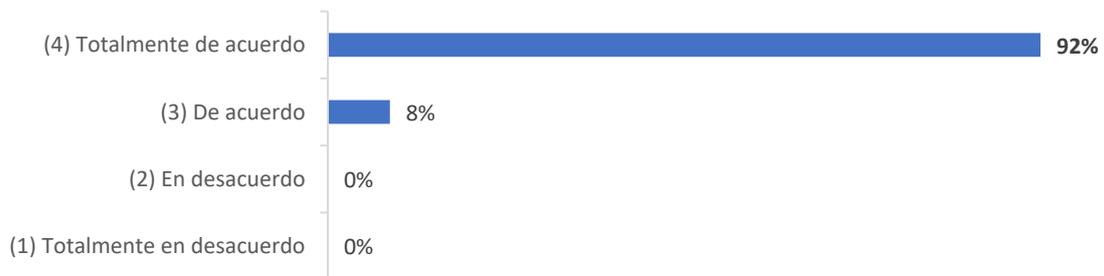
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



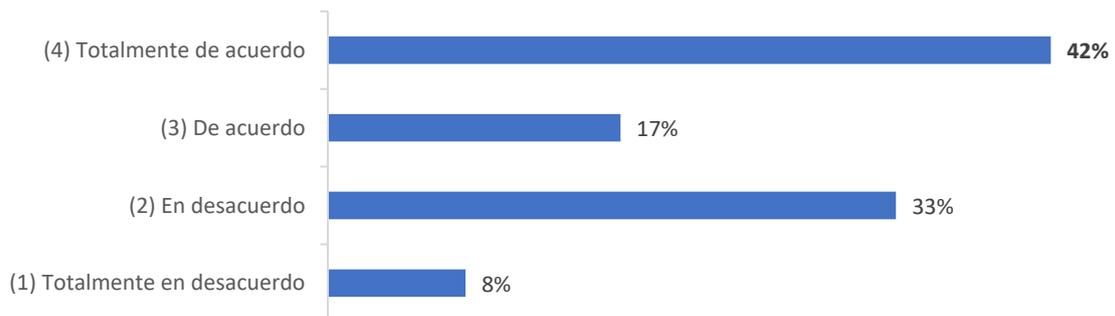
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.



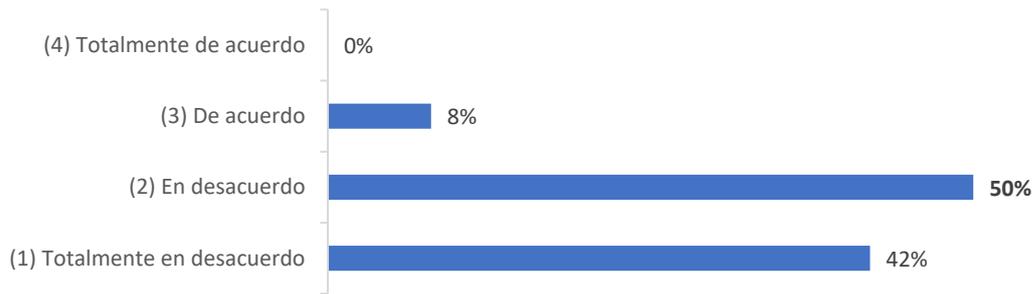
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



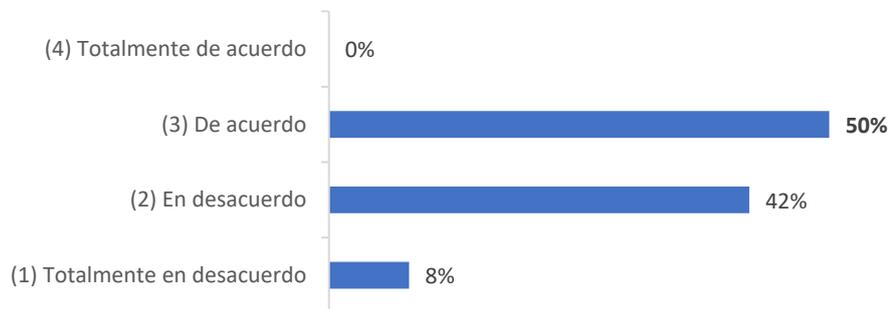
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



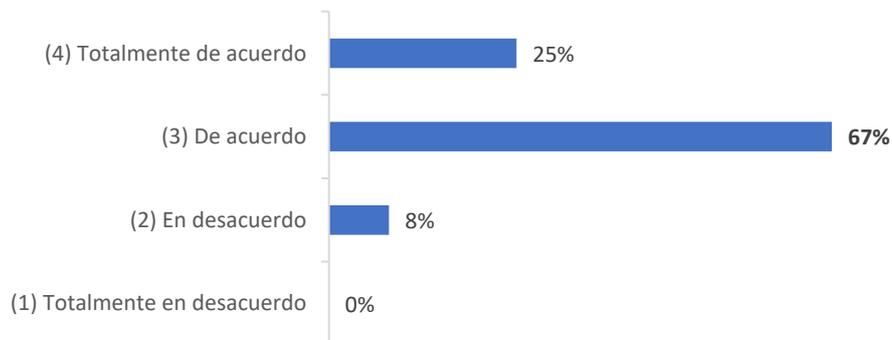
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



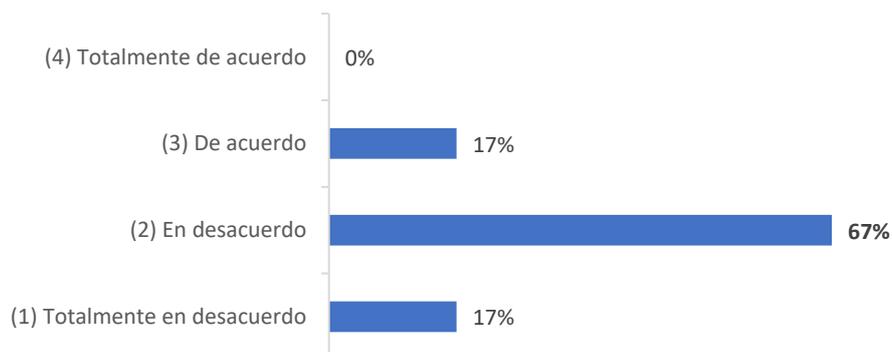
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.



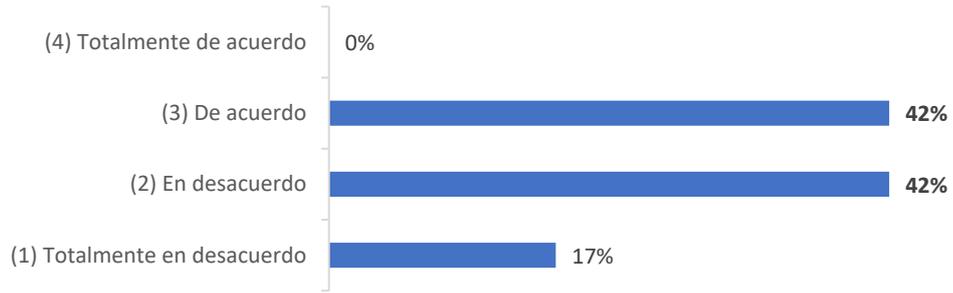
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.



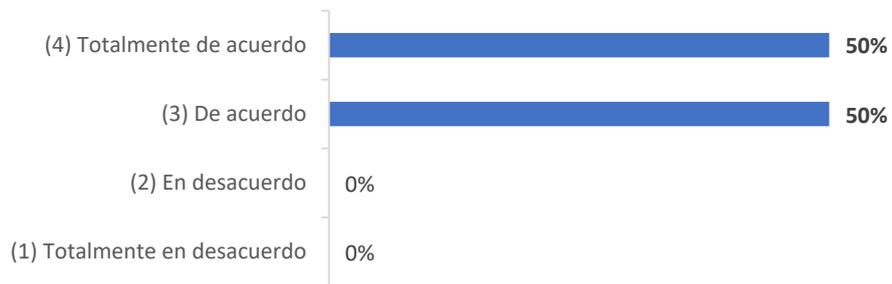
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.



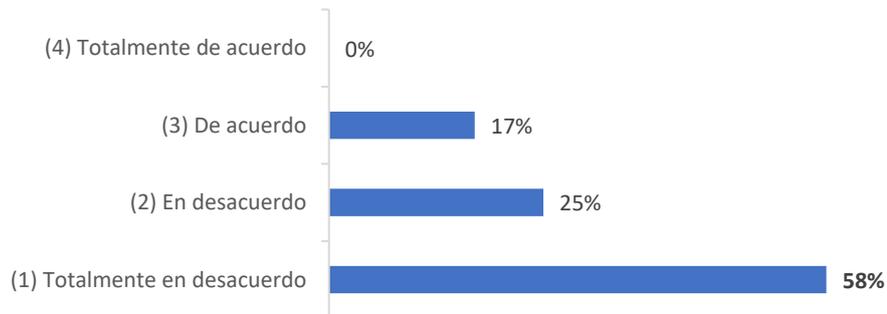
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



14. Puede diferenciar correctamente los colores.

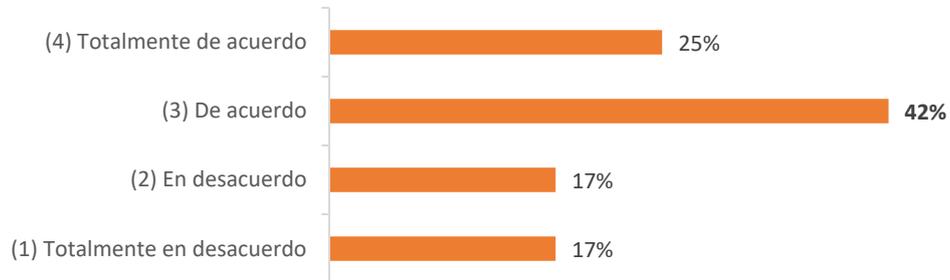


15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).

