



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Campo de Tecnología

TRANSMISIÓN DE LUZ NATURAL A TRAVÉS DE FIBRA ÓPTICA

POTENCIAL DE AHORRO ENERGÉTICO EN ESPACIOS COMERCIALES

Por Tesis que para optar por el Grado de: Maestra en Arquitectura

Presenta:
Alejandra Padilla Quiñones

Director de Tesis: Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo.
Instituto de Ingeniería

Comité tutor:
Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara. Facultad de Arquitectura
Mtro. Francisco Reyna Gómez. Facultad de Arquitectura
Dr. Víctor Coreno Rodríguez. Facultad de Arquitectura
Mtro Jorge Rangel Dávalos. Facultad de Arquitectura

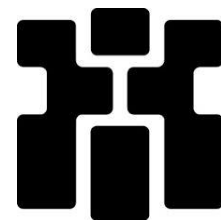
México, D.F. Noviembre de 2014



Facultad de Arquitectura



Facultad de Estudios Superiores Aragón



Instituto de Investigaciones Históricas



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**TRANSMISIÓN DE LUZ NATURAL
A TRAVÉS DE FIBRA ÓPTICA
Potencial de ahorro energético en espacios
comerciales**

Presenta:

Alejandra Padilla Quiñones

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Campo-Tecnología

UNAM - 2014 – México

Agradecimientos:

A mis padres y hermanos por ser mi ejemplo de lucha, constancia y disciplina, por su cariño y apoyo incondicional.

A mis maestros por compartir sus conocimientos y hacerme ver el mundo de una forma distinta.

A la Dra. Azucena Escobedo por su paciencia y dedicación a lo largo de esta investigación.

Al Mtro. Zeevaert y al Arq. Ricardo Sánchez por su apoyo para la realización de la etapa experimental.

A la Mtra. Cecilia Guadarrama por sus consejos y apoyo.

Al Observatorio de Radiación Solar e Instituto de Geofísica UNAM.

Al Dr. Francisco Godínez por su apoyo en el desarrollo de la metodología.

A la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A mis amigos y compañeros por sus consejos y motivación.

RESUMEN

Este documento consiste en el análisis del comportamiento lumínico y energético un Transmisor de Luz Natural Activo (TLNA) el cual capta los rayos solares y transmite la luz natural a través de cables de fibra óptica hacia un difusor que distribuye la iluminación natural en el interior de un espacio cerrado. Asimismo se estudian los niveles de iluminación obtenidos en un cielo despejado a lo largo de un periodo de medición de un mes, así como la adquisición de datos de irradiancia e iluminancia exterior e iluminancia interior.

Posteriormente se evalúan la eficiencia energética y la factibilidad económica para adquirir el TLNA en comparación de un sistema lumínico convencional bajo los parámetros de iluminación y tarifa eléctrica de un local comercial.

La investigación se divide en tres etapas: la primera consiste en la fase experimental o de prueba donde se analiza el comportamiento del TLNA mediante la obtención de datos para obtener las variables de iluminancia exterior e iluminancia interior. Durante la segunda etapa se calcula la constante para obtener la relación con datos de iluminancia interior en relación con los datos de iluminancia exterior del Instituto de Geofísica de la UNAM. La tercera etapa consiste en el cálculo de ahorro energético y lumínico el caso en comparación con varios escenarios donde se analiza el potencial de ahorro del TLNA.

Finalmente se concluye que el TLNA solo suministra niveles de iluminación óptimos en un cielo despejado y su potencial de ahorro energético es menor a un sistema de iluminación LED. Asimismo se establecen teorías que explican las fallas y recomendaciones para la elaboración de un TLNA.

Palabras clave: luz natural, irradiancia, iluminancia, eficiencia energética.

“La luz es el pulso de las formas.”

Leonardo Da Vinci

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	7
2. Luz Natural.....	13
3. Luz artificial.....	19
4. Luz y Percepción.....	25
5. Parámetros de diseño de iluminación en tiendas departamentales.....	41
6. Sistemas de conducción de luz natural.....	47
7. Componentes del Sistema de Iluminación Híbrida.....	55
8. Descripción del caso de estudio.....	65
9. Metodología.....	73
10. Descripción del comportamiento lumínico.....	81
11. Ahorro energético y económico.....	103
Conclusiones.....	113
Anexos.....	117
Glosario.....	131
Referencias.....	135

ÍNDICE

Introducción	1
1. Antecedentes	7
1.1 Universidad de Liverpool, Reino Unido	9
1.2 Universidad de Uppsala, Suecia	10
1.3 Universidad Nacional Autónoma de México	11
1.4 Pruebas de luz y senso-percepción	11
2. Luz Natural	13
2.1 Cielo Nublado	16
2.2 Cielo Despejado	16
2.3 Cielo parcialmente nublado	16
2.4 Iluminancia directa del Sol	17
2.5 Iluminancia difusa	17
3. Luz artificial	19
3.1 Temperatura de color	21
3.2 Índice de rendimiento de color	21
3.3 Lámparas fluorescentes	22
3.4 Balastos	22
3.5 Lámparas halógenas	23
3.6 Diodo Emisor de Luz	24
4. Luz y Percepción	25
4.1 Color	30
4.2 Propiedades del color	30
4.2.1 Espectro de luz	31
4.2.2 Sistema de ordenación de colores	31
4.2.3 Diagrama CIE	32
4.2.4 La percepción	32
4.2.5 Efectos psíquicos del color	33
4.2.6 Contraste	34
4.3 Iluminación natural y evaluación post-ocupacional	36
5. Parámetros de diseño de iluminación en tiendas departamentales	41
5.1 Componentes de un centro comercial	43
5.2 Iluminación en retail	43
5.3 Iluminación de acento	45
5.4 Iluminación direccional	45
6. Sistemas de conducción de luz natural	47
6.1 Sistemas Pasivos	49
6.1 Sistemas Activos	50
6.2 Sistema Himawari	51
6.3 Captador Solar	52
6.4 Tubo de luz natural (Enhanced tubular daylight guidance)	52
6.5 Iluminación híbrida solar (HSL Hybrid Solar Lighting)	53
6.6 Sistema de iluminación solar con Fibra óptica	53
6.7 Sistema de Iluminación Solar Canopy (SCIS)	54
7. Componentes del Sistema de Iluminación Híbrida	55
7.1 Concentrador de Lentes Fresnel	57
7.2 Fibra óptica: Conductor de luz	58
7.2.1 Tipos de fibra óptica	59
7.3 Descripción del Rastreador de luz natural	59
7.4 Funcionamiento de un concentrador solar	60
7.5 Principio de la patente	61
7.6 Descripción del TLNA	62
7.6.1 Luminario Híbrido L2 Parans	63
8. Descripción de caso de estudio	65
8.1 Local comercial	67
8.2 Zona de prueba	70

9. Metodología	73
9.1 Etapa experimental	75
9.2 Relación de la iluminancia global horizontal e iluminancia interior	79
9.3 Cálculo de ahorro energético y lumínico	79
10. Descripción del comportamiento lumínico	81
10.1 Resultados	83
10.1.1 Resultados de las mediciones reales	83
10.1.2 Iluminancia exterior e interior por hora. 12 de marzo 2014	87
10.1.3 Iluminancia exterior e interior por hora. 13 de marzo 2014	93
10.2 Resultados del simulador Biosol	96
10.3 Mediciones LIM UNAM e Inst. de Geofísica UNAM	98
10.4 Comparación de resultados de las investigaciones anteriores	101
11. Ahorro energético y económico	103
11.1 Caso base	105
11.2 Escenario 1 (Luminarias L2, T5 y MR16)	106
11.3 Escenario 2 (L2, Slim LED y MR16 LED)	108
11.4 Escenario 3 (Slim LED y MR16 LED)	110
11.5 Resumen energético y económico	111
Conclusiones	113
Anexos	117
Glosario	131
Referencias	135

INTRODUCCIÓN

Existen varias definiciones de luz, una de ellas es: *la manifestación de la energía en forma de radiación electromagnética, entre dos límites de longitudes de onda del espectro y que producen sensaciones visuales* (Martín, 2007). La luz es un medio utilizado para reconocer objetos. En este sentido consideramos que la iluminación es el arte de iluminar o dar luz a un espacio u objeto. Por esta razón, la iluminación forma parte importante en la arquitectura ya que ambas disciplinas poseen dos características en común: el arte y la ciencia. Asimismo la iluminación es la tecnología que determina el buen funcionamiento de la arquitectura y la mercadotecnia en las tiendas departamentales, sin embargo es la instalación que consume mayor cantidad de energía eléctrica, de un 20% a un 50% del consumo total del edificio (Norsyafizan, 2010).

Una de las tecnologías que surgió en los últimos años es el Sistema Parans, el cual es una de las tres marcas disponibles en el mercado, y es uno de los sistemas que pertenecen a la categoría de los Sistemas Híbridos en iluminación (SIH)¹. Los otros dos sistemas son: Iluminación Híbrida Solar (IHS), Sistema Solar de Iluminancia Canopy (SSIC).

Se le asigna el nombre de "híbrido" por poseer la capacidad de distribuir luz natural y luz artificial en un espacio arquitectónico. Asimismo, es importante mencionar el Sistema Tubular de Guía de Luz (STGL), el cual consiste en un domo de policarbonato cuya función es captar de manera pasiva, la luz directa y la luz difusa, la cual transporta por medio de un tubo compuesto de material reflectivo, finalmente un difusor distribuye la luz natural en el interior del espacio. La diferencia entre el funcionamiento y características entre los sistemas pasivos y activos, se explicará más adelante en el Marco Teórico.

Ambos sistemas transmisores de luz natural, pasivos (TLNP) y activos (TLNA), han demostrado proveer los niveles de iluminación necesarios para el desarrollo de tareas dentro de un espacio, así como el ahorro energético de un edificio, en diferentes latitudes del mundo (Mayhoub y Carter, 2012). Cabe mencionar que el TLNA consiste en un rastreador solar compuesto por lentes Fresnel los cuales captan los rayos de sol y transporta la energía a través de fibra óptica para distribuirla a través de un luminario en el interior de un espacio (Parans, 2012). En este sentido, es importante verificar si el Transmisor de Luz Natural Activo (TLNA) cumple con los parámetros de iluminación requeridos por una tienda departamental y si contribuye al ahorro energético de un edificio. Esto se logra utilizando instrumentos de medición para la obtención de datos exteriores e interiores de irradiancia e iluminancia con el objetivo de realizar una comparativa para determinar el rendimiento lumínico del exterior de un edificio (proporcionado por la luz natural) al interior del mismo espacio.

¹ Por sus siglas en inglés: Hybrid Lighting System (Sistema Híbrido de Iluminación).

Es importante destacar que el crecimiento desmesurado de los edificios comerciales, en específico los centros comerciales nos han llevado a crear conciencia para la utilización de tecnologías en la arquitectura donde se utilice la energía de manera eficiente. Un dato importante es que en el 2008 existían 95 centros comerciales en la Ciudad de México (Mercamétrica, 2008) y a la fecha continúa su crecimiento de manera considerable. En este sentido, resulta importante proponer al arquitecto diseñador y constructor el uso de tecnologías de vanguardia en la iluminación de tiendas departamentales con el objetivo de hacer un uso eficiente de la energía y demostrar sus ventajas mediante el estudio de las características y propiedades del luminario híbrido en el diseño interior arquitectónico, respetando los parámetros establecidos en la mercadotecnia y el correcto funcionamiento de una tienda departamental.

Por otro lado, en el 2011 el Balance Nacional de Energía establece un consumo eléctrico total de 271.01 petajoules (SENER, 2011) en los sectores residencial, comercial y público, de los cuales el 69.74% pertenece al sector residencial, 19.50% al sector comercial y el 10.75% al sector público.

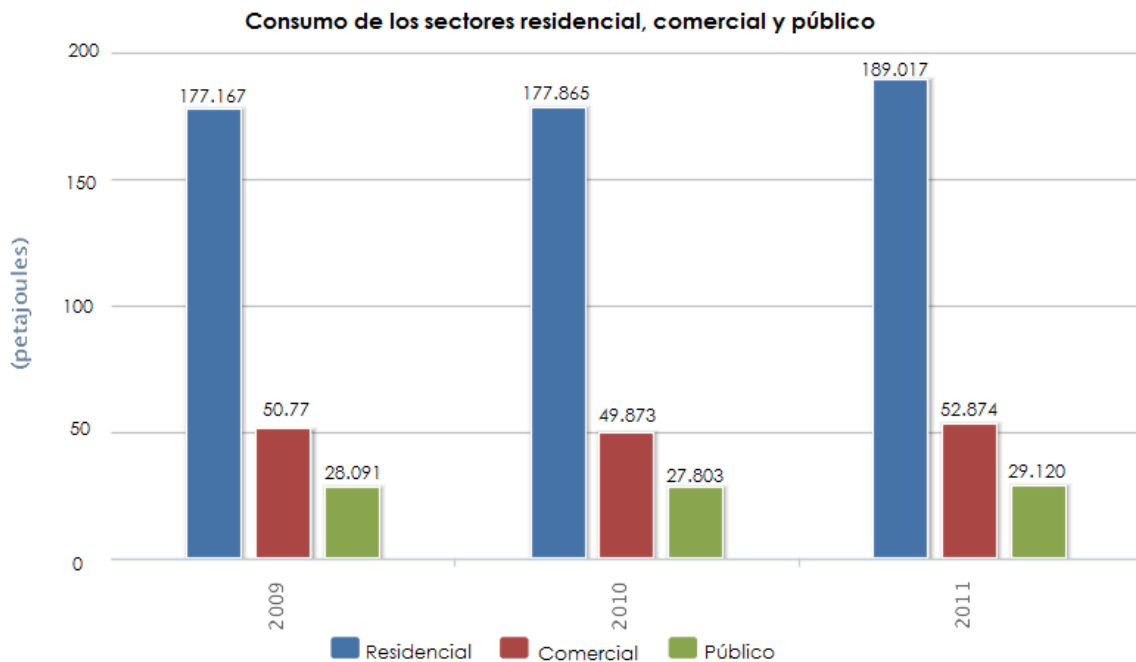


Fig. 1. Consumo total de electricidad en petajoules (SENER, 2011)

Ahora bien, en México lo referente a edificios no residenciales, se han realizado estimaciones las cuales indican en una matriz energética, que el 60% de la energía consumida en un edificio pertenece a la iluminación, el 20% corresponde al aire acondicionado, el 10% al bombeo de agua y el resto comprende otras formas de uso que incluyen el consumo de diversos equipos utilizados en ese sector (Islas, 1995).

El 60% pertenece a un rango alto de consumo de energía eléctrica en un edificio por lo que se establece estudiar la forma en que la energía se utilice de manera

eficiente a través de tecnología sustentable como la *transmisión de luz natural a través de fibra óptica*.

En esta investigación el TLNA fue evaluado tomando como referencia los parámetros de iluminación establecidos por las tiendas departamentales (*retail*²) y de acuerdo a las normas internacionales y nacionales.

Con base a la problemática general, es importante plantear la tipología de los centros comerciales para identificar las características del caso base y su comparación con el caso de estudio. Cabe mencionar que los centros comerciales están conformados por tiendas ancla, tiendas subancla, free standing (comercios en edificios independientes) y locales comerciales, cuya tipología se describe en el apartado 5.1 de esta tesis. En el desarrollo de esta investigación, se realizó el estudio de un caso base, esto es, el análisis energético y niveles de iluminación en una tienda de zapatos (local comercial) ubicada en un centro comercial en la Ciudad de México, y la comparativa de las características de un sistema de iluminación convencional con el TLNA y el difusor híbrido.

Un centro comercial, funciona con diferentes instalaciones (hidráulica, sanitaria, eléctrica, aire acondicionado, automatizados) las cuales pueden ser utilizadas de manera eficiente para el aprovechamiento energético y disminuir el consumo eléctrico en el mismo. Dado que la iluminación artificial forma parte del mayor consumo total de energía eléctrica en un edificio comercial, además de ser el componente visual para el adecuado funcionamiento de las tiendas departamentales desde el exterior hacia el interior de un espacio arquitectónico, es la instalación que se plantea utilizar para lograr el ahorro energético de un local comercial mediante la colocación del TLNA.

Existen diversos datos los cuales comprueban el consumo eléctrico de la iluminación artificial en los centros comerciales. Se ha realizado el diagnóstico energético para cuatro centros comerciales en Hong Kong, de los cuales se encontró que el aire acondicionado y la iluminación eléctrica son los usos finales que consumen mayor energía, conformando el 85% del total del consumo eléctrico del edificio. Se determinó un consumo promedio de 430 kWh/m² (Joseph & HW, 2003). Asimismo, Korea ha sido un país interesado en pertenecer a los 30 países con menor porcentaje de emisiones de carbono. Por esta razón, el Instituto de Información en Construcción Tecnológica de la República de Korea realiza una propuesta para la eficiencia energética en dos centros comerciales. Los resultados del diagnóstico demuestran el uso de energía anual en un centro comercial, siendo la iluminación el 38.90% del consumo eléctrico del edificio (Park & Hong, 2011).

Por otro lado, haciendo énfasis en el análisis de diseño de un espacio comercial, se han realizado estudios del efecto de compra que la iluminación causa en el usuario y la reacción de éste a los colores interiores, iluminación interior y precio del producto. Todo esto antes que la Tecnología LED en iluminación se introdujera en el

² Término en inglés referido al género arquitectónico que pertenece a los centros comerciales, tiendas departamentales y boutiques.

mercado (Babin, Hardesty & Suter, 2003). Es importante evaluar la reacción de un consumidor al ingresar a una tienda departamental tipo boutique con un luminario eficiente y determinar los parámetros de color interior para crear una reacción que provoque la atracción del sujeto hacia un producto.

Se ha mencionado el problema de la iluminación artificial en el ámbito técnico, pero si enfocamos el problema de iluminación en la percepción del usuario en cuanto al diseño interior de una tienda departamental, nos encontramos que la luz se utiliza como un instrumento de venta en *retail* donde se ha comprobado el incremento de compras de consumidores. Además se observa el rol emocional de la luz y la manera en que afecta desde el ojo al cerebro. De esta manera, la luz puede influir en los negocios de tiendas comerciales ya sea resaltando un producto de acuerdo a la temperatura de color y genera la atracción del sujeto hacia un artículo. Según los comercializadores, la clave está en el ambiente de una tienda y en la presentación del producto. Esto es, enriquecer la identidad de la marca. La luz es capaz de simular el cambio de estaciones, remarcar colores, revelar texturas y formas (Philips, 2012).

En la Universidad de Liverpool, se han realizado análisis de costos y beneficios en edificios de oficinas, usando los sistemas de guía de luz (SGLN) y el TLNA (ELS) (Mayhoub & Carter, 2011). De primera instancia, en el estudio se realizan mediciones de costo-beneficio y posteriormente se mencionan los beneficios en el ahorro de cargas eléctricas en aire acondicionado, emisiones de carbono e incremento en la producción del personal.

Se eligieron dos latitudes en Europa, Londres y Valencia, donde se usaron sistemas activos y pasivos disponibles que se eligieron para iluminar oficinas. En este sentido, los investigadores mencionan que la iluminación eléctrica es la instalación que consume mayor cantidad de energía en los edificios de oficinas. Al parecer, en el año 2010, el TLNA tenía potencial de aplicación en el mercado de oficinas. Se puede asociar el estudio en el que se basaron los investigadores británicos, ya que utilizaron un módulo de estudio de 6 m x 12 x 3m, similar al utilizado en los locales de los centros comerciales. Asimismo, operan en un horario similar de 10 horas.

Como conclusión, en el artículo se menciona que los beneficios en el ahorro eléctrico en iluminación dependen de la latitud donde se coloque un TLNA. Cabe mencionar la importancia del estudio en la aplicación de un TLNA en la Ciudad de México para determinar los beneficios ambientales y económicos en dicha latitud.

Con base a las pruebas realizadas en otras universidades europeas, revisión de documentos de investigación que han llevado a cabo experimentos con conductores de luz natural, y el interés del funcionamiento de los TLNA en la Ciudad de México, el planteamiento de la metodología se representa en el siguiente esquema:

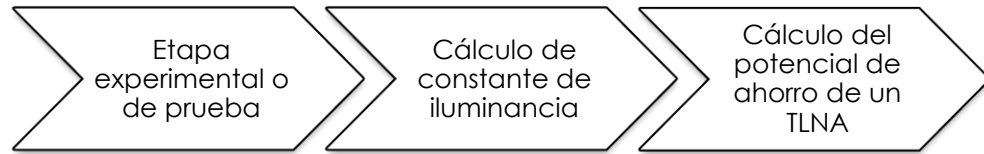


Fig. 2. Esquema de la metodología seguida. Elaborado por la autora de esta tesis

1. Esta etapa consiste en las pruebas lumínicas del TLNA y consistió en lo siguiente:

En la bodega ubicada en el tercer nivel del edificio H de la Unidad de Posgrado de la UNAM, se instaló el rastreador de luz con el fin de realizar las mediciones exteriores e interiores. Para obtener datos de irradiancia global y difusa se colocaron dos piranómetros, y para realizar la medición de iluminancia global horizontal y difusa se colocaron dos fotómetros en la mesa de observación

- a) En paralelo se realizan las mediciones en el interior del módulo colocando 12 fotómetros, 1 a cada 73 cm a lo ancho de la bodega y a 70 cm a lo largo de la bodega. A 70 cm de altura del nivel de piso terminado.
 - b) Las mediciones son capturadas a través de una computadora conectada un adquisidor de datos y se realizan las comparaciones de iluminancia exterior e interior a través de gráficas.
2. Se calcula la constante de iluminancia interior con el objetivo de simular el comportamiento del TLNA a lo largo de ocho meses.
 3. Se calcula el potencial de ahorro de un TLNA en la Ciudad de México con cielo despejado.

La hipótesis de esta investigación se plantea es:

Mediante el TLNA, se podrán lograr los niveles de iluminación interior haciendo un uso eficiente de energía, de acuerdo a los parámetros lumínicos requeridos en un local comercial logrando su función como estrategia de mercadotecnia para el consumo de un producto.

El objetivo general es:

Analizar el comportamiento lumínico del TLNA con el fin de establecer estrategias de diseño para la venta de productos obteniendo el uso eficiente de energía y ahorro energético.

Objetivos Particulares:

- Evaluar el confort visual con el fin de cumplir con los niveles de iluminación que se requieren en una tienda departamental.
- Evaluar el ahorro energético del TLNA con respecto a un sistema de iluminación convencional.

1. ANTECEDENTES

Esta investigación surge a partir de estudios realizados previamente en la Universidad de Liverpool, Reino Unido en cuanto a la experimentación técnica, la cual consistió en la obtención de datos de iluminancia exterior e interior de los diferentes sistemas de rastreo y captadores solares para la transmisión luz natural con el objetivo de iluminar espacios remotos. Asimismo, se mencionan algunas pruebas de senso-percepción realizadas en las universidades de Miami, Estado de Oklahoma y Mississippi para determinar la reacción fisiológica del ser humano bajo los efectos de la luz y el color.

1.1 Universidad de Liverpool, Reino Unido

Se han realizado pruebas con diferentes sistemas de iluminación híbrida, el objetivo es verificar el porcentaje de ahorro eléctrico en edificios de oficinas y determinar el sistema más eficiente en diferentes latitudes de Europa y Medio Oriente (Mayhoub & Carter, 2011). Hasta la fecha no se ha probado TLNA alguno en la latitud de la Ciudad de México por lo que es importante analizar los procesos de prueba anteriores para aplicarlo de manera similar en esta investigación.

El Dr. Mohammed Mayroub y Dr. David Carter, investigadores de la Universidad de Liverpool, Reino Unido, consultaron los valores de irradiancia directa e irradiancia global horizontal promedio por ubicación geográfica de 26 ciudades.

El estudio consistió en obtener el diseño con una iluminancia promedio de 300 luxes en plano de trabajo horizontal a 0.80 metros del suelo. Se probaron cuatro sistemas de iluminación pasiva y activa. El sistema activo en una superficie de 20 a 30 m². Se colocó un colector solar (HLS) el cual suministraba luz a ocho luminarias en cables de fibra óptica de 7 metros de longitud. Los investigadores colocaron cuatro rastreadores Parans (TLNA) para suministrar ocho luminarias en 3 metros de cables de fibra óptica.

El plano de iluminancia interior fue calculado mediante el método de lumen cada 10 minutos para cada ubicación y para cada sistema de iluminación.

Según Mayhoub y Carter, mientras la luz natural proporcione un nivel de iluminación de 300 luxes, no es necesario el uso de la luz eléctrica, ya que permite la realización de tareas. Sin embargo, si el promedio del nivel está por debajo de los luxes mencionados, la iluminación eléctrica es controlada por sensores y un sistema de dimeo constante para alcanzar la iluminación requerida. La carga eléctrica se calculó cada 10 minutos y al final se sumó el consumo anual. Este dato se comparó con el consumo anual para el 100% de la iluminación eléctrica para estimar el ahorro eléctrico. Asimismo en el experimento se utilizaron lámparas T5 x 14 W de 600 mm como apoyo.

Los investigadores determinaron la relación entre la iluminancia normal directa (DN) y la iluminancia global Horizontal (GH) en las diferentes zonas climáticas. Las zonas tropicales y áridas tuvieron los valores más altos con un promedio de 61 kluxes (1 klux = 1000 lux), seguida por las regiones de clima templado con un promedio de 44 klux y la región fría con una iluminancia de 32 klux. En cuanto a la iluminancia directa se obtuvieron los siguientes resultados: la región árida y tropical con 54 klux, las regiones templada con 48.37 klux y las regiones frías con promedios de 26 klux.

Asimismo, los investigadores MS Mayhoub y DJ Carter han estudiado a fondo el TLNA (sistema activo) y el TLNP (sistema pasivo). El experimento consistió en la comparación de la emisión del flujo luminoso, la intensidad luminosa y la iluminancia de los HLS (Hybrid Lighting System) y TDGS (Tubular Daylight Lighting System). El HLS que se investigó consistió en un dispositivo de luz natural que fue objeto de

mediciones junto con lámparas eléctricas para obtener los cálculos del consumo energético.

El colector TLNA fue instalado en la azotea de la Universidad de Liverpool, Facultad de Arquitectura, Liverpool, Reino Unido (53°25'N, 3°0' W) 14 metros arriba del nivel de piso terminado orientado hacia el sur con un ángulo aproximado de 35° de la horizontal. Esto permitió que se rastreara la trayectoria vertical solar, y se colocó un cono a 120° para la trayectoria horizontal solar entre los 120° y 240° al norte.

Los difusores híbridos se colocaron en un cuarto de dimensiones aproximadamente 3m x 1.8m x 2.2 m. El espacio contaba con una alfombra gris oscuro con tres muros y un plafón pintado de negro mate. La conexión entre el colector y la luminaria fue con cables de fibra óptica de 20 metros de largo. De igual manera se utilizó un goniómetro el cual fue instalado debajo de la luminaria para medir la intensidad luminosa en el plano vertical.

Se realizaron las mediciones desde Marzo a Agosto de 2010, durante todo el periodo se tomaron lecturas cada diez minutos de iluminancia global horizontal e iluminancia interna a dos metros debajo del centro de la luminaria.

Los resultados del experimento demostraron que bajo condiciones de cielo nublado dando una iluminancia de 35 klux generan valores internos alrededor de los 200 lux. El sistema trabaja de manera eficiente bajo condiciones de cielo despejado y bajo la luz directa, de lo contrario la intensidad luminosa no pudo ser concentrada. Bajo condiciones de cielo parcial nublado, la iluminancia lograda depende de los grados en los que el sol se oculta.

Asimismo, se calcula el flujo luminoso emitido por la luminaria L1 (difusor de luz natural) y se relaciona con la iluminancia externa de 45 klux. La iluminancia pico interior es de 390 lux desde el centro de la luminaria a 305 lux, la iluminancia decrece a 50 cm desde el centro de la luminaria y llega a un valor mediocre al llegar a los 2 metros sobre el plano de medición. Por lo que se requiere una luminaria secundaria para mantener un nivel de iluminación adecuado (Mayhoub & Carter, 2011).

En el experimento son comparados los sistemas activos y pasivos en el cual se calcula el factor de penetración de luz el cual consiste en la relación de la iluminancia externa y la iluminancia interna. Asimismo, se calculan otras variables que describen la relación entre la longitud del cable de fibra óptica con la transmitancia y con el flujo luminoso. En este sentido, el factor de penetración de luz se va perdiendo conforme aumenta la longitud del cable.

1.2 Universidad de Uppsala, Suecia

Se realiza el análisis del comportamiento de un sistema activo SP3 (mismo modelo de esta investigación) en la azotea del laboratorio Angstrom donde se colocaron seis luminarias del sistema SP3 en un salón de estudio con una altura de 2.50 m con

acabados interiores color blanco grisáceo con apoyo de iluminación artificial e iluminación natural proporcionada por ventanas de cristal en el sitio.