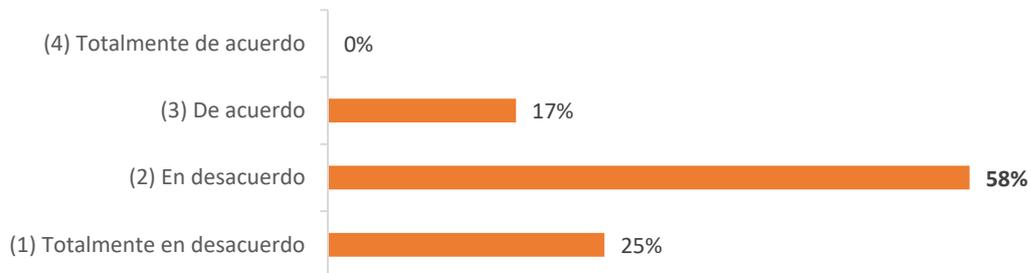


Condición 2. Ingreso de luz natural por ventanas combinada con luz natural simulada con LEDs e iluminación artificial de las lámparas fluorescentes.

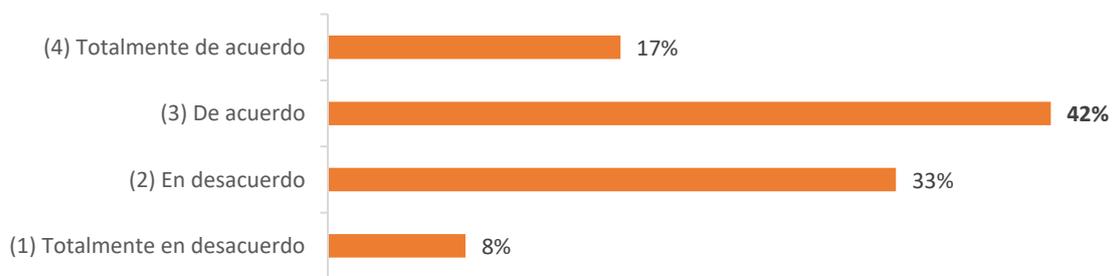
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



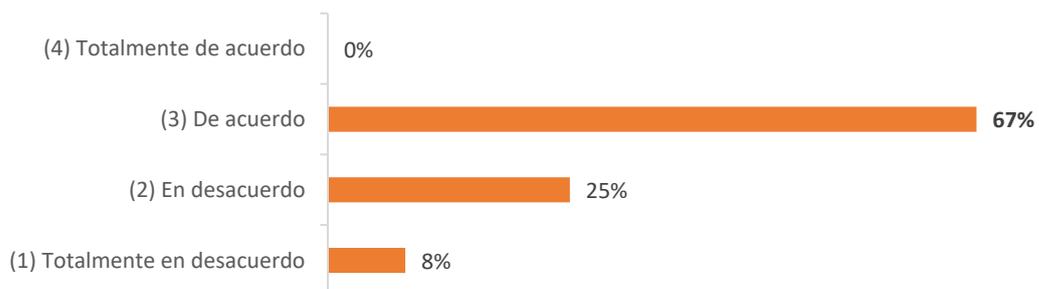
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



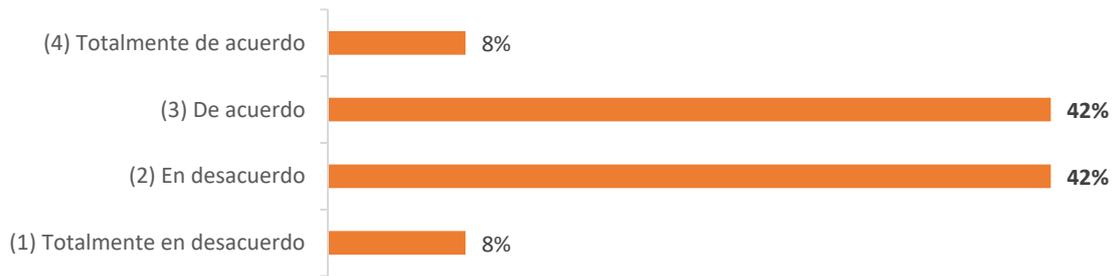
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



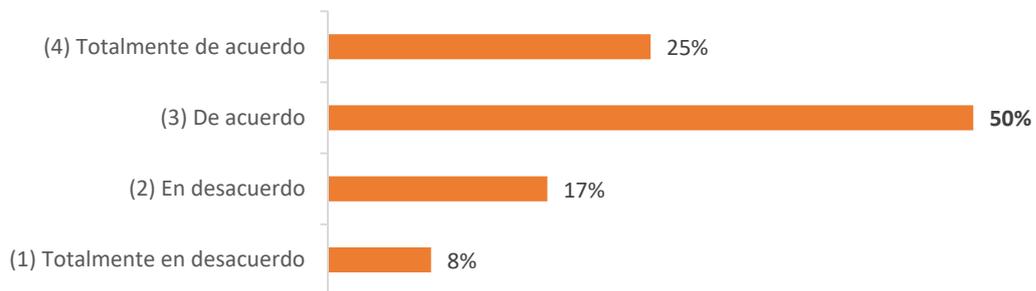
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



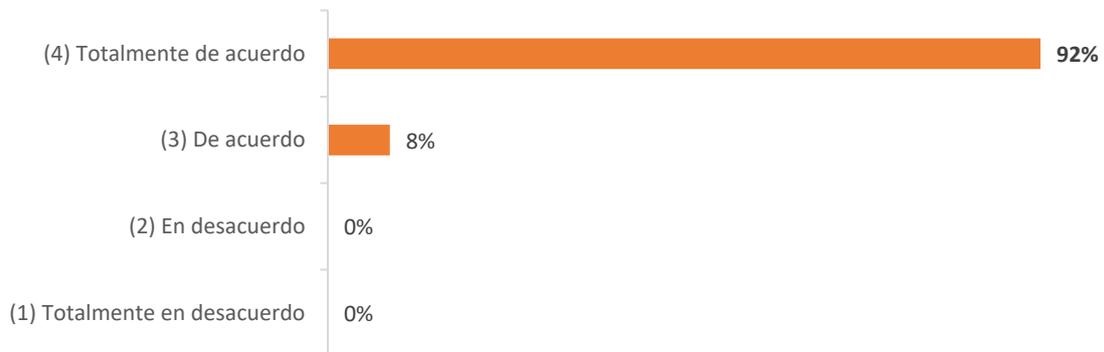
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



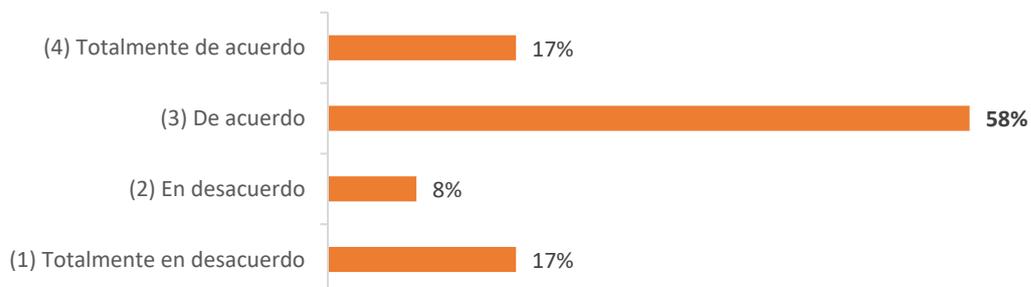
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.