En la investigación se midió la iluminancia exterior y la interior, esta última variable en un plano de 0.85 m de altura desde el nivel de piso terminado. Asimismo se realizan las simulaciones calculadas en el programa Dialux-Cad con la importación del difusor de acuerdo a los parámetros del proveedor, las cuales son comparadas con las mediciones reales obtenidas en el experimento. Las variables calculadas fueron: iluminancia exterior e iluminancia interior, temperatura de color e índice de rendimiento de color.

Posteriormente se obtiene un nivel mayor a 300 luxes en el interior durante un día soleado y se calcula una eficacia mayor a la de una lámpara fluorescente o LED convencional con cables de fibra óptica con una longitud de 10 y 20 m. De igual manera se establece que un sistema solar de iluminación proporciona un espectro de luz más amplio que el espectro de una lámpara fluorescente. Finalmente se calcula el ahorro energético evaluando las horas en las que la luz natural sustituye la iluminación artificial durante un día de estudio en el laboratorio utilizando un SP3.

1.3 Universidad Nacional Autónoma de México

En el estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México se realiza el estudio del comportamiento lumínico de un sistema pasivo llamado pipa de luz o solatube.

Durante el experimento se realizan mediciones exteriores donde se obtienen datos de radiación solar e iluminancia, después se realizan mediciones de transmisión de luz natural donde se aplican tres acabados diferentes en un ducto de 1.20 m. En seguida, se realizan mediciones de los niveles de iluminación en un plano de trabajo de 0.70 m. Posteriormente se miden dos longitudes del ducto a 1.20m y 4.20m en ángulos de captación de 0° y 45°. Finalmente se realiza el cálculo de ahorro energético de varias lámparas fluorescentes y LED en comparación con el uso del ducto de luz natural en el sitio de estudio.

El experimento se realiza en un edificio del centro histórico de la Ciudad de México donde los datos obtenidos en el observatorio del sitio son cotejados con las mediciones del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Cabe mencionar que los resultados de cada uno de los experimentos antes citados, serán comparados con los resultados de esta investigación en el capítulo 10.

1.4 Pruebas de luz y senso-percepción

A partir de 1960 la psicología ambiental tuvo validez científica debido al crecimiento exponencial de la población, la industrialización, los movimientos ecologistas, la *ambientalización* de la psicología y la reconstrucción de Francia, Inglaterra y Alemania debido a la Postguerra. Se comienza a estudiar al ser humano y su comportamiento en el entorno.

Con base a investigaciones realizadas en años y décadas anteriores, se establece el planteamiento de la prueba de la fase de percepción. No sin antes mencionar algunas de los experimentos realizados con luz y color en distintas universidades del mundo.

En la Universidad del Sur de Mississippi junto con la Universidad de Miami y la Universidad del Estado de Oklahoma, se realiza un experimento con consumidores para ver la reacción ante los colores naranja contra azul, luces brillantes contra suaves y un precio de 60 contra 150 dólares. De esta manera utilizamos 2x2x2 variables en la prueba (Babin, 2003). De esta manera se diseñan escenarios reales para que los sujetos respondan a representaciones cognitivas. Esto induce a concluir si los efectos del color son psicológicas o fisiológicas. Los resultados que se obtuvieron fueron que el color azul siempre resulta un color seguro pero podría producir algunas reacciones negativas a la hora de comprar. Mientras que el naranja tiende a crear efectos positivos en el consumidor. Sin embargo el sujeto tiende a reaccionar en un ambiente holístico.

En la Universidad de Turquía en el año 2011, se realiza el estudio para la investigación de los efectos del color y la luz para un sistema de orientación en un espacio cerrado. En la prueba se utilizan las variables del color, brillo y temperatura del color en un ambiente virtual. 102 alumnos universitarios evaluaron las variables de luz y color donde se usaron los conceptos de claro-borroso, atractivo-no atractivo, transitable-no transitable e sociópeta-siciófugo. El lugar más atractivo resultó ser el espacio con colores cálidos, mientras que las calificaciones medianas se relacionaban con el color de la temperatura alto. Las mujeres prefieren altos niveles de brillantez y el uso de colores cálidos y fríos en ambientes cerrados con bajos niveles de iluminación, (Hidayetoglu, Yildirim & Akalin, 2011).

Igor Knez, ha diseñado varios experimentos donde estudia la influencia del color de la luz en el estado de ánimo y el comportamiento cognitivo de las personas. Utilizó dos variables independientes 3c (relacionadas con temperatura de color 3000 K, 4000 K, 5500 K) X 2 (género). Se colocan dos luxómetros para la medición durante semanas antes del experimento y se observa el comportamiento de hombres y mujeres. Las variables dependientes son su estado de ánimo, capacidad para resolver un problema, actitud hacia el trabajo, medición de una evaluación que se les pidió que realizaran.

Las combinaciones de la ambientación de un espacio, ya sea en la iluminación, música, olores, afectan la manera de gastar de un consumidor. La calidad emocional del ambiente en una tienda departamental es importante. (Gifford, R. 2007). La calidad y el nivel de iluminación han influido en el comportamiento del consumidor, se han realizado investigaciones que demuestran que una luz brillante incita al consumidor a acercarse al producto, tomarlo y observarlo a diferencia de la luz tenue (Seigman, C. & Daile , J.M., 1977).

2. LUZ NATURAL

La luz es un fenómeno natural que sirve como medio entre un objeto y un sujeto. En la arquitectura nos es útil para realizar tareas cotidianas y para percibir y recorrer un espacio. Cuando hablamos de iluminación nos referimos al conjunto de luces que conforman un espacio interior o exterior. En este capítulo se describe la luz como varios tipos de fenómenos, desde un fenómeno natural, es decir, cómo es que llega desde el sol a la tierra y la descripción de la luz desde la perspectiva del ojo humano, esto es, como un proceso fisiológico.

La luz natural es un recurso proveniente del sol que debe ser aprovechado para el uso eficiente de energía eléctrica. En la arquitectura utilizamos la luz natural para el diseño de espacios con el objetivo de proveer al usuario un nivel de confort y seguridad para realizar diferentes tareas.

De acuerdo con la Sociedad de Ingenieros en Iluminación de Norteamérica (IESNA) la definición de luz es “la energía radiante que es capaz de excitar a la retina humana y crear una sensación visual” (IESNA,2000). Oem es un campo eléctrico y un campo magnético de formas sinusoidales y perpendiculares.

Para entender la luz natural como fenómeno físico, se deben puntualizar los factores que influyen en ella así como la comprensión de los conceptos que la componen y su efecto en los objetos. Como primera instancia, existen tres componentes que establecen la forma en la cual se explica la energía que proviene del sol.

Condiciones del cielo	Coefficiente de extinción atmosférica	de iluminancia al amanecer y al atardecer	al Coeficiente de la iluminancia en la altitud solar	Exponente de la iluminancia en la altitud solar
	c	A	B	C
cielo despejado	0.21	0.80	15.50	0.50
cielo parcialmente nublado	0.80	0.30	45.00	1.00
cielo nublado	0.00	0.30	21.00	1.00

Tabla 1. Constantes de la Disponibilidad de la luz. (IESNA, 2000).

La luz directa que consiste en la luz visible que llega directamente a la Tierra desde la radiación solar. Su variación y dirección depende de la posición solar. La luz difusa es aquella que refleja la bóveda celeste la cual se descompone en la atmósfera y reflexión de las nubes.

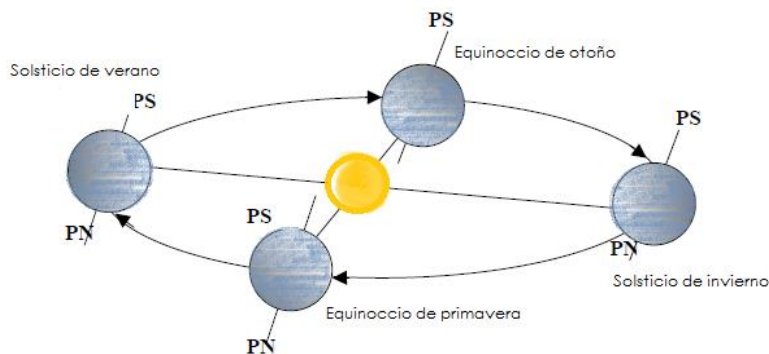


Fig.3. Movimiento solar. (O'Donell, 2002)

La luz solar indirecta es la que llega por reflexión a través de la superficie del contexto o del interior de los espacios.

La radiación solar directa es aquella que proviene directamente del sol, la radiación solar difusa es el flujo de radiación solar esparcido por las nubes y los componentes de la atmósfera. La suma de las dos radiaciones se le llama radiación solar global.

Asimismo, la luz del sol que atraviesa la atmósfera es esparcida por polvo, vapor de agua y otras partículas suspendidas y este esparcimiento junto con las nubes, produce una luminancia del cielo. Según la IESNA, existen tres categorías de cielo: despejado, parcialmente nublado y nublado.

2.1 Cielo nublado

El cielo nublado es aquel que se encuentra cubierto por nubes a un 80%. También conocido como "cielo CIE" ya que fue adoptado por la Comisión Internacional de Iluminación como cielo estándar para el cálculo y diseño de la iluminación natural. Se define como el cielo que no tiene distribución de la brillantez y se incrementa hacia el cenit en una razón aproximada de 1:3.

2.2 Cielo despejado

La bóveda celeste se encuentra cubierto por nubes a un máximo del 30% de su totalidad. En un cielo despejado, se tienen dos componentes, uno que surge de forma directa del sol y el segundo, que surge de la dispersión de los rayos solares.

2.3 Cielo parcialmente nublado

Es aquel que está cubierto de nubes de un 30% a un 80% de la bóveda celeste.

Para probar el prototipo Parans, se tomarán en cuenta los siguientes términos que serán la base para la experimentación en la captación de los rayos del sol. Esta fase determina la base del funcionamiento del sistema.

La irradiancia solar extraatmosférica es la cantidad de energía radiante que incide en una superficie perpendicular a los rayos solares por unidad de área (1m²) en una unidad de tiempo (1seg) a una distancia media tierra-sol fuera de la atmósfera terrestre (Zeevaert, 84).

El sol provee una iluminancia constante en un punto sobre una superficie. La constante solar de la iluminancia es el total de la iluminancia solar con incidencia normal sobre una superficie en el espacio a la distancia media Tierra-Sol. (Guadarrama, 2011).

2.4 Iluminancia directa del Sol

La iluminancia la densidad de flujo luminoso que proviene directamente del sol que incide sobre una superficie. Según la IESNA se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$E_{dn}=E_{xt} e^{-cm}$$

Donde:

E_{dn} es la iluminancia directa al nivel del mar en klx

E_{xt} , es la iluminancia solar extraterrestre en klux

c , es el coeficiente de extinción atmosférica

m , es la masa de aire óptica.

2.5 Iluminancia difusa

La iluminancia horizontal producida por el cielo, según la IESNA, es expresada con la siguiente función:

$$E_{kh}=A+B \text{ Sen}(\alpha_t) \hat{C}$$

Donde:

E_{kh} , es la iluminancia horizontal producida por el cielo en klx

A , es la iluminancia al amanecer y al atardecer en klx

B , es el coeficiente de la iluminancia con altitud solar en klx

C , es el exponente de la iluminancia con altitud solar en klx

3. LUZ ARTIFICIAL

Las fuentes de luz artificial han evolucionado a lo largo de la historia, recordemos la bombilla inventada por Thomas Alba Edison. Durante el siglo XX fueron evolucionando los artefactos para proveer luz artificial con el nacimiento de la lámpara incandescente y halógena, la lámpara fluorescente tubular, todas ellas surgieron en la década de los 30's. Continúa su evolución hasta llegar a las lámparas fluorescentes compactas con balastro, y la invención de los LEDs (Diodos emisores de luz), en la década de los 70's. En este capítulo se describe el funcionamiento de las fuentes de luz convencionales y el TLNA con el objetivo de conocer las diferencias entre ambos sistemas.

Debido a que el objetivo de esta investigación es poner a prueba el TLNA y compararlo con un sistema de iluminación convencional de acuerdo al diseño del caso de estudio el cual consiste en una zapatería ubicado en un centro comercial de la Ciudad de México, a continuación se expone de manera general las características y propiedades de las lámparas convencionales.

3.1 Temperatura de color

Es el *color de una fuente luminosa por comparación con el que produce el cuerpo negro a esa misma temperatura*. Es el color que representa, su unidad es el grado Kelvin (°K) (IES Mexico, 2013).

La temperatura de color de una fuente luminosa puede tener efectos psicológicos o psicosomáticos sobre las personas en función de las actividades que desarrollen bajo su iluminación. (IES Mexico, 2013).

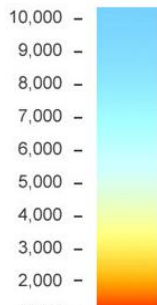


Fig. 4. Escala de temperatura de color en grados Kelvin

Color de la luz	Temperatura de color	Ambiente producido
Blanco rojizo	<3,300 °K	Cálido
Blanco	3,300 a 5,000 °K	Neutro
Blanco azulado	>5,000 °K	Frío

Tabla 2. Relación entre la temperatura de color y el ambiente. (Muñoz, 1994).

3.2 Índice de rendimiento de color

El rendimiento en color de las lámparas se define como *la capacidad discriminadora de colores, según el tipo de radiación luminosa de las diferentes lámparas*. Se mide en porcentaje donde el índice 100 cuando la lámpara tienen idénticas características cromáticas que la patrón o de referencia. El luminario con IRC 100 muestra los colores como los ilumina los rayos del sol.

En la figura 5 se muestra la diferencia cromática de acuerdo al porcentaje de IRC en una luminaria, podemos observar que entre menor sea el porcentaje menor será la discriminación cromática. En cambio el 100% representa la discriminación adecuada para distinguir un objeto.

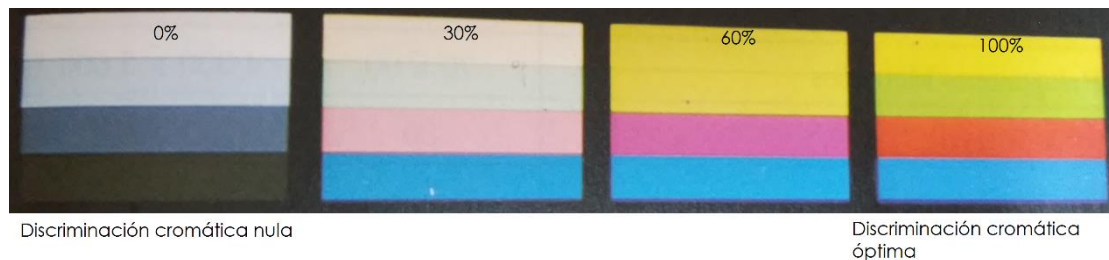


Fig. 5. Diferencias cromáticas según el Índice de Rendimiento de Color. Muñoz, 1994).

3.3 Lámparas fluorescentes

Es una lámpara de descarga en vapor de mercurio a baja presión, donde se produce una radiación ultravioleta y activa polvos fluorescentes, que transforman la radiación en luz visible. Sus componentes son: tubo, cebador y balastro. Los balastros electrónicos poseen varias ventajas ya que pueden ahorrar hasta un 30% de energía y pueden proveer un mayor rendimiento lumínico. (Martín, 2007).

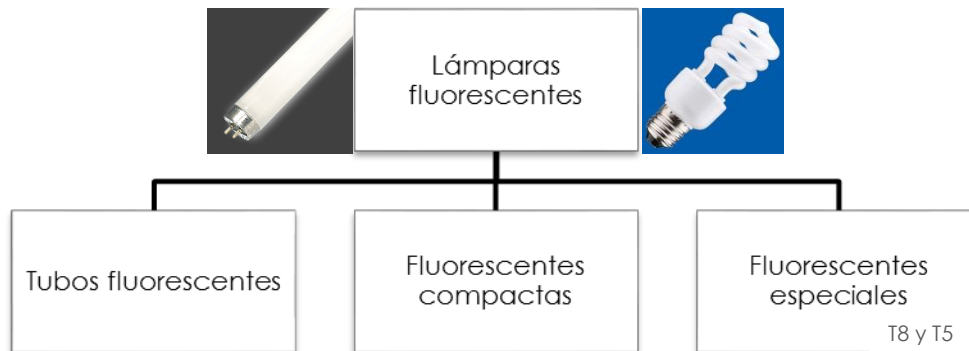


Fig. 6 Esquema de tipos de lámparas fluorescentes

Características:³

- Rendimiento lumínico de 95 a 105 lm/W
- Reproducción cromática entre 20 y 95
- Luminancia baja
- Temperatura de color entre 2700 a 7200 °K
- Vida útil larga de 4,000 a 20,000 horas
- Bajo consumo energético
- Flujo luminoso casi constante

3.4 Balastros

Un balastro es un dispositivo utilizado para arrancar y operar una lámpara fluorescente proporcionando el voltaje de arranque necesario para establecer un arco entre dos electrodos de la misma y regular la corriente eléctrica de acuerdo a especificaciones. En los circuitos de arranque rápido suministra una cantidad de energía eléctrica para mantener calientes los cátodos mientras espera la lámpara (Guevara, 2001).

Los balastros se dividen en balastro electromagnético y balastro electrónico. El primero consiste en un núcleo de láminas de acero rodeadas por dos bobinas de cobre o aluminio. La composición transforma la potencia eléctrica en una forma para arrancar y regular la corriente en la lámpara fluorescente. Asimismo los

³ Las características de las lámparas que se muestran son generales y pueden variar según el fabricante.

balastos electromagnéticos se encuentran conformados por un componente principal llamado capacitor el cual optimiza el factor potencia, de tal forma que puede utilizar la energía de manera más eficiente.

El *balastro electrónico* se basa en una tecnología diferente a la del balastro electromagnético. Enciende y regula las lámparas fluorescentes en altas frecuencias, generalmente mayores a 20 KHz, utilizando componentes electrónicos en vez del tradicional transformador. Una de las ventajas con respecto a los balastos electromagnéticos tradicionales, es la eliminación del parpadeo de la lámpara en el encendido, el zumbido, la habilidad para ajustar la salida de luz de la lámpara a cualquier nivel cuando se utiliza un control de intensidad luminosa.

3.5 Lámparas halógenas

Las lámparas incandescentes halógenas de tungsteno, tienen un funcionamiento similar al de las lámparas incandescentes normales, salvo que el halógeno incorporado en la ampolla ayuda a conservar el filamento. Aumenta así la vida útil de la lámpara, mejora su eficiencia luminosa, reduce tamaño, mayor temperatura de color y poca o ninguna depreciación luminosa en el tiempo, manteniendo una reproducción del color excelente.

Las lámparas halógenas consiguen una regeneración del filamento, así aumenta la vida de la lámpara y al mismo tiempo incrementa el flujo de la lámpara. Se introduce un halógeno en el interior de la ampolla de yodo, bromo o flúor. Asimismo una lámpara halógena se compone de una ampolla de cristal que encierra uno o más filamentos de tungsteno, en una atmósfera de gas halógeno (Martín, 2007).

Características:⁴

Apariencia de color: blanco

temperatura de color: 2400 a 3200 °K

Reproducción cromática de 100

vida útil: 1000-a 2000 hs

Rendimiento lumínico entre 20 y 30 lm/W

Alto consumo energético

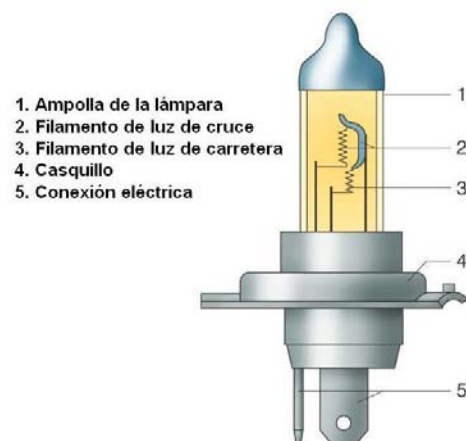


Fig. 7. Esquema de tipos de lámparas halógenas. Todos los derechos reservados por: <http://investigación-reconstrucciontrafico.blogspot.mx/2012/2011/examen-de-lamparas-en-accidentes-de.html>

⁴ Las características de las lámparas que se muestran son generales y pueden variar según el fabricante.

3.6 Diodo Emisor de Luz (LED)

En el año de 1962, se desarrolla el primer diodo LED que emitía en el espectro visible. Éste se caracterizaba por tener un color rojo y se formaba bajo la combinación de Galio, Arsénico y Fósforo. Posteriormente, en la década de los 90's se logró la gama desde el rojo al amarillo, y fue hasta finales de los 90's cuando se desarrolló el LED azul. En el 2001 se comercializan los diodos para potencias de 5W con un eficiencia de 60lm/W.

Asimismo, los LEDs han sido hasta la fecha los más eficientes en cuanto al consumo de energía. En esta investigación se comparará la tecnología LED con el TLNA, razón por la cual se mencionan las características de la iluminación LED (Zamora, 2008).

Un LED se encuentra formado por los siguientes componentes:

El lente epóxico es un lente que mantiene todo el paquete estructurado, determina el haz de luz, protege un chip reflector y extrae el flujo luminoso.

Cable conductor. Es un cable muy delgado de oro, el cual conecta cada terminal a cada uno de los postes conductores.

Chip. Consiste en dos capas de material emisor semiconductor, cuando los átomos son excitados por un flujo de corriente e intercambia electrones, creando de esta manera la luz.

Reflector. Se encuentra debajo del chip reflejado y emite la luz.

Cátodo. Es un poste compuesto por una aleación de cobre el cual conduce cargas negativas.

Ánodo. Es un poste compuesto por una aleación de cobre el cual conduce cargas positivas.

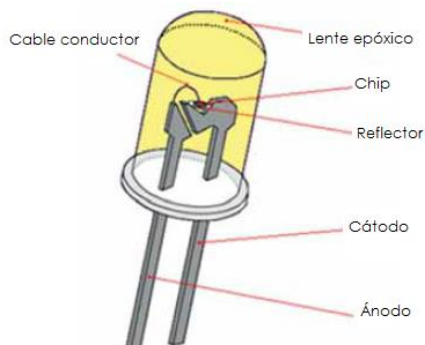


Fig. 8 Componentes del LED. Partes de un led ©Todos los derechos reservados por planetatuning.blogspot.mx obtenido de <http://planetatuning.blogspot.mx>

4. LUZ Y PERCEPCIÓN

A continuación se explican los conceptos relacionados con la luz el color y la percepción. Asimismo se explica el efecto fisiológico que provoca la luz en sus diferentes niveles de iluminación junto con los contrastes y colores de un ambiente.

El ser humano está conformado por numerosos órganos los cuales son responsables del buen funcionamiento del cuerpo. A su vez, algunos de estos órganos nos hacen percibir el medio exterior para captarlo en el interior del cuerpo humano a través de los sentidos externos: la vista, el oído, el tacto, el gusto y el olfato.

Para que exista una interacción del medio externo se necesitan tres factores: el sujeto, el objeto y el medio de conexión, este medio de conexión se manifiesta mediante las radiaciones emitidas por la luz.

Las fuentes de luz emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. La radiación se cuantifica con las magnitudes radiométricas. Y para cuantificar la radiación sensible al ojo humano, las **magnitudes radiométricas** se transforman en **magnitudes fotométricas** (O'Donell, 2002).

El proceso de la visión inicia cuando la luz es absorbida por los fotorreceptores del sistema visual del humano y comprende los 380 nm y 760 nm (un nanómetro equivale a 10^{-9} m) de longitud de onda.

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE: Commission Internationale de l'Eclairage) canalizó las magnitudes fotométricas en la iluminación ya que existen diferencias individuales y la dependencia que existe en la curva de sensibilidad espectral de las condiciones experimentales. Esta dependencia resulta de la longitud de onda que produce el efecto visual de la radiación. En 1970 y 1978 la CIE adopta dos curvas de sensibilidad espectral relativa: la fotópica, cuando se tienen niveles de iluminación altos y donde el órgano humano que opera son los conos, obteniendo una máxima sensibilidad de 555 nm en el ojo humano; y la escotópica, cuando se tienen niveles de iluminación bajos y donde el órgano que funciona con los bastones, cuyo rango máximo pasa a ser de 507 nm.

El **flujo radiante** es la medida fundamental de la radiación electromagnética, o sea, la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo y su unidad es el watt (W). El flujo luminoso es la magnitud fotométrica derivada y se usa para medir el efecto de la luz.

El **flujo luminoso** es la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en todas direcciones. La **intensidad luminosa** cuantifica el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica. A su vez, se deriva la intensidad de Radiación de la magnitud radiométrica. La unidad de medida de la intensidad luminosa es la candela la cual equivale a un lumen/estereorradián., ésta describe la intensidad luminosa de una lámpara o luminaria.

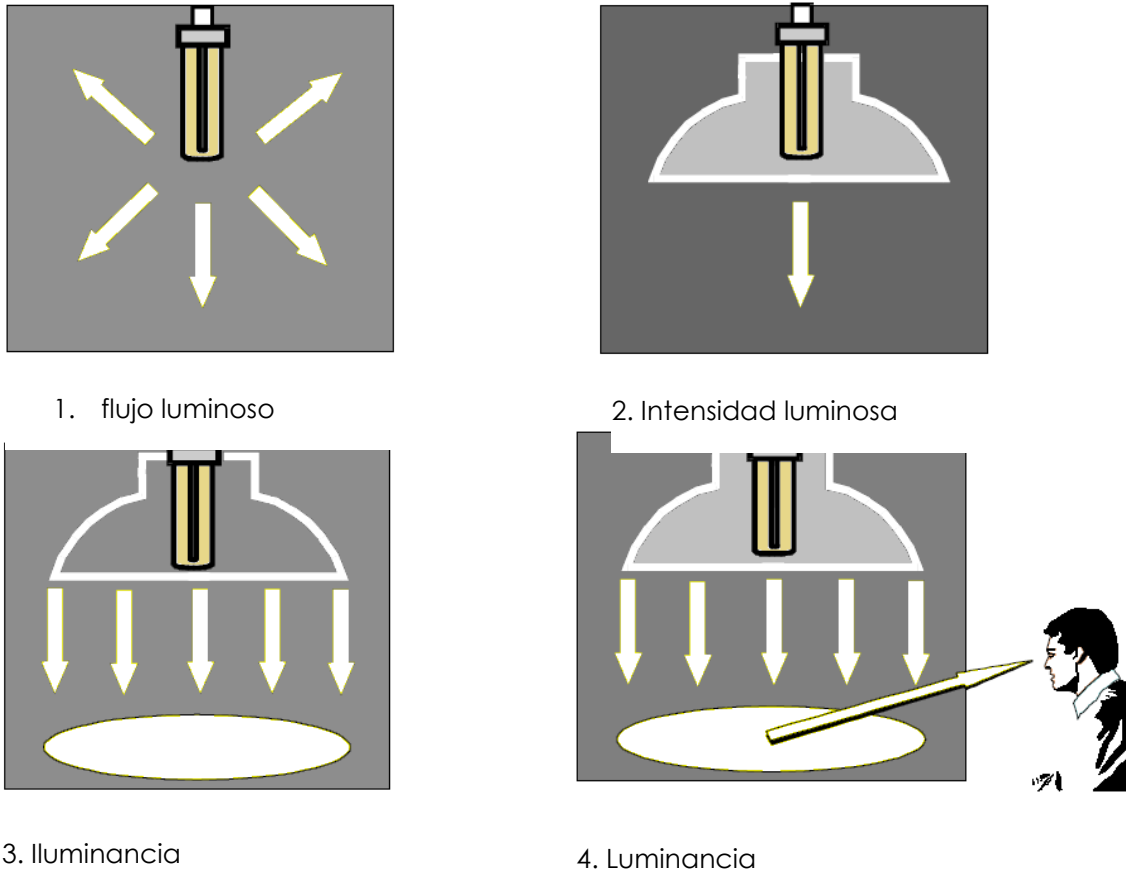


Fig.9. Conceptos de flujo luminoso, intensidad luminosa, iluminancia y luminancia (O'Donell, 2002).

La iluminancia se deriva de la **irradiancia** y consiste en el flujo luminoso que incide por unidad de área en una superficie y su unidad de medida es el lux ($lx = lm/m^2$).

Cuando se mide la iluminancia sobre el plano de trabajo (iluminancia horizontal), se fija una altura de 0.85. Cuando se necesita medir la iluminancia sobre paredes se le conoce como iluminancia vertical. La iluminancia sigue la función:

$$E = I/d^2$$

Donde:

d , es la distancia de la fuente luminosa a la superficie a la que llega el flujo luminoso y la superficie es perpendicular a la dirección de propagación de la radiación incidente.