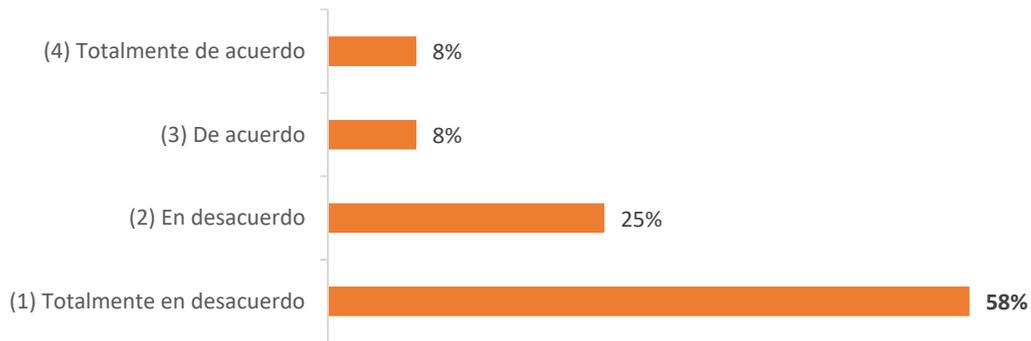
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



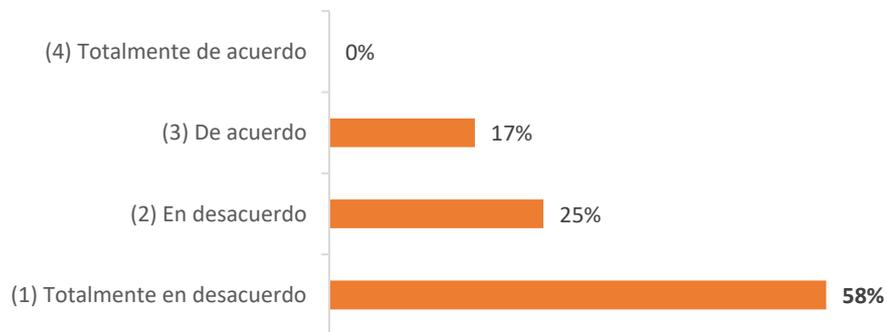
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



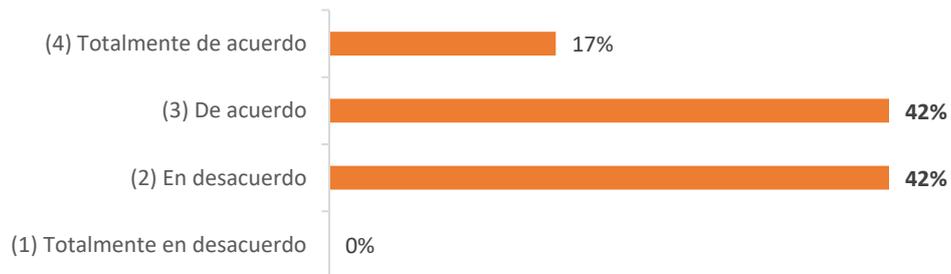
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



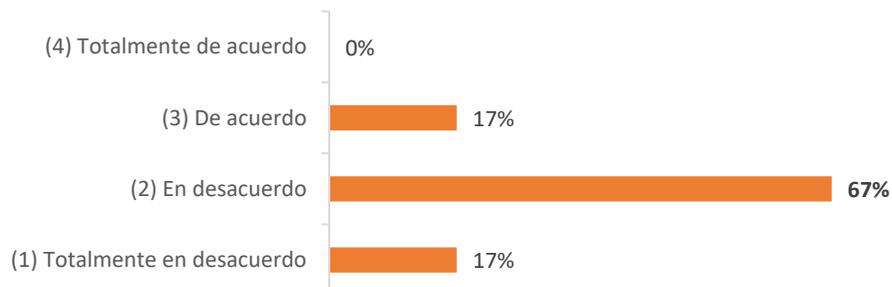
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.



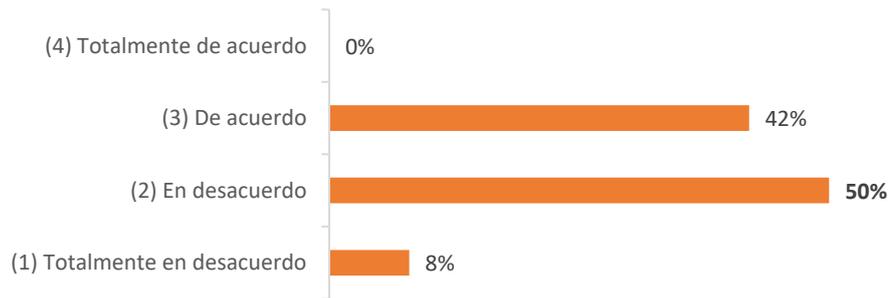
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.



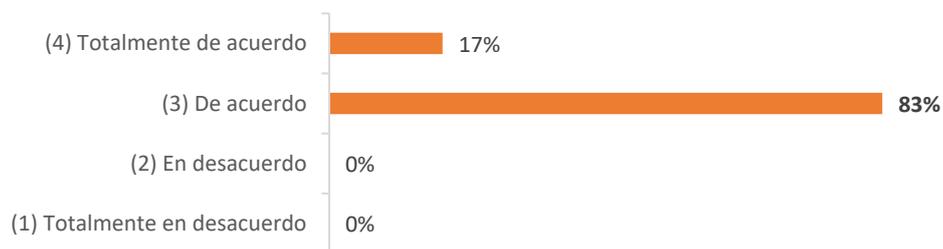
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.



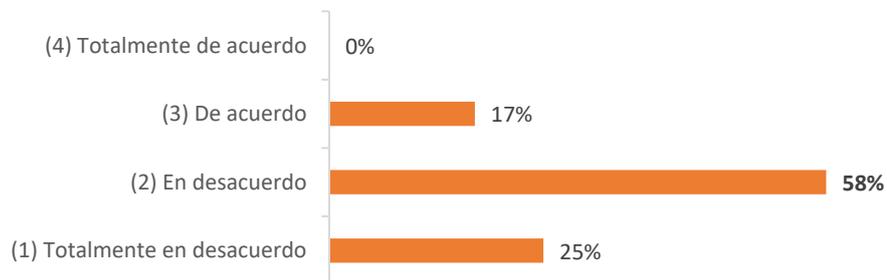
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



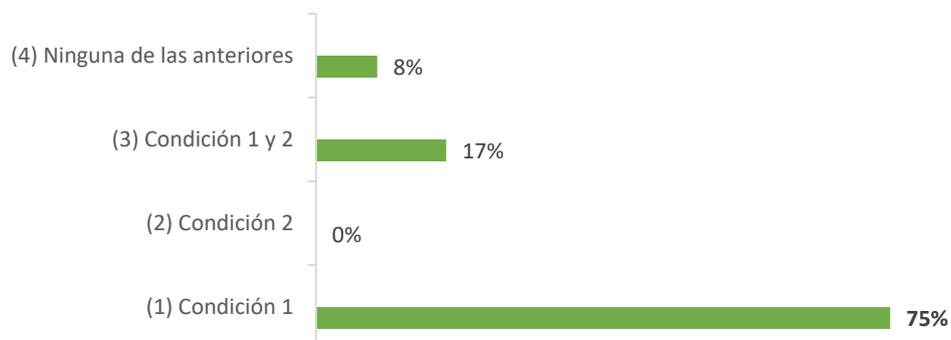
14. Puede diferenciar correctamente los colores.



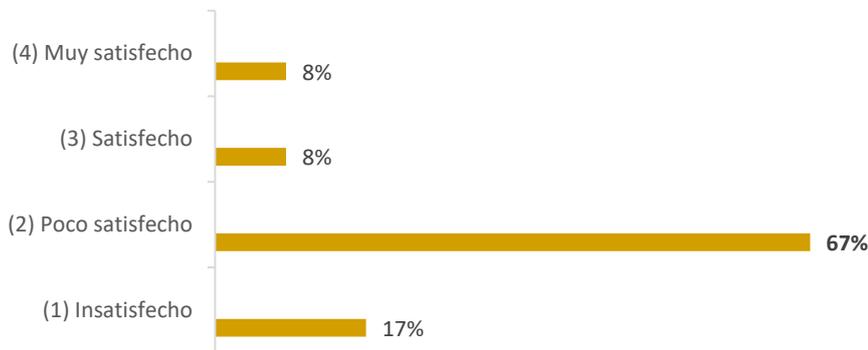
15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).



16. ¿Cuál de las condiciones de iluminación percibidas anteriormente le parece la más adecuada para iluminar el interior del aula?



17. Indique el grado de satisfacción del confort visual interior - exterior que se obtiene a través de la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural de las ventanas. Contrástela con la condición 2.



18H00 - Análisis comparativo de la Condición 1 y la Condición 2

Preguntas de percepción de cromaticidad visual

En la Condición 1, el 42% (en desacuerdo) de los encuestados respondieron que la iluminación entre los conductos solares y la luz artificial dentro del aula se diferencian claramente. Además estuvieron de acuerdo en las preguntas 2, 3 y 4. El 58% de los encuestados consideran que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior, el 50% dicen que la luz de la ventana y del solar tubes es suficiente para iluminar el aula y un 58% respondieron que consideran adecuada la iluminación de los conductos solares. La pregunta 5 que es sobre la iluminación de las ventanas, el porcentaje de los encuestados es similar en la valoración de acuerdo y desacuerdo con un 42%.

En la Condición 2, los encuestados estuvieron de acuerdo (42%) con respecto a la diferenciación de la luz natural simulada y la iluminación artificial, pero estuvieron en desacuerdo (58%) cuando se les preguntó acerca de la similitud de la luz de las bombillas LIFX con la luz natural exterior.

A pesar de esta negativa con respecto a la luz emitida por las bombillas LED, los encuestados consideran que la luz proporcionada por las ventanas y los LEDs es suficiente para iluminar el aula (42% están de acuerdo) y un 67% (de acuerdo) creen que es adecuada la luz natural reproducida con LEDs. En la pregunta 5, al igual que la Condición 2, el porcentaje de los encuestados sobre la iluminación de las ventanas, es similar en la valoración de acuerdo y desacuerdo con un 42%.

Preguntas de relación interior – exterior mediante la luz percibida

En la Condición 1, el 42% de los encuestados estuvieron de acuerdo en considerar muy necesaria la existencia de ventanas además de los conductos solares. En las preguntas 7 (92%) y 8 (42%), los encuestados estuvieron totalmente de acuerdo en reconocer la ventana como un elemento visual con el exterior al igual que los conductos solares.

En la Condición 2, el 50% de los encuestados de los encuestados estuvieron de acuerdo en considerar muy necesaria la existencia de ventanas además de los conductos solares. En la pregunta 7, los participantes estuvieron totalmente de acuerdo (92%) en considerar a la ventana como un elemento de conexión visual con el exterior, pero difieren en la pregunta 8, donde solo estuvieron de acuerdo (58%) en reconocer a la luz natural simulada como un elemento de conexión no visual con el exterior.

Preguntas de confort visual

En la Condición 1, las respuestas de las preguntas 13 y 14 estuvieron divididos entre totalmente de acuerdo, de acuerdo y en desacuerdo. En la pregunta 13 un 42% respondieron que estaban de acuerdo con la existencia de sombras molestas en la superficie de trabajo, mientras que un 42% respondieron estar en desacuerdo. Así mismo en la pregunta 14, el 50% de los encuestados estuvieron totalmente de acuerdo en la diferenciación correcta de los colores, mientras que el otro 50% estuvieron de acuerdo.

Otras de las preguntas que estuvieron de acuerdo los encuestados fueron en la 10 y 11, donde un 50% consideraron similar la luz producida por los conductos solares con la luz exterior y un 67% consideraron adecuada la iluminación sobre la superficie de trabajo. Por otro lado, el 67% respondieron estar en desacuerdo con que haya brillos desagradables sobre la superficie y un 58% respondieron estar totalmente de desacuerdo en que la iluminación del aula les causara fatiga visual.

En la Condición 2, a diferencia de la Condición 1, el 58% de los encuestados respondieron estar en total desacuerdo con la similitud del color de la luz de los LEDs con la luz natural exterior. Además las preguntas 12 (67%), 13 (50%) y 15 (58%) respondieron estar en desacuerdo con respecto a brillos desagradables y sombras molestas en la superficie de trabajo y malestar visual de la iluminación percibida en el aula.

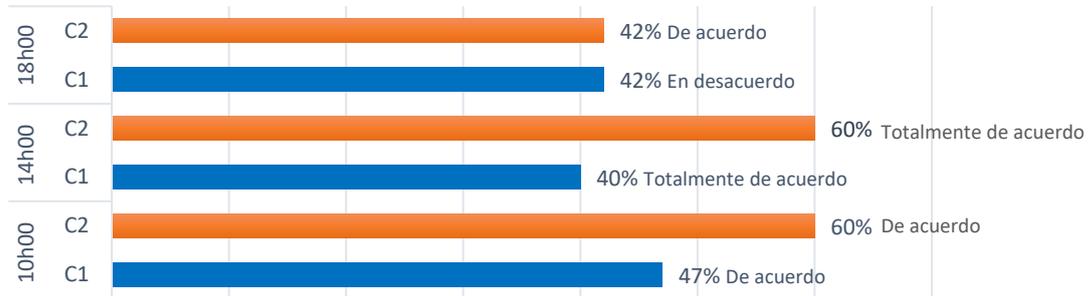
Un 83% respondieron estar de acuerdo con la diferenciación correcta de los colores y hubo un porcentaje similar de 40% (de acuerdo y desacuerdo) en la pregunta 11 relacionada a la iluminación adecuada en la superficie de trabajo.

Pregunta 16 y 17

En la pregunta 16, el 75% de los participantes prefirieron la Condición 1 para la iluminación dentro del aula y en la pregunta 17, el 67% respondieron estar poco satisfechos con respecto a la iluminación del aula conformada por la luz de las lámparas fluorescentes y la luz natural de las ventanas.

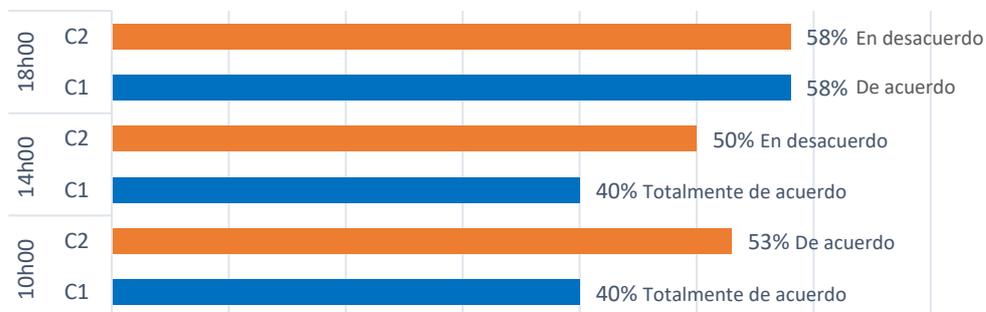
5.3.4. Horas combinadas. 10h00 – 14h00 – 18h00

1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.



En las tres horas del día, los encuestados distinguieron claramente la luz producida de los conductos solares (natural y natural simulada) con la luz artificial de las lámparas fluorescentes, reconociendo que existe una diferencia de temperaturas de color de ambas fuentes de luz a través de la percepción visual.

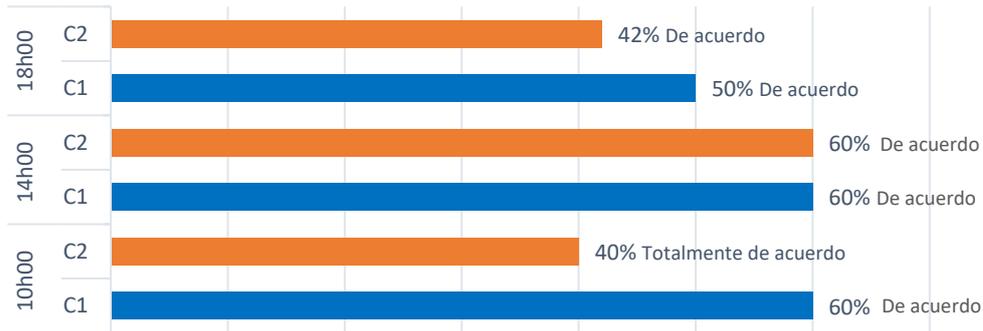
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.



En la pregunta 2, las respuestas fueron variadas. En la Condición 1, los encuestados respondieron estar totalmente de acuerdo con respecto a la similitud de la luz natural de los conductos solares con la luz exterior en las tres horas del día. En cambio, en la Condición 2, solo a las 10h00 estuvieron de acuerdo, pero cambiaron de opinión a las 14h00 y a las 16h00, donde no se convencieron de la similitud de la luz natural simulada en relación a la luz natural exterior.

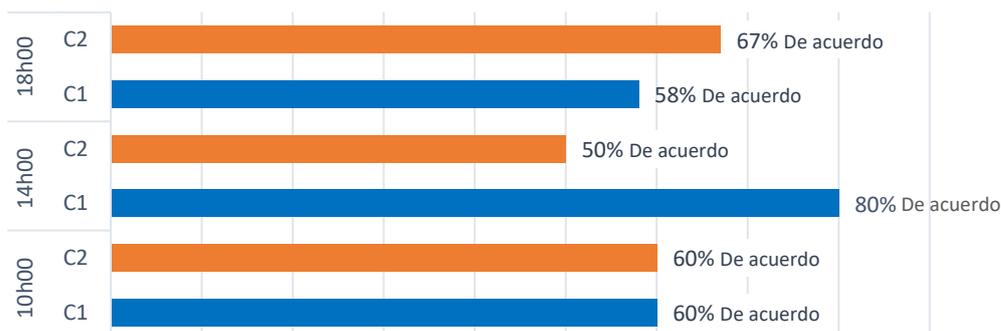
El resultado puede corresponder a que la lámpara LED de las bombillas LIFX es RGB, por lo que no reproduce todas las longitudes de onda del espectro visible, y por lo tanto, la temperatura de color no llega a ser tan idéntica como la luz natural exterior.

3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.



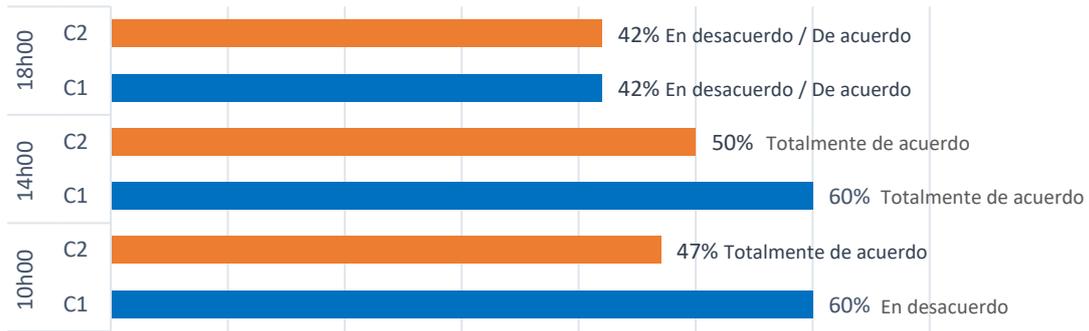
La respuesta de los encuestados que se obtuvo en las tres horas del día fue que están de acuerdo con la iluminación de las ventanas y los conductos solares (natural y simulada) de ambas condiciones. La respuesta fue positiva debido a que el día estuvo despejado y los rayos de sol podían atravesar los elementos lumínicos cenitales y verticales fácilmente proporcionando suficiente iluminación dentro del aula. En el caso de la Condición 2, la cantidad de luz proporcionada por las bombillas LIFX era del 100%, por lo que se obtuvo el mismo resultado que la Condición 1.