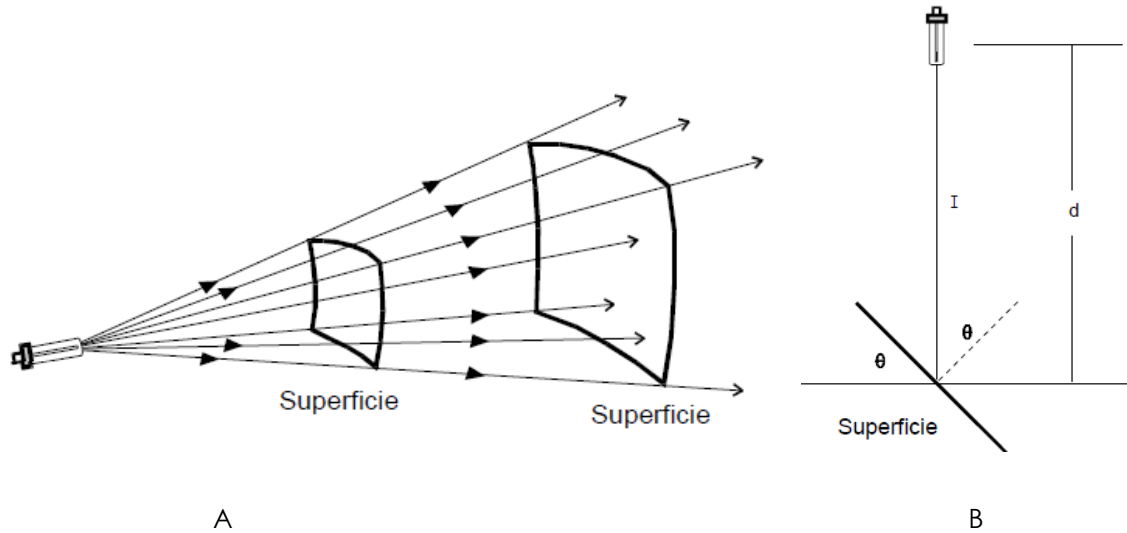


Fig.10. Cálculo de iluminancia a) una superficie perpendicular a la dirección de intensidad y b) una superficie que forma un ángulo θ con la dirección de la intensidad (O'Donell, 2002).

Cuando la superficie no es perpendicular a la dirección de la distribución del flujo luminoso, la ecuación es la siguiente:

$$E = (I/d^2) \cos\theta$$

Donde: θ es el ángulo de inclinación de la superficie.

La sensibilidad es un factor asociado a los niveles de iluminación.

El ojo humano se puede describir como una esfera de 12 mm de radio (Aguilar & Blanca, 1995). La retina tiene como función formar imágenes. En realidad los objetos que vemos son reflejados en este órgano el cual almacena la imagen y la retiene en la memoria. En la retina se encuentran las células de la visión llamadas bastones y los conos los cuales son llamadas fotorreceptores, receptores o sensores visuales.

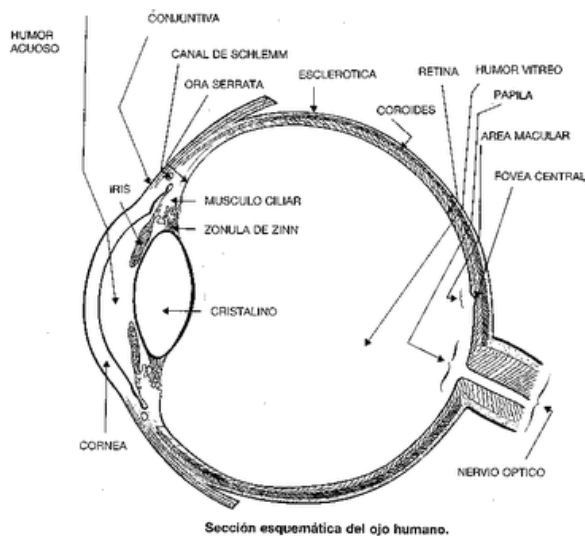


Fig. 11. (Sección del ojo. O'Donell, 2002)

Los bastones actúan en niveles bajos de iluminación provocando que la pupila se dilate para poder lograr una visión en la oscuridad, también es llamada visión escotópica.

Asimismo los bastones son sensibles a la banda espectral entre el azul y el naranja.

Los conos son las células que detectan los niveles más altos de iluminación, color y contraste. Los conos contienen tres tipos de moléculas fotosensibles, llamadas

iodopsinas y se dividen de acuerdo a su sensibilidad a la luz roja, azul o verde. Éstos son más sensibles a la luz verde amarillenta, o sea cuando el nivel de iluminación es alto.

La capacidad de respuesta del ojo humano la representa una curva fotométrica dependiendo de la sensibilidad espectral. La visión fotópica es más sensible a la longitud de 550 nm que corresponden al color verde y amarillo y menos sensible a longitudes de 380 nm-415 nm violeta y 650 nm-780 nm (naranja-rojo).

Los tres atributos del color son el tono, la saturación y la claridad. El tono se asocia con el color predominante, la saturación es la pureza del color que determina el tono y la claridad es la cantidad de luz de un objeto puesto al sol o a la sombra y es una magnitud perceptual.

4.1 Color

En realidad, el color no es una propiedad de los cuerpos, sino que es una propiedad de la luz. Cuando se genera el proceso de visión, participan tres componentes: la fuente de luz, el ojo y el cerebro (Martín, 2007). La luz estimula la retina y provoca reacciones en el sistema nervioso, los cuales comunican al cerebro sensaciones cromáticas llamados *colores*.

4.2 Propiedades del color

El tono: Es el matiz del color, es decir el color en sí mismo, supone su cualidad cromática, es simplemente un sinónimo de color. Es la cualidad que define la mezcla de un color con blanco y negro. Está relacionado con la longitud de onda de su radiación. Según su tonalidad se puede decir que un color es rojo, amarillo, verde... Aquí podemos hacer una división entre: tonos cálidos (rojo, amarillo y anaranjados). Aquellos que asociamos con la luz solar, el fuego y tonos fríos (azul y verde). Los colores fríos son aquellos que asociamos con el agua y el cielo. (Bernicaló, 2013)

Los términos "cálido" y "frío" se utilizan para calificar a aquellos tonos que connotan dichas cualidades éstos términos se designan por lo que denominamos "temperatura de color". Las diferencias entre los colores cálidos y los fríos pueden ser muy sutiles. Por ejemplo, el papel blanco puede parecer más cálido o más frío por una leve presencia de rojo o azul. Lo mismo ocurre con el gris y el negro. (Bernicaló, 2013)

La brillantez: Tiene que ver con la intensidad o el nivel de energía. Es la luminosidad de un color (la capacidad de reflejar el blanco), es decir, el brillo. Alude a la claridad u oscuridad de un tono. Es una condición variable, que puede alterar fundamentalmente la apariencia de un color. La luminosidad puede variar añadiendo negro o blanco a un tono. (Bernicaló, 2013)

La saturación: Está relacionada con la pureza cromática o falta de dilución con el blanco. Constituye la pureza del color respecto al gris, y depende de la cantidad. (Bernicaló, 2013).

4.2.1 Espectro de luz



Fig. 12. Longitudes de onda del espectro visible⁵

La luz blanca se compone por radiaciones electromagnéticas con diferentes longitudes de onda, dentro de un espectro visible de 380 a 780 nm. La luz blanca, se ha obtenido a partir de la luz solar y se puede dispersar por medio de un prisma en forma de espectro. Newton logró identificar siete colores diferentes en el espectro observando que se pueden obtener diferentes grados de colores con la mezcla entre unos y otros (Newton, 1704).

4.2.2 Sistema de Ordenación de colores

Existen diez millones de colores los cuales requieren ser organizados para fines prácticos, por lo que existen varios sistemas de ordenación de colores. Uno de los más conocidos es el sistema Munsell y se basa en el tono, la luminancia y la cromaticidad o saturación (Capilla, Artigas & Pujol, 2002).

⁵ Imagen tomada desde la dirección: luzvisiblejstf.blogspot.com. Fecha: abril de 2013

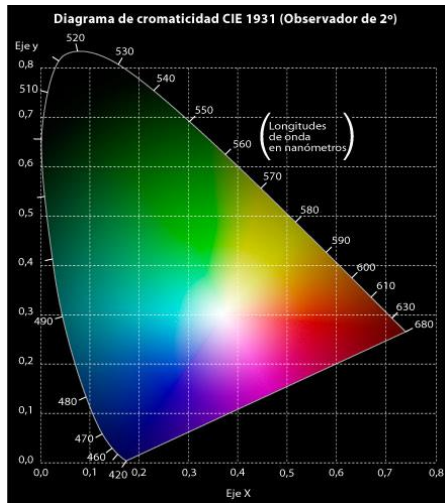


Fig. 13 Gráfica del Sistema Munsell

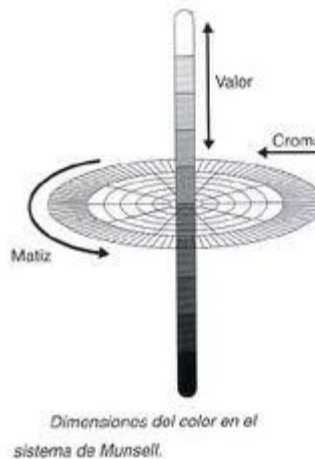


Fig. 14. Diagrama cromático CIE⁶

4.2.3 Diagrama Cromático CIE

El sistema consiste en la definición del color por coordenadas x , y , z llamadas "coordenadas de cromaticidad". El diagrama forma una curva donde se encuentran las radiaciones monocromáticas del espectro visible (780 nm hasta 380 nm) y lo cierra una recta llamada "línea púrpura". En la zona que se encuentra en el centro aproximadamente, se encuentra el "punto blanco" la cual la conforman la suma de todos los colores del espectro.

4.2.4 La percepción

Según el autor E. Bruce Goldstein el proceso conceptual es una secuencia de procesos que trabajan juntos para determinar el modo en que experimentamos los estímulos ambientales y reaccionamos ante ellos. El proceso se divide en cuatro categorías: Estímulo, electricidad, experiencia y acción.

El estímulo que es lo que existe en el entorno, esto es, lo que llama nuestra atención y estimula nuestros receptores. Éste se clasifica en estímulos ambientales, estímulos atendidos y estímulos en los receptores. Los estímulos ambientales son aquellos objetos que podemos percibir en el entorno. El estímulo atendido es el objeto que capta nuestra atención y al cual escogemos para detenernos a observar.

El estímulo en los receptores es la imagen de un objeto que se refleja en la retina del ojo. Esto es, una representación del objeto.

La electricidad es uno de los principios más importantes de la percepción ya que cualquier objeto que percibimos está basado en las señales eléctricas. En este sentido, la visión humana se clasifica en tres tipos diferentes:

⁶Imagen desde la dirección: gusgsm.com. Fecha de consulta: abril de 2013

- Fotópica o diurna, la cual se produce cuando el ojo está adaptado a luminancias superiores a 3cd/m^2 . Los conos posibilitan una visión normal de los colores.
- Escotópica o nocturna, la cual se produce cuando el ojo está adaptado a luminancias inferiores a 0.25cd/m^2 y no existe sensación de color.
- Mesotópica, cuando el ojo se encuentra bajo las dos condiciones anteriores.

Asimismo, el ojo tiene dos propiedades importantes como la adaptación la cual se define como el proceso que se produce cuando el ojo se ajusta a la luminosidad y al campo de visión. Y la acomodación la cual es la capacidad para ajustarse a las distancias que se encuentran los objetos, para lograr una imagen nítida.

Para comprender la forma en que el ojo capta las señales o imágenes es importante mencionar los siguientes términos: transducción, percepción y conocimiento. La transducción es la transformación de una forma energía a otra forma de energía y la transmisión es las señales que viajan fuera del ojo y son transmitidas al cerebro.

La percepción es una experiencia sensorial consciente donde surge el reconocimiento, el cual se define como la capacidad humana de ubicar un objeto en una categoría por conocimientos previos adquiridos. Otra definición de percepción es el proceso de adquirir conocimiento sobre los objetos en el ambiente y los eventos mediante la extracción de información desde la luz que emiten o reflejan. (Palmer, 2002). Los individuos pueden tener diferentes percepciones dependiendo de los estímulos visuales, por ende, es posible que tengan más de dos interpretaciones de un objeto., (Bruner, 1973).

Para crear la percepción, se desarrollan dos procesos: el procesamiento ascendente y el procesamiento descendente. El procesamiento ascendente es aquél que está basado en los datos recibidos. El proceso descendente es aquél que se basa en los conocimientos.

4.2.5 Efectos psíquicos del color

Se han realizado investigaciones sobre las reacciones psíquicas y emocionales que produce el color donde se logra una aproximación de los efectos que producen, se clasifican en los siguientes grupos (Martín, 2007):

- Cálidos-Fríos
- Agradables-Desagradables
- Excitantes-tranquilizantes
- Alegres-Tristes
- Joviales-serios
- Festivos-Dramáticos
- Ligeros-Pesados
- Duros-Blandos
- Lejanos-Cercanos
- Profundos-Superficiales

Las sensaciones que pueden causar los colores son la de calor y frío, de ahí se derivan los términos colores cálidos y colores fríos. Los colores cálidos corresponden desde el color rojo al color amarillo-verdoso, y los fríos van desde el verde hasta el azul-violeta. Los colores cálidos son dinámicos, excitantes y los colores fríos son calmantes y relajantes. Los colores claros dan sensación de ligereza, en cambio los oscuros provocan sensación de pesadez, son tristes y deprimen (Martín, 2007).

La luz y el color, permiten el reconocimiento de los objetos y nos producen efectos psicofísicos, a esto se le llama *ambiente cromático*.

Como se mencionó anteriormente, los colores influyen de manera notoria en nuestro estado de ánimo, es por esto que es muy importante el color en la iluminación y la adecuada elección de las fuentes de luz. De esta manera podemos armonizar, esto es, realizar una agradable combinación de colores para crear una sensación placentera en el observador (Martín, 2007). Una regla de iluminación importante es "...para bajas intensidades de iluminación, colores cálidos y para altas intensidades de iluminación, colores fríos".

4.2.6 Contraste

En la iluminación comercial, tiene gran importancia para poder llamar la atención y conseguir una visión más nítida y distante.

Los diez diferentes contrastes de colores de mayor a menor se muestran en la tabla 3.

	Color del objeto	Color del fondo
1	Negro	Amarilla
2	Verde	Blanco
3	Rojo	Blanco
4	Azul	Blanco
5	Blanco	Azul
6	Negro	Blanco
7	Amarillo	Negro
8	Blanco	Rojo
9	Blanco	Verde
10	Blanco	Negro

Tabla 3. Tabla de contrastes de colores ordenados (Martín, 2007).

Si realizáramos un estudio de contraste con el TLNA se evaluaría el contraste entre un fondo y el artículo de exhibición bajo diferentes niveles de iluminación en el interior, variable que depende totalmente de la variable exterior que el Sol. A este contraste lo llamamos fenómeno contraste de brillantez, el cual es causado por el efecto de la luz sobre el color.