4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.



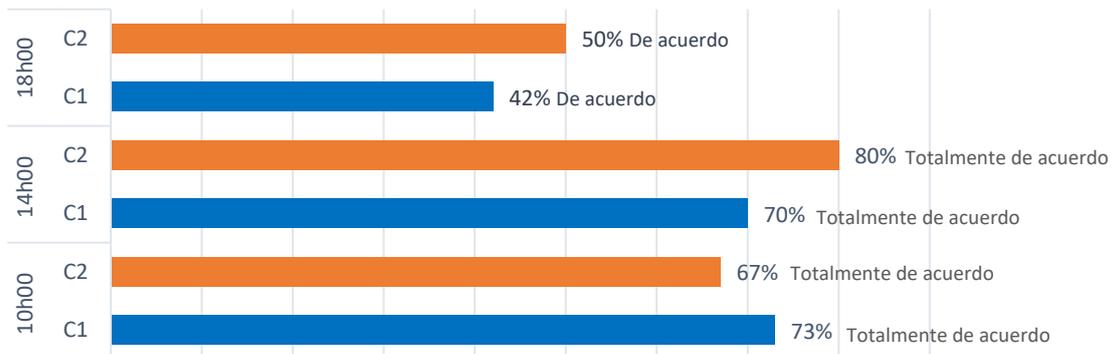
En la pregunta 4, los encuestados consideraron adecuada la iluminación de los conductos solares en ambas condiciones, por lo que es válida la respuesta para la investigación. Debido a que la iluminación cenital de los conductos solares se distribuye a lo largo del tumbado del aula, proporciona más luz directa en el área de trabajo.

5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.



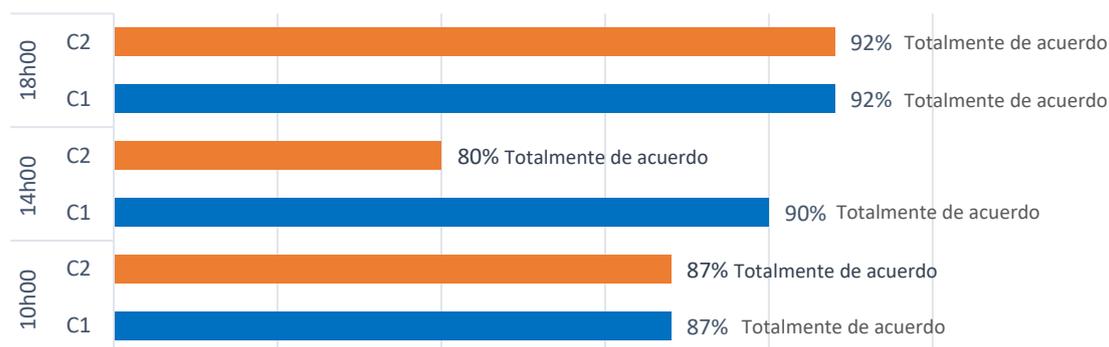
En las tres horas, se obtuvo diferentes resultados en las dos condiciones. La variación entre totalmente de acuerdo, de acuerdo y desacuerdo, se asume que podría ser por que las condiciones lumínicas exteriores son variadas y puede que en el experimento haya existido poca o mucha luz natural exterior recibida a través de las ventanas.

6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.



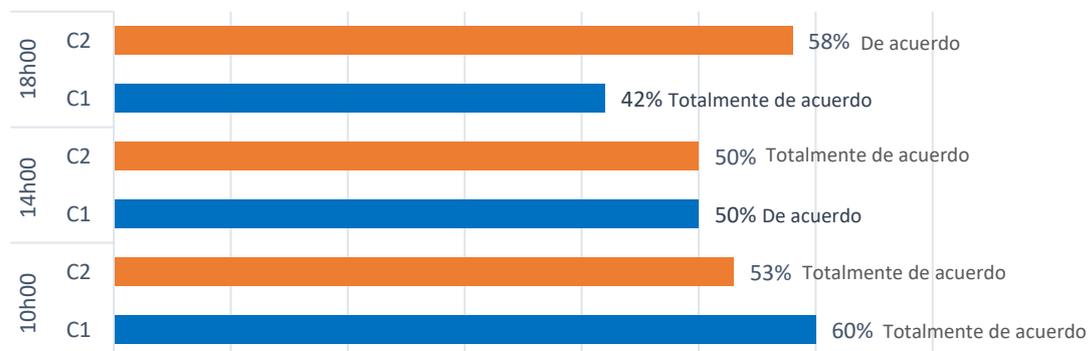
En todos los casos, tanto para la Condición 1 como la Condición 2, los encuestados están totalmente de acuerdo de que es muy necesaria la existencia de las ventanas a pesar de tener conductos solares y que la luz recibida a través de estos elementos verticales varíen en cuanto al nivel de iluminación que ingresa en el interior.

7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.



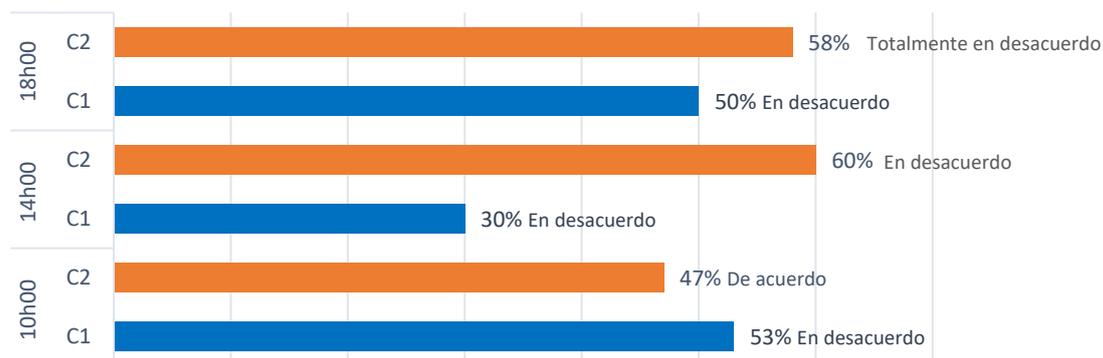
La pregunta 7 está relacionada con la pregunta 6, por lo que los encuestados coinciden con sus respuestas en ambas preguntas. Indiferentemente sea la Condición 1 o la 2, entre el 80% y el 90% de los participantes están totalmente de acuerdo que la ventana es un elemento de conexión con el exterior. En esta pregunta se afirma la necesidad del usuario en tener una relación directa con su entorno inmediato para orientarse en el tiempo y en el espacio.

8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.



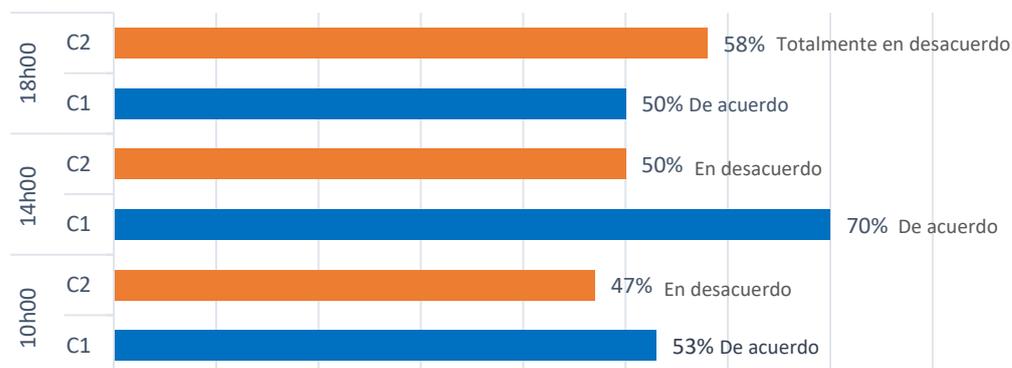
En las tres horas, se obtuvo una respuesta positiva por parte de los participantes quienes estuvieron totalmente de acuerdo en ambas condiciones de que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior. La respuesta positiva refleja una aceptación de reconocer la luz exterior por medio de los conductos solares, lo que permite pensar que la iluminación natural reproducida instantáneamente con LEDs puede sustituir a los conductos solares e implementarse en lugares aislados que carecen aberturas como son las ventanas.

9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.



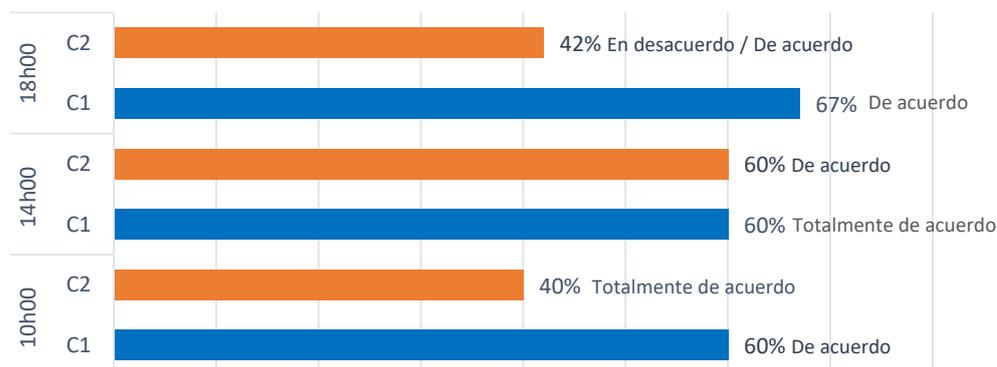
En la pregunta 9, los participantes coincidieron en que la luz recibida de los conductos solares no les causa sensación de calor corporal, obteniendo el mismo resultado en ambas condiciones. Al utilizar tecnología LED en la iluminación de luz natural simulada no genera calor siendo una ventaja sobre las lámparas convencionales. Por otra parte, la luz natural de los conductos solares no influyó tanto en la temperatura corporal del usuario, ya que al pasar la luz por el difusor, la luz no cae directamente en el área de trabajo siendo homogénea la iluminación dentro del aula.

10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.



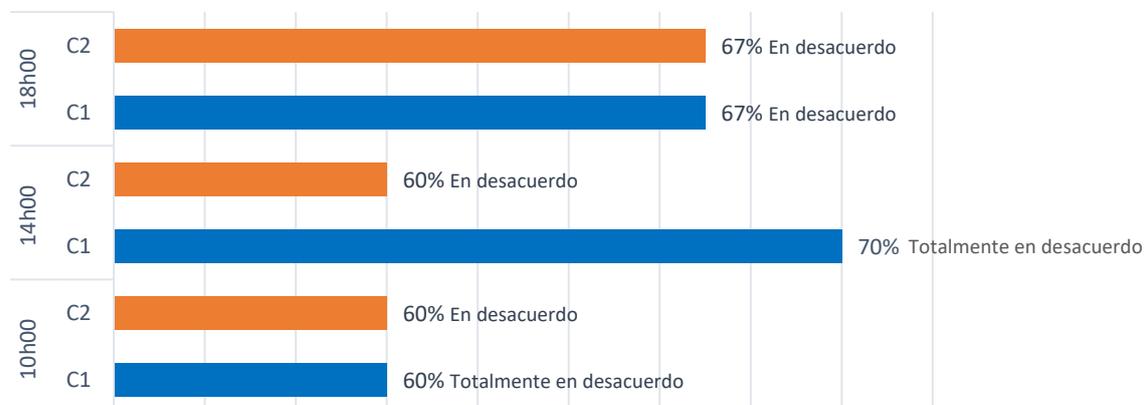
En la Condición 1 se observa que los resultados son positivos ya que los encuestados reconocen que la luz observada de los conductos solares es similar al color de la luz exterior. En cambio, en la Condición 2 refleja una negativa en las respuestas, ya que los participantes opinan que no se observa ninguna similitud entre las dos fuentes de luz. Al igual que la pregunta 2, las respuestas fueron negativas ya que al mencionar la valoración que tenían que darle al elemento lumínico, los estudiantes dirigieron su mirada al conducto solar notando una luz muy puntual (debido a la bombilla LIFX), diferente a la Condición 1.

11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.



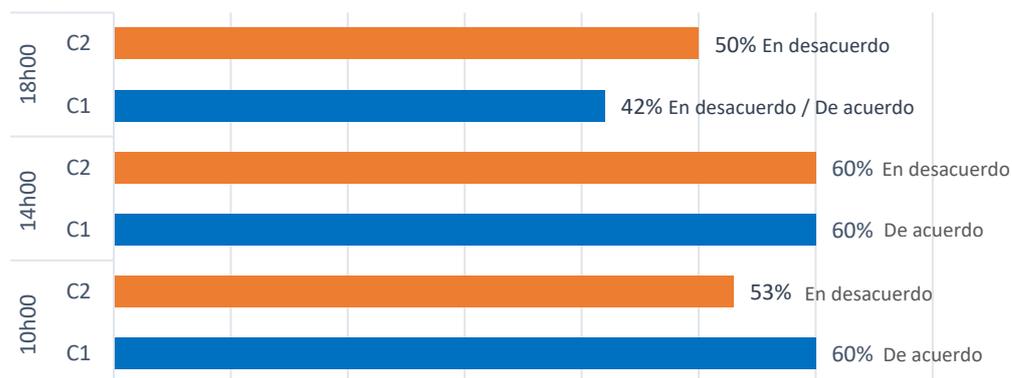
Tanto la Condición 1 como la Condición 2 en las diferentes horas, los resultados fueron positivos ya que los encuestados están de acuerdo y totalmente de acuerdo con la iluminación sobre la superficie de trabajo siendo ideal las condiciones lumínicas existentes y de la propuesta en el interior del aula.

12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.



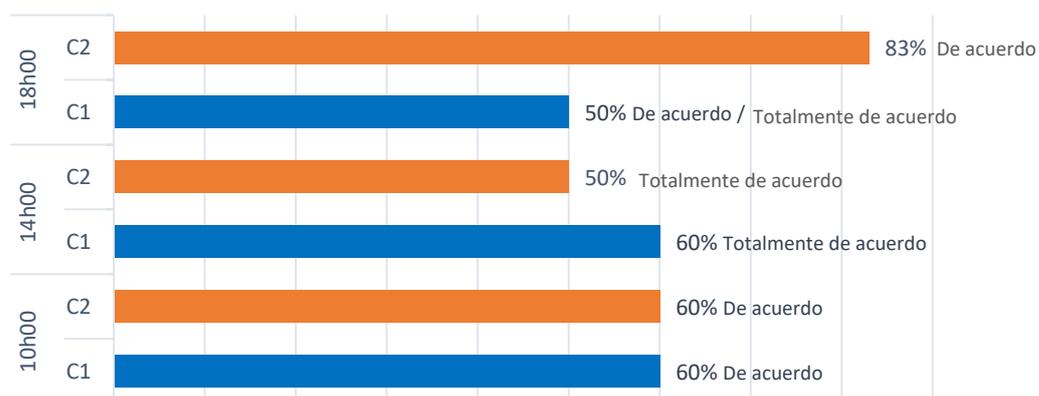
En las 3 horas del día que se realizó el experimento, más del 50% de los encuestados no percibieron brillos desagradables sobre la superficie del trabajo en las dos condiciones, entendiéndose que existe una adecuada distribución de luminancias en el interior del aula, logrando evitar el deslumbramiento.

13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.



A las tres horas del día se registró una variación en los resultados sobre la existencia de sombras molestas sobre las superficies de trabajo en ambas condiciones. En la Condición 1, a las 10h00 y a las 14h00, más del 50% estuvieron de acuerdo con que existen sombras molestas, pero un 42% (18h00) estuvieron de acuerdo y en desacuerdo. En cambio en la Condición 2, se observó que los encuestados no percibieron sombras molestas por lo que más de un 50% estuvieron en desacuerdo.

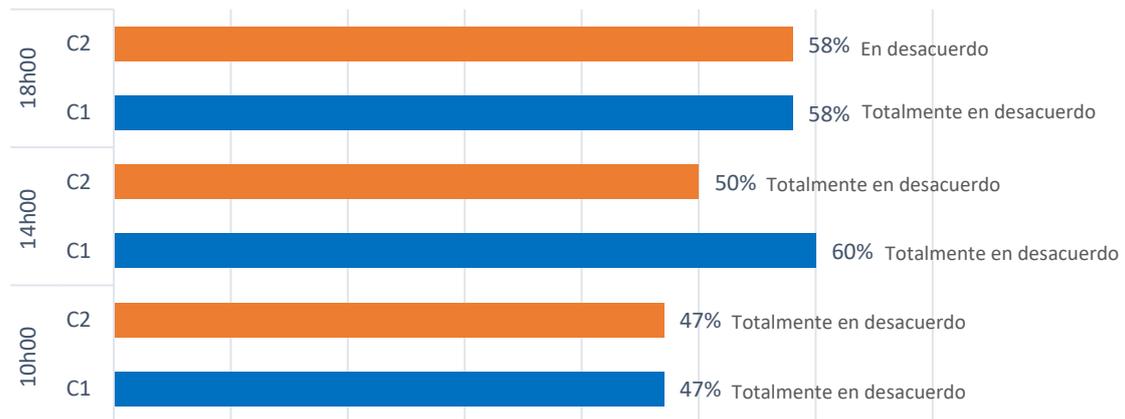
14. Puede diferenciar correctamente los colores.



La mayor parte de los encuestados (más del 50%) están de acuerdo con que pueden diferenciar correctamente los colores bajo la luz natural, la luz natural simulada y la iluminación artificial de los tubos fluorescentes.

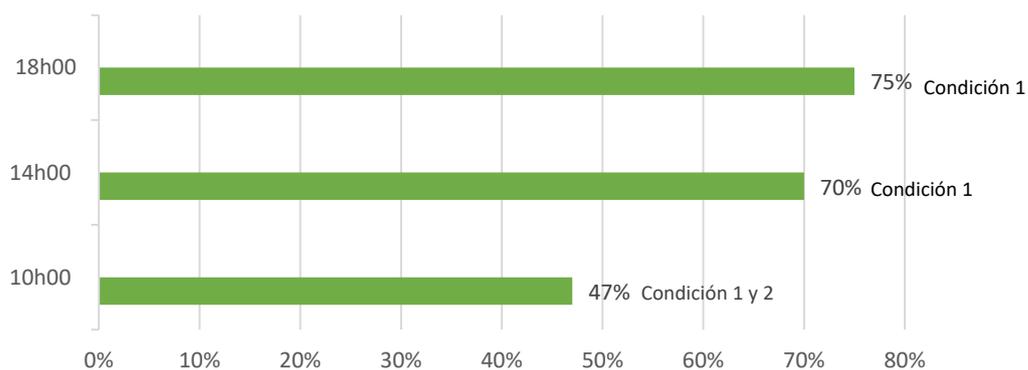
La respuesta positiva de la pregunta 14, se debe a que la calidad de luz natural es excelente (IRC de 100) y por lo tanto los colores de los objetos se ven como son en realidad y el IRC de las bombillas LIFX son de 90, siendo un valor muy aceptable para un LED.