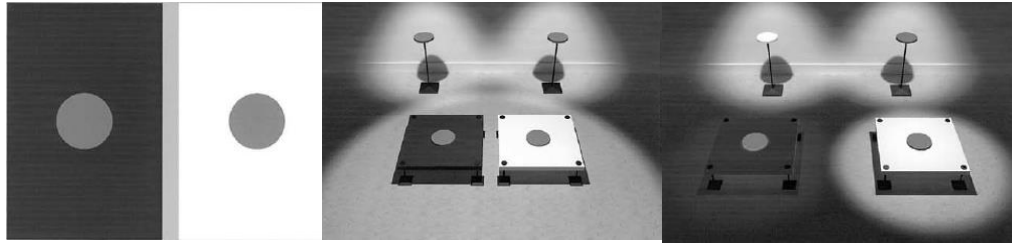


Fig. 15. Explicación empírica de los efectos del contraste de brillantez. a) Estímulo de contraste de brillantez estándar. b) Superficies similares bajo iluminaciones similares. c) Diferentes superficies bajo diferente iluminación. (Purves, D., Williams, M. & Nundy, S., 2004)

Más adelante se explica la metodología para la realización de un diseño experimental para evaluar la brillantez en el ojo de un sujeto la cual puede servir como continuación a una línea de investigación.

La luminancia es determinada por la iluminación de los objetos, la reflectancia de la superficie de los objetos y la transmitancia del espacio entre los objetos y el observador. El mismo observador responde a estímulos generados por las diferentes combinaciones de iluminación, reflectancia y transmitancia (Purves, D., Williams, M. & Nundy, S., 2004).



Fig. 16. Tabla de contrastes de colores ordenados (Martín, 2007).

Como se mencionó antes, la percepción es la acción de identificar al objeto y el proceso de discriminación de las propiedades del objeto a través del tiempo. Cabe mencionar que en la discriminación existe la abstracción, esto es, el conocimiento o experiencia para reconocer el objeto mediante la sensación y percepción. En este sentido la luz la cual es energía electromagnética (energía del entorno) influye en energía electroquímica (energía en el cuerpo humano) lo cual permite ver con nitidez. Una luz que no desgasta el foto-pigmento, la cual es nítida y en la cual el sujeto puede apreciar detalles, induce al mismo sujeto a integrar un conocimiento llamado cognición donde se crea una abstracción cognitiva y forma un conocimiento y estructura.

Los niveles de iluminación pueden provocar la productividad del ser humano y mejorar la calidad de vida, asimismo se afronta y se toman decisiones, se genera vitalidad y atención en el sujeto.

4.3 Iluminación natural y evaluación post-ocupacional

Existen investigaciones que comprueban la preferencia por la iluminación natural las cuales establecen que ésta brinda un ambiente ideal para realizar múltiples tareas, provoca mejor actitud en las personas y no afecta a la salud. (Veitch, Hine & Gifford, 1993). Por otro lado se ha comprobado que la exposición a la luz natural provoca vitalidad en las personas, la cual es un concepto psicológico relacionado con salud mental, física y desempeño (Smolders, Kort & Berg, 2013).

Asimismo la luz natural se considera un regulador que ayuda al ojo a recibir la luz y transmitir impulsos para regular el ritmo circadiano y comprender las ondas de luz en el espectro electromagnético. De igual manera estimula la producción de serotonina, uno de los químicos del cuerpo que provoca la vitalidad en el ser humano (Brawley, 2009). En este sentido el arquitecto debe contribuir al confort visual para aumentar la probabilidad de atención dirigida a una tarea. Asimismo existe una restauración psicológica donde se ahorra energía en el ser humano.

Del mismo modo se han realizado experimentos de psicología ambiental donde se comprueba que el ser humano manifiesta apego a la luz natural mediante la evaluación de 11 fuentes de luz. Una de ellas consistió en un transmisor de luz natural el cual obtuvo un indicador de *naturalidad* del 0.89 en contraste con las fuentes de luz artificial (bulbo incandescente y LED) los cuales obtuvieron indicadores negativos hasta el -2.51 (Haans, 2014).

Cabe mencionar que Haans realiza un experimento más donde los sujetos evalúan dos espacios interiores: a) Un espacio iluminado por un captador solar que transmite luz natural por fibra óptica (TLN) y b) Un espacio iluminado por iluminación artificial suministrado por paneles solares. El investigador (Universidad Tecnológica de Eindhoven) concluye que el 69% de los participantes prefirieron el espacio A iluminado por un (TLN) encima de la iluminación artificial.

Es importante destacar las investigaciones realizadas donde se utiliza la luz como única variable independiente (VI) en experimentos en el género comercial (Quartier, Vanrie, & Van Cleempoel, 2014). Una de ellas es el experimento donde las variables dependientes (VD) son: percepción, emoción y comportamiento. La prueba consiste en que varios sujetos transitan en el interior de una tienda de supermercado y realizan su rutina al comprar alimentos, al mismo tiempo evalúan la iluminación en ambientes similares con base a conceptos de marcas existentes. En este sentido hacemos énfasis en la VD percepción es la que destacaremos por ser la variable dependiente de la propuesta para la evaluación post-ocupacional del TLNA.

La psicología ambiental se ha encargado de dividir el estudio de la percepción ambiental en dos ramas. La primera llamada la percepción del objeto en contraste con la percepción ambiental. El estudio de la percepción del objeto hace énfasis en el estímulo simple como el brillo, el color, el fondo forma y movimiento del objeto. El estudio de la percepción ambiental consiste en una evaluación a mayor escala

como los grandes entornos donde el sujeto es parte de la escena y donde percibe múltiples experiencias (Gifford, 2007).

Es importante mencionar que el equilibrio en la brillantez es un indicador esencial en la calidad de la iluminación. La brillantez consiste en la cantidad de luz que ilumina una superficie y las propiedades reflectivas del material de una superficie (Gifford, 2007). Esta propiedad del objeto es la que se pretendió evaluar con la utilización de un TLNA en el espacio interior.

El método más común para evaluar el proceso de percepción es el método de reporte personal donde se le pregunta al sujeto qué es lo que ve, oye, huele o toca. El reporte consiste en una serie de preguntas, entrevistas y descripciones personales. (Gifford, 2007).

En este sentido se debe realizar un diseño experimental para el desarrollo de un trabajo científico. En cuanto a la iluminación natural se elaboran dos escalas de valoración (O1 y O2) a cada sujeto con la variable independiente (x). Asimismo se debe realizar la comparación con un la iluminación artificial mediante dos escalas de valoración (O1 y O2) con la variable independiente (y).

$$O_1 = x = O_2 \quad (1)$$

$$O_1 = y = O_2 \quad (2)$$

Con base al método de reporte personal y previo a la fase experimental técnica del TLNA (ver metodología), se desarrolló la valoración post-ocupacional de un TLNA (Tabla 4) donde la variable independiente es la iluminación interior que depende de la luz directa exterior captada por el TLNA. La variable dependiente es la percepción del sujeto al evaluar la iluminación y la brillantez del artículo iluminado en diferentes horarios del día.

1. *Prueba de percepción de un TLNA. Duración 3 días*

Se realizan tres pruebas durante tres días con 54 sujetos (27 mujeres y 27 hombres en el interior de la bodega. Variables **9** (niveles de iluminancia) **x 1**(color de fondo) **x 1** (color de artículo) **x 2** (género)

Día 1. Fondo color blanco/zapato rojo. Entran tres grupos de tres sujetos cada cinco minutos en cada horario (10 am, 2 pm y 5 pm). Se les aplica la encuesta con los reactivos anexos.

Día 2. Fondo color blanco/zapato rojo. Entran tres grupos de tres sujetos cada cinco minutos en cada horario (10 am, 2 pm y 5 pm). Se les aplica la encuesta con los reactivos anexos.

Día 3. Fondo color blanco/zapato rojo. Entran tres grupos de tres sujetos cada cinco minutos en cada horario (10 am, 2 pm y 5 pm). Se les aplica la encuesta con los reactivos anexos.

Con base a los datos de iluminancia exterior del mes de enero de 2014 proporcionados por el Instituto de Geofísica de la UNAM se realiza la logística del diseño experimental:

- a) Se coloca el artículo debajo del luminario a las 9.30 am
- b) Previo a la prueba, se les pide dormir bien y desayunar de acuerdo a su dieta usual. Se citan a los sujetos (mujeres y hombres) a las 9.45 am y se les indica contestar el cuestionario de evaluación post-ocupacional. Se les pide que observen detenidamente y contesten de manera consciente sólo las preguntas 1 y 2 del cuestionario en el interior de la bodega.
- c) A partir de las 10 am comienzan a ingresar los sujetos (18 mujeres) cada minuto

-10:00 am entra, contesta y sale en 3 min- total 54 min

Se mantienen los mismos sujetos para que realicen las siguientes dos pruebas, a las 14 y 17 horas. Cabe mencionar que en estas pruebas el artículo se cambia, sin embargo mantendrá el mismo color, tono y matiz.

-10:00 am entra, contesta y sale en 3 min- total 54 min

Es importante considerar que en el interior del espacio solo exista el objeto a evaluar y evitar artículos distractores en la zona de prueba. Se sugiere colgar el objeto con hilos transparentes sobre una tabla pequeña del color del fondo que lo sostenga, en este caso, el zapato a 0.70 m del nivel de piso terminado.

Desafortunadamente no fue posible aplicar la prueba de percepción ni formular conclusiones de la manera en que la transmisión de luz natural influye en la brillantez de un objeto y en la percepción del sujeto debido al diseño deficiente del TLNA (ver nota técnica).

El equipo presentó fallas en el microprocesador así como filtraciones en la tarjeta de video lo cual demuestra que el rastreador fue concebido para la intemperie sin considerar las condiciones climatológicas como la lluvia y neblina. Sin embargo se aporta el trazo del diseño experimental para evaluar un TLNA y un TLNP desde la perspectiva de la psicología ambiental, así como los factores que deben tomarse en cuenta para llevarlo a cabo de manera precisa y organizada.

Escala de valoración, brillantez-contraste					
Nombre:					
Edad:					
Género:					
Ocupación:					
1. Marque con una cruz la respuesta que más se relacione con sus actividades. ¿Con qué frecuencia usted?					
	Nada frecuente	Poco frecuente	Frecuente	Muy frecuente	Demasiado frecuente
Asiste a los centros comerciales					
Compra algún accesorio como zapatos o bolsas					
Convive con su familia en un centro comercial					
2. Marque con una cruz la respuesta que se acerque más a lo que percibió durante el ejercicio.					
	Totalmente desacuerdo	Desacuerdo	Ni en acuerdo ni en desacuerdo	Acuerdo	Totalmente de acuerdo
1. El artículo no me pareció atractivo					
2. Compraría el artículo sin duda alguna					
3. Me parece que el artículo se puede apreciar de manera clara					
4. El artículo contrasta con el espacio de manera agradable					
5. Al entrar, inmediatamente visualicé el artículo					
6. El color del artículo es nítido					

Tabla 4. Escala de valoración de brillantez-contraste. Reactivos para la evaluación post-ocupacional.

5. PARÁMETROS DE DISEÑO DE ILUMINACIÓN EN TIENDAS DEPARTAMENTALES

Existen diversos géneros arquitectónicos en los cuales se realizan diferentes tareas, por lo que el diseño de iluminación varía según la tarea a desempeñar. De acuerdo con los parámetros de iluminación de la IESNA, el siguiente capítulo presenta los tipos de luz utilizados en las tiendas departamentales, así como los niveles de iluminación necesarios de acuerdo al tipo de establecimiento comercial.

5.1 Componentes de un centro comercial

Los centros comerciales están conformados por los siguientes espacios los cuales se encuentran mencionados en orden jerárquico:

Área de venta

1. Tiendas anclas. Son aquellas de mayor superficie de venta.
2. Tiendas subanclas
3. Subanclas independientes (*Free Standings*)
4. Locales
5. Locales de comida rápida (*fast food*)

Áreas públicas

1. Track comercial
2. Plazas
3. Estacionamiento
4. Servicios

El track comercial es el espacio iluminado con luz natural. Generalmente cuenta con un domo cenital para distribuir la iluminación a lo largo del edificio. Asimismo es el espacio de transición a las áreas de venta.

5.2 Iluminación en retail

Según la Sociedad de Luz e iluminación (*The Society of Light and Lighting*), la iluminación es la parte esencial para realizar los objetivos de una tienda retail:

- Atención visual
- Mandar mensajes de la naturaleza de la tienda a los posibles compradores
- Guiar a los consumidores a lo largo de la tienda.
- Mostrar las ventajas de la mercancía expuesta.

La iluminación de *retail* debe ser balanceada entre la iluminación general, la iluminación de acento y la distribución de luz. Asimismo el diseño de iluminación depende del perfil de la tienda, por esta razón, las tiendas son clasificadas como se muestra en la siguiente tabla:

Perfil de la tienda	Precios	Uso	Rango de productos	Tipo de venta
Bajo presupuesto		Semanal	Gran variedad	Autoservicio
Valor por dinero	Bajos	Diario	Limitados	Contacto social
Calidad	Altos	Por impulso	Gran variedad	Diversión
Exclusivas	Muy Altos	Consciente	Exclusivos	Servicio personal

Tabla 5a. Perfil de tiendas departamentales más comunes según la (SLL, 2009).

Por ejemplo, el diseño de iluminación de las tiendas de bajo presupuesto utiliza un tipo de iluminación general en la cual no existe el acento ni luz direccionada. Por otro lado, las tiendas exclusivas o boutiques tienden a usar un nivel bajo de iluminación combinada con la iluminación de acento o direccional en la mercancía y las tiendas de valor por dinero usan la combinación de una iluminación general con iluminación de acento en su mercancía.

Las tiendas de bajo presupuesto (supermercados) donde no se necesita iluminación de acento, la iluminancia debe de tener un rango de 500 a 1000 luxes donde la iluminancia debe ser proporcionada a la mercancía, esto es iluminar verticalmente los anaqueles.

Para una tienda exclusiva o boutique el nivel de iluminancia debe tener un rango de 100 a 200 luxes, la cual es necesaria para la iluminación de acento y debe ser proporcionada horizontalmente a la mercancía. Para las tiendas de valor por dinero deben tener un grado de iluminancia de 250 a 500 luxes.

A pesar de que existen los parámetros de iluminancia adecuados para cada tipo de tienda, se debe entender y analizar el tipo de mercancía que se va a exhibir. Por ejemplo, en una tienda de muebles, es necesario crear un ambiente hogareño con luz tenue para lograr que el comprador se sienta como en casa.