15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).



En todas las horas del día y en ambas condiciones, los encuestados coincidieron que la iluminación de las dos fuentes de luz (luz natural y luz natural simulada con LEDs) no les causó fatiga o malestar visual.

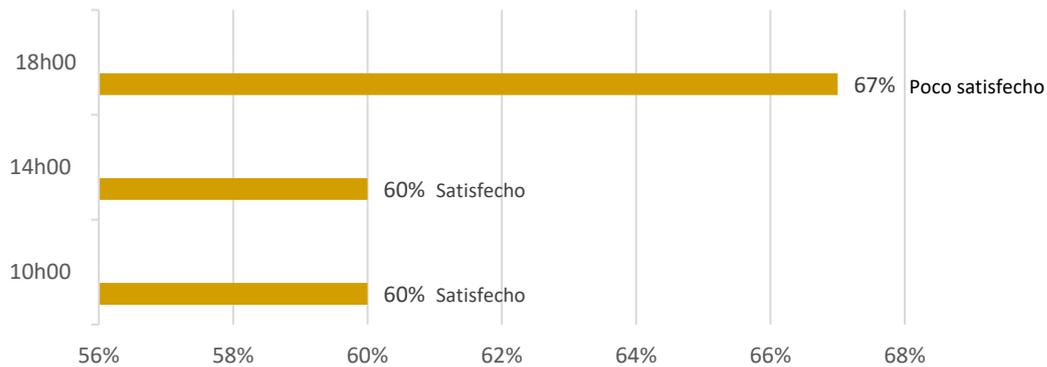
16. ¿Cuál de las condiciones de iluminación percibidas anteriormente le parece la más adecuada para iluminar el interior del aula?



En la pregunta 16, a las 10h00 los encuestados prefirieron la Condición 1 y 2 como las más adecuadas para iluminar el aula. Pero a medida que fueron avanzando las horas del día, los participantes cambiaron de opinión y prefirieron la Condición 1 sobre la Condición 2. Como se mencionó anteriormente, debido a que las bombillas LIFX son LED RGB y no LED de espectro

completo, la temperatura de color no alcanza a reproducir fielmente el color de la luz exterior y por lo tanto eligieron la luz natural real de los conductos solares.

17. Indique el grado de satisfacción del confort visual interior - exterior que se obtiene a través de la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural de las ventanas. Contrástela con la condición 2.



En las tres horas del día, los participantes demostraron estar satisfechos con la iluminación de las lámparas fluorescentes combinado con la iluminación natural de las ventanas (Condición 3). Los resultados de las encuestas de la pregunta 17 demuestran que la iluminación artificial existente en el aula C-B4 es adecuada y por lo tanto los estudiantes se sienten confortables. Pero a diferencia de los LEDs, las lámparas fluorescentes generan un alto consumo de energía, por lo que su sustitución por el sistema lumínico propuesto representará un ahorro energético y económico.

5.4. Conclusiones del experimento

Con respecto a las preguntas relacionadas con la percepción de cromaticidad visual, las respuestas de los encuestados fueron positivas en unas y negativas en otras. Debido a que en el experimento se utilizaron bombillas LED RGB de la marca LIFX, los encuestados consideraron que la luz de los conductos no se parecía a la luz natural exterior, prefiriendo la luz natural de los solartubes. Puede ser debido a que las bombillas estaban colocadas muy próximas a los difusores por lo que los participantes notaron una diferencia entre la luz percibida de los conductos solares de la Condición 1 y la Condición 2, pero esto no significa que la intención de simular la luz natural de manera artificial no sea fiable.

Por otro lado, los resultados de las preguntas relacionadas con la conexión interior – exterior mediante la luz percibida demostraron que los usuarios necesitan estar en contacto con su entorno exterior a través de la ventana para informarse de las condiciones climáticas, orientarse en el tiempo y en el espacio o para conocer los eventos que suceden en el exterior estando dentro del edificio. Sin embargo se reconoció que este elemento arquitectónico no es indispensable y que puede ser reemplazado por la iluminación artificial que reproduce las oscilaciones de la luz natural de manera instantánea. De esta forma se puede implementar el sistema lumínico propuesto en lugares interiores sin ventanas o reemplazar la iluminación artificial existente de un espacio con este sistema, logrando así que las personas reconozcan o vinculen la luz natural simulada con la luz exterior y sentir la misma relación interior – exterior pero de una manera no visual.

Finalmente los resultados de las preguntas sobre confort visual fueron positivos. Con las Condiciones 1 y 2 que involucraron tanto la iluminación natural de las ventanas y los conductos solares y la iluminación artificial de los tubos fluorescentes y las bombillas LIFX, los participantes consideraron adecuada la iluminación de la superficie de trabajo. Esto se confirma porque cumple con los parámetros de confort visual como es diferenciar correctamente los colores (IRC alto) y considerar que no existe sombras molestas (iluminación uniforme) ni brillos desagradables (correcta distribución de luminancias) sobre la superficie de trabajo, por lo que no hubo fatiga o malestar visual durante la fase experimental.

La comparación general de las 17 preguntas de la encuesta tanto en la Condición 1 como en la Condición 2, demuestran que los parámetros de confort y percepción de cromaticidad visual en ambas condiciones lumínicas son adecuados, y que la simulación de la luz natural por medio de las bombillas biodinámicas LIFX tiene un grado de fiabilidad aceptable aunque su efectividad sería mucho mayor si el LED utilizado fuera de espectro completo.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXOS	136

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES

En el proceso de la investigación se ha llegado a conocer empresas de iluminación dedicadas a implementar en sus luminarias las oscilaciones y las propiedades de la luz natural con el fin de brindar al usuario el confort lumínico deseado. El sistema de iluminación de estas empresas utiliza softwares que ayudan a programar automáticamente un determinado ambiente lumínico, sin considerar las condiciones climatológicas del exterior que se tiene en ese momento. A diferencia de los sistemas de luz natural programada, la presente investigación propone reproducir la luz exterior mediante LEDs pero de manera instantánea, siendo un tema original, nuevo e innovador de iluminación que nadie lo había planteado antes.

Actualmente las empresas que desarrollan los sistemas de luz natural programada, como Ledmotive, tienen la tecnología, los mecanismos y dispositivos necesarios para llevar a cabo el prototipo, pero por dificultad de tiempo y presupuesto no se lo ha podido realizar, por lo que se deja planteado el estudio en esta investigación.

Para verificar que el estudio sea viable, se procedió a realizar una experimentación para conocer la aceptación de las personas cuando perciben luz natural y luz natural simulada instantáneamente.

La investigación es de carácter orientativo, por lo que la experimentación se ha limitado a realizarse en tres horas diferentes de un día debido a que el tiempo para presentar el Trabajo de Fin de Máster es limitado y se contó con un reducido número de voluntarios para la fase experimental. El proceso correcto de la experimentación sería repetir el mismo estudio durante 1 año considerando las 4 estaciones características y realizar la experimentación en los días exactos de los solsticios de invierno y verano y los equinoccios de otoño y primavera y en las horas donde la temperatura de color de la luz exterior varíe significativamente.

Los datos que se reflejan en las encuestas son propios de esa franja de horas y de ese día en concreto, por lo que la experimentación es válida a pesar de ser limitada.

Una vez demostrada la viabilidad y los resultados positivos de la fase experimental, se pretende trasladar la simulación realizada en la C-B4 a las aulas que carecen de conductos solares (C-B5, C-B6, C-B7, C-B8, C-B9 y C-B10) y reemplazar la iluminación artificial existente (tubos fluorescentes) por el sistema lumínico propuesto, lo cual significaría un ahorro energético y económico considerable.

El proyecto de implementar el sistema lumínico propuesto en las aulas de la ETSAB es viable pero dependerá siempre de la colaboración de empresas que proporcionen los dispositivos necesarios para la instalación del sistema, ya que metodológicamente es posible, los resultados de las encuestas son fiables y técnicamente se puede obtener un producto unitario con los dispositivos electrónicos que disponen las empresas.

El resultado será un prototipo que se podrá patentar (ya que a lo largo de la investigación no se encontró un estudio similar a éste), y si es el caso, mejorar o añadir elementos que faltarían al sistema de iluminación de traslación de luz natural inmediata con LEDs.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adjuntament de Barcelona. (2016). Anuario estadístico de la ciudad de Barcelona 2016. Territorio, clima y medio ambiente. Barcelona.
- Alameda, T. (2014). Una ventana artificial recrea un cielo soleado para iluminar interiores. *Centro de innovación BBVA*.
- Argeros, W. (31 de Mayo de 2016). Product Review and Buyer's Guide: Stack LED Smart Light Bulbs.
- Carpa, L. (25 de Julio de 2012). Obtenido de <http://broadacre.tumblr.com/post/28014316485>
- CoeLux. (2017). Obtenido de <http://www.coelux.com/>
- Comisión de Normalización Europea. (2002). Norma Europea sobre Iluminación para Interiores UNE 12464.1.
- Comité Español de Iluminación. (s.f.). Aprovechamiento de la luz natural. En *El libro blanco de la iluminación. Tecnología de la luz* (págs. 221-267). MIC.
- Comité Español de Iluminación. (s.f.). Efectos sobre el cuerpo como un conjunto. En A. Corrons Rodríguez, J. Campos Acosta, & M. Melgosa Latorre, *El libro blanco de la iluminación. Principios básicos de la iluminación* (págs. 247-251). MIC.
- Contemporary Art Daily. (6 de Abril de 2014). "Teen Paranormal Romance" at The Renaissance Society. Obtenido de <http://www.contemporaryartdaily.com/tag/guytonwalker/page/2/>
- Deschères, L. (22 de Junio de 2015). La iluminación cronobiológica: el desafío de una nueva era de luz y salud. *Revista Luces CEI*.
- ERCO. (2009). Un discurso de la luz. Entre la cultura y la técnica. Lüdenscheid: Mohn media Mohndruck GmbH.
- ERCO. (2017). LED. Lámparas eficientes basadas en la tecnología de semiconductores. Obtenido de <http://www.erco.com/guide/lighting-technology/led-2621/es/>
- Espacio Solar. (25 de Abril de 2008). Conductos de sol Deplosun en la ETSAB - Barcelona. Barcelona.
- ETAP Lighting. (2015). *Dossier LED. Una nueva fuente de iluminación*.

- Falcón Yepes, J. (9 de Junio de 2015). Diseño e implementación de un sistema electrónico para generar efectos luminosos en función de una señal de audio. Barcelona.
- Folguera Caveda, E., & Muros Alcojor, A. (2013). *La iluminación artificial es arquitectura*. Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica.
- Forcales, M. (2 de Junio de 2017). Posibilidad de reproducir instantáneamente la luz natural exterior mediante LEDs con tecnología de Ledmotive. (J. Rivera Morla, Entrevistador)
- Friederici, A., & Wand, B. (2006). Daylight and Well-Being. In U. B. Licht, *Lighting Design. Principles. Implementation. Case Studies* (pp. 8-11). Munich: DETAIL book.
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (2015). *Guía sobre tecnología LED en el alumbrado*. Madrid: BOCM.
- Galisteo, J. M. (16 de Mayo de 2017). Posibilidad de reproducir instantáneamente la luz natural exterior mediante LEDs con tecnología de SAKMA . (J. Rivera Morla, Entrevistador)
- García Fernández, J. (s.f.). *El proceso visual y sus características*. Obtenido de http://recursos.citcea.upc.edu/llum/luz_vision/p_visual.html
- HELLA. (2017). LED ¿Qué es lo que importa?
- Iconia Design. (Junio de 2015). Obtenido de <http://www.iconiadesign.com/iconia-news/01-06-2015/>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2005). Guía técnica para el aprovechamiento de la luz natural en la iluminación de edificios. Madrid: Informes IDAE.
- Krol, J. (Junio de 2013). RGB LED Lamp. Obtenido de <http://www.plantedtank.net/forums/33-plants/1133858-dumb-plant-question.html>
- Lawrence, G. (2016). *Geoff Lawrence*. Obtenido de http://www.geofflawrence.com/esp/temperatura_del_color.html
- Ledia Group. (9 de Octubre de 2012). La importancia de la disipación del calor en una lámpara LED.
- Ledmotive. (2017). Obtenido de <http://ledmotive.com/>
- LiFi Labs, Inc. (31 de Octubre de 2016). Purple Communications, Inc. Teams with LIFX to Deliver 'POP' Light for Deaf and Hard-Of-Hearing Individuals. San Francisco, California, Estados Unidos.
- Loos, M. (2014). *Michael Loos*. Obtenido de <http://www.michaelloos.com/index.php?/clients/coelux/>
- M.C. Lam, W. (1977). *Perception and Lighting as formgivers for architecture*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Meneses Bedoya, E. (2015). *La representación de la luz natural en el proyecto arquitectónico*. Barcelona.
- Monteoliva, J. M. (2015). *Temperatura de color correlacionada de la luz natural: análisis dinámico en espacios interiores*. Obtenido de

- <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4581/5315>
- OSRAM. (2011). Estudio: El efecto de la luz en la capacidad de rendimiento de los alumnos.
- OSRAM. (2017). Light in its third dimension. The biological aspects of lighting design for better quality of life.
- Pérez Vega, C. (2006). Visión, luz y color. Cantabria.
- Promateriales. (2013). Iluminación artificial en la arquitectura: Y la luz se hizo. *Promateriales*, 65-81.
- Rhodes, M. (9 de Septiembre de 2014). Ex-TESLA and NASA engineers make a light bulb that's smarter than you.
- Robathan, M. (6 de Febrero de 2017). *Peter Zumthor: Exclusive interview on the role of emotions in his work*. Obtenido de <http://www.cladglobal.com/news.cfm?codeid=330100>
- Sá, A. (2015). La calidad de la luz LED. *ICANDELA*.
- Sales, C. (19 de Noviembre de 2012). *Esmeralda Azul Magazine Online*. Obtenido de <http://www.esmeraldazul.com/es/blog/dormir-bien-y-despertar-mejor/>
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Servei de Publicacions de la UPC y CBS.
- Sosa Domínguez, L. (2016). *La luz artificial como tecnología de simulación de la luz natural: Evaluación de fiabilidad de los parámetros perceptivos y de confort*. Barcelona.
- Trà Infografia. (28 de Abril de 2015). IREC LEDMOTIVE.
- Vélez Ortiz, C. (2012). *De los ojos a las manos, tocar el espacio: El espacio táctil en la arquitectura moderna*. Medellín: Univeridad Nacional de Colombia.
- Viva-Lite. (2017). *¿En qué se diferencia la luz de espectro total?* Obtenido de http://www.viva-lite.es/tl_files/downloads/brochure_es.pdf
- Yánez Parareda, G. (2008). *Arquitectura solar e iluminación natural: Conceptos, métodos y ejemplos*. Madrid: Editorial Munilla - Lería.
- ZUMTOBEL. (2017). Back to the roots through light.

ANEXOS A.1.



Universitat Politècnica de Catalunya
 Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona
 MBArch - Especialidad en Innovación Tecnológica en la Arquitectura
 Encuesta para Trabajo de Fin de Máster

ENCUESTA: Condición 1

A través de la siguiente encuesta se busca conocer su percepción y confort visual dentro del aula C-B4 de la ETSAB.

Fecha/Hora 2017 - 06 - 26 / _____

Sexo Femenino Masculino

Edad _____

	VALORACIÓN			
	1	2	3	4
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.				
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.				
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.				
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.				
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.				
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.				
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.				
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.				
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.				
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.				
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.				
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.				
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.				
14. Puede diferenciar correctamente los colores.				
15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).				

Escala de evaluación

(1) Totalmente en desacuerdo, (2) En desacuerdo, (3) De acuerdo, (4) Totalmente de acuerdo

ANEXOS A.2.



Universitat Politècnica de Catalunya
 Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona
 MBArch - Especialidad en Innovación Tecnológica en la Arquitectura
 Encuesta para Trabajo de Fin de Máster

ENCUESTA: Condición 2

A través de la siguiente encuesta se busca conocer su percepción y confort visual dentro del aula C-B4 de la ETSAB.

	VALORACIÓN			
	1	2	3	4
1. La luz natural de los conductos solares y la luz artificial en el aula se diferencian claramente.				
2. Considera que la luz de los conductos solares se parece a la luz natural exterior.				
3. La luz que atraviesa la ventana y los conductos solares es suficiente para iluminar el aula.				
4. Que tan adecuada considera la iluminación de los conductos solares.				
5. Que tan adecuada considera la iluminación de las ventanas.				
6. Además de la iluminación de los conductos solares, considera muy necesaria la existencia de ventanas.				
7. Considera que la ventana es un elemento de conexión visual con el exterior.				
8. Considera que los conductos solares son elementos de conexión no visual con el exterior.				
9. La luz recibida a través de los conductos solares, causa sensación de calor en su cuerpo.				
10. El color de la luz que se observa a través de los conductos solares es similar al color de la luz exterior.				
11. La iluminación sobre la superficie de trabajo es adecuada.				
12. La iluminación produce brillos desagradables sobre la superficie de trabajo.				
13. Existen sombras molestas sobre la superficie de trabajo.				
14. Puede diferenciar correctamente los colores.				
15. La iluminación percibida en el aula, le causó fatiga o malestar visual (cansancio o dolor en los ojos).				

Escala de evaluación. (1) Totalmente en desacuerdo, (2) En desacuerdo, (3) De acuerdo, (4) Totalmente de acuerdo

16. ¿Cuál de las condiciones de iluminación percibidas anteriormente le parece la más adecuada para iluminar el interior del aula?				
--	--	--	--	--

Escala de evaluación. (1) Condición 1, (2) Condición 2, (3) Condición 1 y 2, (4) Ninguna de las anteriores

	VALORACIÓN			
	1	2	3	4
17. Indique el grado de satisfacción del confort visual interior - exterior que se obtiene a través de la iluminación artificial de las lámparas fluorescentes combinada con la luz natural de las ventanas. Contrástela con la condición 2.				

Escala de evaluación. (1) Insatisfecho, (2) Poco satisfecho, (3) Satisfecho, (4) Muy satisfecho