Para lograr una luminancia adecuada en la iluminación de acento, ésta debe iluminar al objeto o mercancía y debe ser más intensa que la luminancia del fondo. Los radios de iluminancia darán diferente intensidad y juego de sombras. La siguiente tabla muestra el radio de luminancia para la diferente intensidad en la iluminación de acento.

Radio de luminancia	Intensidad de acentuación
1	ninguna
2	notoria
5	Baja
15	teatral
30	dramática
>50	Muy dramática

Tabla 5. Radio de luminancia en iluminación de acento (SLL, 2009)

Según la CIE el Índice de Referencia de Color (IRC) debe ser mayor a 80 en el género *retail*. (SLL, 2009).

La apariencia de color de la luz en una tienda contribuye al mensaje que se quiere transmitir al consumidor. Una luz fría insinúa una atmósfera de trabajo, mientras que un color cálido transmite una sensación hogareña. De esta manera, la apariencia del color de la luz define el perfil de la tienda, desde el color frío el cual pertenece a la tienda de bajo presupuesto o autoservicio a la luz cálida el cual es utilizado en las tiendas más exclusivas. Lo que se quiere lograr al exhibir una mercancía es evitar

que se altere el color de la misma. Sin embargo el diseño de la iluminación depende del tipo de la mercancía. No es lo mismo exhibir una pieza de ropa, la cual se usará durante el día y cuyo IRC de 100 sería el ideal para su exhibición, o la exhibición de comida en un supermercado donde se pretende lograr un color más intenso para atraer al consumidor.

5.3 Iluminación de acento

Este tipo de iluminación tiene competencia de la luz natural durante el día la cual es reflejada en el cristal de las ventadas de una tienda o local. La iluminación general de la tienda debe estar en un rango de 500 a 2000 luxes, mientras que la iluminación de acento debe estar en un rango de 3000 a 10,000 luxes durante el día.

5.4 Iluminación direccional

Su función en una vitrina es llamar la atención del consumidor y hacer que la mercancía luzca atractiva. El objetivo de la iluminación direccional es enfatizar las cualidades de una mercancía en específico. Asimismo es diseñada para llamar la atención con la combinación de brillo, color y modelo. Mientras más grande es el radio de luminancia, será mayor la posibilidad de atención del usuario. En cuanto al color, la luz con color en un objeto debe combinarse con el color de fondo y definir la atmósfera que se quiere lograr. Además el modelo de exhibición depende de la intensidad de la luz en sus diferentes direcciones.

Luz	Descripción	Función
Key-light (principal)	Es el recurso principal de la iluminación direccional	Crear brillo y revelar textura
Fill-light	Iluminación complementaria desde otra dirección	Suavizar sombras y lograr contraste
Back-light (de fondo)	Iluminación desde el fondo y normalmente en la parte superior	Separar el objeto del fondo y revelar elementos con transparencias
Up-light (superior)	Partes de acentuación de luz direccional cercanas al piso	Suavizar sombras, pueden ser usados para causar efectos dramáticos

Tabla 6. Componentes de la iluminación direccional (SLL, 2009).

En cuanto a los materiales, éstos requieren diferentes técnicas para la iluminación direccional.

Materiales	Técnica de iluminación direccional
Materiales uniformemente transparentes	Transmisión de luz desde un fondo iluminado; iluminación superior con posibilidad de color
Vidrio y cristal	Iluminación intensa; iluminación superior con posible combinación de un fondo translúcido: luz con color.
Objetos de fibra transparentes ej. Telas finas	Iluminación de contorno desde el fondo
Piedras preciosas y joyería	Pequeñas luminarias spot, fondo negro
Objetos brillosos u opacos ej. plata	Luminarias spot, fondo negro e iluminación intensa
Objetos con textura	Luz predominante a lo largo de la superficie.

Tabla 7. Técnicas de iluminación direccional (SLL, 2009).

De acuerdo a las técnicas de iluminación que establece la Sociedad de Ingenieros de Iluminación de Inglaterra (SSL), es importante contemplar las características de la iluminación, ya sea el tipo de luminario, así como los fondos a elegir en un espacio interior para crear el ambiente ideal dirigido a un consumidor. Esto se refiere a utilizar acabados ideales para cada artículo en exhibición en algún espacio comercial. Asimismo se debe tomar en cuenta el tipo de iluminación que se va a utilizar según los artículos en venta, ya sea una iluminación general o una iluminación direccional, la cual requiere un índice de color más aproximado a la luz natural.

En comparación con el TLNA, se pone a prueba el difusor de luz natural y luz artificial *L2 híbrido* para realizar la comparación con una iluminación general, que se explica a detalle en el capítulo 7.

6. SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE LUZ NATURAL

La conducción de luz natural se divide en sistemas pasivos y sistemas activos. Los sistemas pasivos son aquellos que están compuestos por colectores solares fijos los cuales no cuentan con elementos para el seguimiento solar. Por otro lado, los sistemas activos, a los cuales nos enfocaremos en esta investigación, tienen medios móviles para la captación y rastreo de los rayos solares. Un ejemplo del sistema pasivo es el sistema Tubular de pilas (TDLN), en cambio, Sistema de Iluminación Híbrida (SIH), es un sistema activo que brinda luz natural y luz eléctrica en una luminaria de manera simultánea.

Existen tres tipos de sistemas de iluminación para la eficiencia energética las cuales consisten en el aprovechamiento de la luz solar para iluminar el interior de un edificio. El sistema Tubular de pilas (Tubular Daylight Guidance System), el sistema de iluminación híbrida (SIH). Este sistema brinda luz natural y luz eléctrica en una luminaria de manera simultánea.

Por otro lado, el comportamiento de los sistemas puede variar según la ubicación del edificio, esto es, la latitud de la ciudad donde se encuentra, así como la geometría del edificio y el tipo de sistema (Mayhoub & Carter, 2011). La Universidad de Liverpool realizó estudios donde se comparan los tres sistemas para determinar la mejor eficiencia y las variaciones entre diferentes ciudades del mundo.

Existen dos formas de transmisión de la luz natural las cuales se clasifican en pasivos y activos. Los sistemas pasivos transmiten la luz natural captada en la azotea o fachada de un edificio, son sistemas fijos y no se componen de sistemas móviles de captación. Por otro lado, el sistema de transmisión activo cuenta con sistemas de seguimiento solar para captación de luz directa cuya transmisión de luz es a través de la fibra óptica.

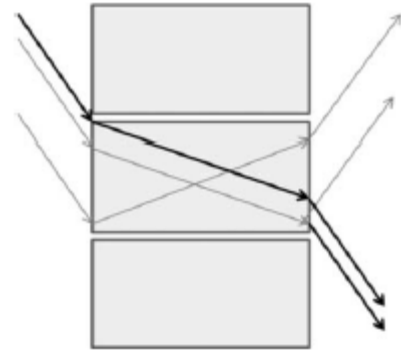


Fig. 17. Panel de láser cortado. . (Nair, MG., Ramamurthy, K., & Ganesan, AR. 2013).

6.1 Sistemas Pasivos

Los sistemas pasivos deben ser colocados en una orientación específica para maximizar la captación de la luz. Asimismo los sistemas pasivos se dividen en: sistemas de luz redireccionada y concentradores. Un ejemplo de sistema de luz redireccionada es el *panel de láser cortado* los cuales consisten en material acrílico

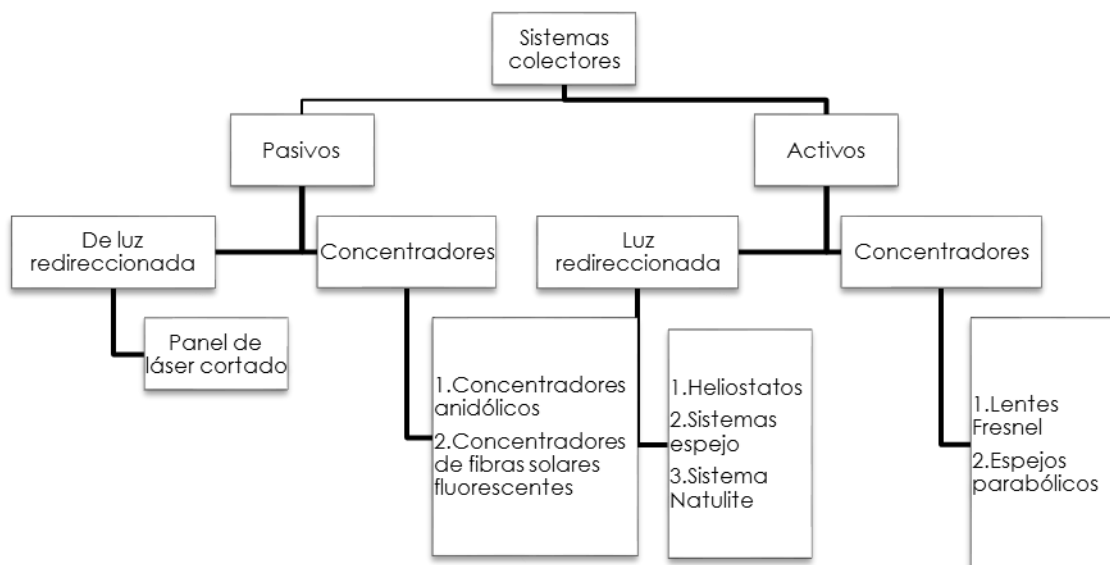


Fig. 18. Clasificación de los sistemas colectores de luz natural. (Nair, MG., Ramamurthy, K., & Ganesan, AR. 2013).

transparente que facilita la deflexión de una gran proporción de luz natural a través de un ángulo en cada elemento que lo conforma por refracción y reflexión. El panel debe ser orientado al oriente o poniente para maximizar la captación de la luz. Funciona bajo un cielo despejado y un cielo nublado (Fig. 17).

Un *concentrador anidólico* o concentrador parabólico es construido por materiales de alta reflexión y concentración. La luz difusa entra por la apertura del dispositivo y es capturada y concentrada en una apertura menor.

El *concentrador solar de fibra fluorescente* consiste en una fibra óptica como concentrador solar con un disco compuesto de tres piezas de fibras de color fluorescente. Las moléculas fluorescentes absorben la radiación solar en el disco y emiten radiación fluorescente a las orillas del disco por reflexión interna. El dispositivo suele montarse en azoteas donde la luz es transportada a través de cable de fibra óptica en espacios interiores.

6.2 Sistemas activos

Los sistemas activos tienen un dispositivo de rastreo que orienta el captador hacia los rayos del sol. Así como los sistemas pasivos, los sistemas activos se dividen en concentradores de luz redireccionada y concentradores.

El *heliostato* consiste en un sistema mecánico controlado por una computadora la cual hace que los espejos rastreen la trayectoria solar. El concentrador lo forman lentes de Fresnel planos que reflejan y redirigen los rayos solares a dispositivos transportadores de luz.

Los *sistemas de espejo* utilizan dos o tres espejos reflectivos. El primer espejo rastrea los rayos solares y los reflejan en un segundo espejo cóncavo el cual puede rotar a cualquier dirección.

El *sistema naturalite* se compone de un sensor fotométrico el cual hace que el captador siga la trayectoria solar. Una ventaja del sistema es que elimina los rayos UV y provee rayos infrarrojos.

Los *lentes de Fresnel* consisten en una serie de prismas con material transparente que concentran los rayos en una ranura circular.

El *sistema de espejos parabólicos* se compone de espejos rastreadores que concentran la luz en una apertura de la guía transportadora. El eje óptico es diseñado para rastrear la altitud y el azimut.

Cabe mencionar que los investigadores Mayhoub y Carter estudiaron el comportamiento y la eficacia de ambos sistemas pero por ser los sistemas activos el eje de esta investigación, se describen en el siguiente apartado.

6.3 Sistema Himawari

Este sistema consiste en un sistema de lentes Fresnel y dispositivos el cual puede captar la luz solar y transmitirla a un espacio a través de cables de fibra óptica.



Fig.19. Sistema Himawari.

El sistema cuenta con un sensor solar que rastrea y capta los rayos del sol durante el día. Puede responder a cambios en el clima en caso de que esté nublado. El cable de fibra óptica está conformado por seis cables que se distribuyen para la colocación de las luminarias que abastecen la luz en el interior del espacio.

La luz es emitida en un ángulo de 58° con una apertura ilumina 500 luxes en promedio, en un área radial de 3.80 m². Entre mayor área se requiera iluminar, el número de lentes en el colector aumentara. Por ejemplo, para iluminar un área de 10 m, se necesitarían 12 lentes en el

colector.

El sistema Himawari, cuenta con un dimmer que permite cambiar la instalación al sistema de iluminación artificial.

En la tabla 8 se muestran los niveles de iluminancia que se pueden alcanzar con un nivel de iluminancia directa de 98,000 luxes en Japón según el proveedor.

Distancia iluminada	Iluminancia Promedio (lux)	Centro de Iluminancia (lux)	Diámetro de iluminancia (lux)	Área iluminada
0.5	7,967	11,154	0.554	0.241
1.0	1,990	2,786	1.109	0.966
1.5	884	1,238	1.663	2.172
2.0	497	696	2.217	3.860
2.5	318	445	2.772	6.035
3.0	221	309	3.326	8.688

Tabla 8. Niveles de iluminancia directa en Japón, según proveedor. (Himawari, 2013)

Calibre del cable de fibra óptica	1.0 mm
Salidas de cable	6
Longitud del cable de fibra óptica	15m
Flujo lumínico por cable	1,920 lm
Ángulo de iluminación	58°

Tabla 9. Características de cable de fibra óptica. (Himawari, 2013)

Para poder rastrear los rayos del sol, el sistema está formado por tres componentes. Un colector alimentado con celdas fotovoltaicas o energía eléctrica de bajo voltaje con seguimiento solar, cables de fibra óptica para transmitir la luz del sol y un cable terminal que distribuye la luz interior.

6.4 Captador Solar

Para lograr la eficiencia energética en el edificio se propone la aplicación del sistema híbrido Parans, el cual funciona de la siguiente manera. El sistema SP3 es un dispositivo automático compuesto de lentes de cristal llamados "lentes fresnel" que capta los rayos del sol desde la fachada o la azotea. Los rayos del sol son enfocados en 36 lentes, éstos entran en contacto con cables de fibra óptica, que a su vez, transportan la luz hacia el interior. La fibra óptica tiene la propiedad de atrapar la luz, la rebota y la transporta hacia el interior.

Se deben considerar los siguientes aspectos antes de instalar un Sistema Parans en algún edificio. Primero se debe considerar la ubicación del equipo el cual debe estar en contacto con la luz del sol. Para llevarlo a cabo se necesita examinar la exposición de los rayos durante el año para evitar sombras. Asimismo se debe considerar la orientación, para el Hemisferio Norte la instalación debe tener una orientación hacia el sur y no debe instalarse a $+90$ grados del Norte. Para el Hemisferio Sur, la instalación debe tener una orientación hacia el Norte a no más de $+90^\circ$ del Norte (Mayhoub & Carter, 2011).



Fig. 20. Captador Solar Parans. (Mayhoub & Carter, 2011)

El sistema consiste en una variedad de métodos para proporcionar luz natural dentro de un espacio apoyado con el sistema eléctrico convencional. De esta manera, el sistema de control regula el flujo de iluminación desde los dos recursos (natural y artificial) usando componentes separados para la distribución de luz.

6.5 Tubo de luz natural (Enhanced tubular daylight guidance)

Fue el primer instrumento en el desarrollo de la iluminación Híbrida, donde el objetivo era proveer luz durante la noche.

El sistema funciona mediante heliostatos, que son un conjunto de espejos cuya función es mantener el reflejo de los rayos solares que inciden sobre los espejos en todo momento, y combinan la luz natural y la luz eléctrica con la luz transmitida verticalmente en el interior de un edificio. En la fig. 21 se muestra el sistema de un

espejo de heliostato estático, montado en la azotea de una escuela, que atrapa y dirige la luz natural a través de un prisma vertical y la distribuye en los tres pisos del edificio. El difusor reflectivo conformado por una lámina de aluminio, distribuye la luz a lo largo de la superficie para proporcionar a cada piso cantidades de luz similares. (Mayhoub & Carter, 2011).



Fig. 21. Captador de luz natural de un tubo de luz natural (Mayhoub & Carter, 2011)

Se utilizaron los lentes fresnel para captar los rayos del sol y la luz solar es reflejada a través de un espejo anidólico en un tubo de 13 m de largo y 90 cm de diámetro alineado con material prismático. Asimismo, una unidad difusora es situada al final del tubular y es conectado a una unidad difusora con dos guías prismáticas horizontales cuya potencia es dimeada por las lámparas de azufre.

6.6 Iluminación híbrida solar (HSL Hybrid Solar Lighting)

Este sistema fue desarrollado para los edificios públicos de Estados Unidos, donde la radiación solar directa es mayor a 4 kWh/m² por día. El colector de luz solar consiste



Fig. 22. Captador Solar (Mayhoub & Carter, 2001)

en un primer un espejo parabólico de 1.22 metros de diámetro que contiene un segundo espejo elíptico el cual capta los rayos del sol. El captador separa los rayos infrarrojos y la luz solar visible, ésta última es concentrada en un bulto de cables (3 mm de diámetro) de fibra óptica. A través de estos cables la luz es transportada emitiendo la luz natural mediante una varilla de acrílico colocada dentro de una luminaria eléctrica convencional. Un sistema de control sigue la posición del sol el cual contiene monitores y sensores para captar los niveles de luz natural, además está conformado por balastos electrónicos que regulan la emisión de la luz para

lograr un nivel determinado. (Mayhoub & Carter, 2011).

6.7 Sistema de Iluminación Solar con Fibra Óptica

Este sistema consiste en 64 lentes Fresnel. Cada lente es capaz de captar seguir y captar los rayos del sol en cables de fibra óptica de 0.75 mm de diámetro. Un cable lo conforman 16 hilos de fibra óptica con una longitud máxima de 20 metros. El rastreo solar es controlado por un microprocesador el cual es alimentado de información gracias a un fotosensor que escanea el cielo para detectar la trayectoria solar. El sistema tiene cinco luminarias tipo, tres de ellas son luminarios

híbridos equipadas con lámparas fluorescentes que controlan los niveles de luz (dimeables) dependiendo de las condiciones de la luz solar. (Mayhoub & Carter, 2011).

6.8 Sistema de Iluminación Solar Canopy (SCIS)

El sistema consiste en un colector solar montado en una fachada el cual usa una red de 16 espejos cuadrados dentro de una estructura rectangular que sirve para protegerlos del agua. Cada unidad del sistema mide aproximadamente 3 m de ancho por 1.2 de largo. La orientación de los espejos cambian según la posición del sol, y la luz es concentrada y redireccionada en el conjunto de lentes y espejos.

La luz del sol viaja a lo largo de la guía usando una total reflexión hasta que tiene contacto con un material extractor. Este fenómeno releja la luz de manera difusa. El sistema de control utiliza balastos de control junto con sensores de luz para mantener el nivel de iluminación deseada. (Mayhoub & Carter, 2011).



Fig. 23. Sistema de iluminación solar Canopy. (Mayhoub & Carter, 2011)

Existen investigaciones en la Universidad Nacional Autónoma de México, donde los experimentos consisten en tres fases, en ellas se pone a prueba el ducto solatube con tres acabados diferentes para determinar el nivel de iluminancia reflejado en el interior del espacio arquitectónico y analizar si cumple con los requerimientos necesarios para realizar una tarea en un edificio de oficinas en el centro histórico de la Ciudad de México (García, 2012).

En esta tesis se experimenta con el sistema rastreador de luz para verificar la irradiancia captada en la latitud del sitio de estudio ubicado en la azotea del Observatorio en la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

7. COMPONENTES DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN HÍBRIDA

El sistema de iluminación híbrida o Transmisor de Luz Natural Activo está formado por tres componentes principales: el captador solar que consiste en un dispositivo que rastrea los rayos del sol, los cables de fibra óptica los cuales conducen la luz natural desde el colector hasta el luminario. Éste último es el tercer componente que se encarga de distribuir la luz natural en el interior de un espacio. Asimismo el sistema se compone de un luminario con lámparas LED cuya función es distribuir luz artificial en caso de que la luz natural sea escasa o nula. En este capítulo se describen cada uno de los componentes y la manera en que funcionan.

7.1 Concentrador de luz: Lentes Fresnel

Un concentrador de Fresnel se describe como el lente obtenido a partir del rebaje con cortes de una lente en anillos circulares concéntricos consecutivos cuyos beneficios radican en amplificar la potencia de la luz solar y poseer un peso y espesor reducidos (Leon, C., Veintimilla, J.C. & Jaramillo, J.L., 2013). Su función es concentrar la radiación solar en un punto, en este caso, la apertura de una fibra óptica para convertir la energía que aplica en la iluminación natural.

Los lentes de Fresnel se fabrican de vidrio tallado o de plástico y se diseñan para que los rayos de luz atraviesen el lente y se comporten como rayos en una lente plana convexa.

Para el manejo de los sistemas ópticos de focalización se utilizan dos coeficientes: la concentración geométrica y la concentración óptica. La concentración geométrica es la resultante del área de superficie del concentrador entre el área de superficie del colector (García, 2012). Asimismo la concentración óptica es el resultado de la potencia recibida del colector cuando es iluminado por el concentrador entre la potencia recibida en el colector iluminado directamente por la fuente en la posición en que recibe la máxima potencia.

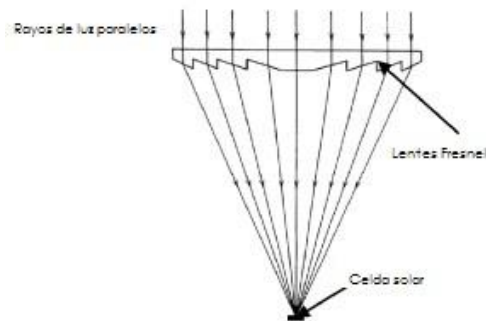


Fig.24 Geometría de lentes fresnel. (Tripanagnostopolous, Siabekou, & Tonoui, 2005).



Fig.25 Lente de Fresnel. (Leon, C., Veintimilla, J.C. & Jaramillo, J.L., 2013).

La reflexión Fresnel es causada por los extremos de cada fibra las cuales se encuentran separadas por una cavidad de aire. En la reflexión Fresnel una pequeña porción de la luz incidente es reflejada en el orificio de la fibra óptica. Asimismo, el radio de la reflexión Fresnel puede ser aproximada por la función:

$$R = [(n1 - n0) + (n1 + n0)]^2 \quad (3)$$

Donde R es la fracción de la luz reflejada en la interface de la fibra, n1 es el índice de refracción de la cubierta de la fibra y n0 es el índice de refracción del medio entre el homogeneizador y el cable de fibra óptica.

7.2 Fibra óptica: Conductor de luz

Las fibras ópticas son filamentos de vidrio de alta pureza que conduce la luz y se componen de dos materiales dieléctricos transparentes (substancias sin conductividad eléctrica tales como vidrio y plástico) (García, 2000). Asimismo la fibra óptica consiste en dos regiones concéntricas. La región interna es un filamento llamado núcleo y su índice de refracción es superior a la región externa la cual consiste en un revestimiento de cuarzo o plástico al igual que el núcleo. (Allan, 1973).

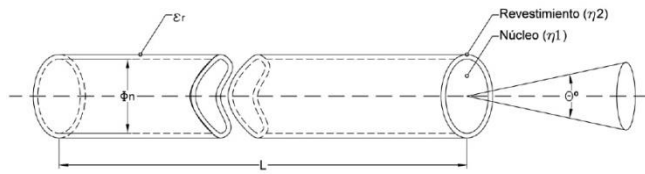


Fig.26. Componentes de la Fibra óptica. (Hetch, 2000).

La luz inyectada en un extremo de la fibra dentro de un determinado ángulo conocido como apertura numérica, es reflejada cada vez que incide en límite del núcleo y el revestimiento. El índice de refracción es la medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo, es mayor que el índice de refracción del revestimiento, por lo que la luz se mantiene y propaga a través del núcleo de la fibra óptica, este fenómeno produce el efecto de reflexión interna total (Allan, 1973).

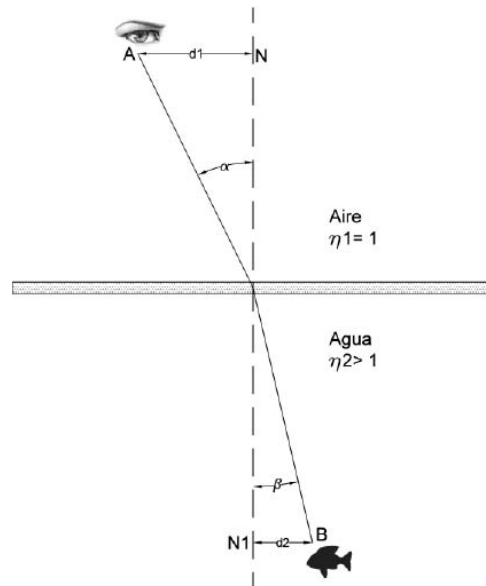


Fig. 27. Índice de refracción (Cetto, 2003).

El índice de refracción sucede bajo las siguientes dos leyes (Cetto, 2003):

1. El rayo refractado se encuentra en el mismo plano que el rayo incidente.
2. Cuando el rayo incidente y el rayo refractado se han dibujado del mismo tamaño a partir del punto en que ocurre el cambio de medio, se afirma que existe una relación entre las distancias a la vertical: $\frac{AN}{BN} = \frac{n_2}{n_1}$ (4)

Donde:

- n1 es el índice de refracción del núcleo
- n2 es el índice de refracción del revestimiento
- AN y BN= distancias a la vertical

Cabe mencionar que la ley de Snell afirma que cuando incide un rayo luminoso sobre una superficie de separación entre dos medios de distinto índice de refracción

n , el rayo que viaja por el medio más denso es parcialmente reflejado y parcialmente refractado. Las ondas luminosas deben entrar en la fibra dentro de un cierto ángulo, llamado ángulo de aceptación. Cualquier onda que entre según un ángulo mayor escapará a través del revestimiento. En este sentido la fibra óptica se basa en dos características para su funcionamiento: la apertura numérica y la atenuación. La apertura numérica (NA) es una medida del ángulo de aceptación y comprende la siguiente fórmula: $NA = \text{sen } \theta_A = \sqrt{n_n^2 - n_r^2}$ (5)

Donde:

θ_A , ángulo de aceptación

n_1 , índice de refracción del núcleo

n_2 índice de refracción del revestimiento

La atenuación es la pérdida de potencia en función a la longitud del cable de fibra óptica y se obtiene mediante una integral sobre un espectro de radiación solar típico para una fibra de 1 m de longitud, se mide en dB y dB/Km (Hinojosa, 2007). La mayor parte de la fibra óptica tiene una apertura entre 0.2 y 0.4 con ángulos de aceptación entre 12° y 24° y la más alta con apertura de 0.86 con ángulo de aceptación de 59°. La apertura 1 es el límite ideal.

7.2.1 Tipos de fibras ópticas

Las fibras ópticas se clasifican de acuerdo al modo de propagación que dentro de ellas describen los rayos de luz emitidos (Hinojosa, 2007).

Fibra de índice escalonado: Aquella cuyo valor del índice de refracción en el núcleo permanece siempre constante y mayor que el valor de revestimiento. Se caracterizan por tener un diámetro de núcleo ancho.

Fibras de índice gradual: Aquellas cuyo índice de refracción varía con la distancia a lo largo del eje con el objetivo de disminuir los efectos de la dispersión. El núcleo está rodeado por el vidrio o revestimiento de menor índice refractivo. Ofrecen mejor aceptación de luz que las fibras de índice escalonado.

Fibras monomodo: Se caracterizan por contener un núcleo pequeño de diámetro, baja atenuación y gran ancho de banda. Puede brindar los mayores flujos, pero es la más compleja de construir y manipular.

7.3 Descripción del Rastreador de luz natural

En los últimos dos años se ha desarrollado el sistema de iluminación híbrida marca Parans el cual consiste en un dispositivo automático compuesto por lentes fresnel que capta la luz directa del sol la cual es rastreada de manera automática para brindar luz natural en el interior del edificio durante horas diurnas.

Cuando los niveles de luz directa no son los adecuados para alcanzar los niveles de luz en el interior del espacio es posible encender manualmente el sistema de luz artificial a través de la energía eléctrica del edificio.

En este sentido, es importante realizar el estudio del TLNA para comprobar su eficiencia y calidad para alcanzar los niveles de iluminación necesarios para un espacio arquitectónico comercial durante su horario de operación el cual normalmente se desarrolla de las 9:00 a las 21:00 horas. Es evidente que el máximo aprovechamiento de la luz natural será de las 7:00 a las 18:00 o 19:00 horas, según el horario en curso.

La prueba para evaluar las características lumínicas, consiste en el estudio del Sistema Parans el cual radica en los cálculos de la relación entre la irradiancia captada por el colector y la iluminancia distribuida en el interior de un espacio arquitectónico.

7.4 Funcionamiento de un concentrador solar

Los estudios de la Universidad de Nottingham y el Instituto de Investigación de Energía de Corea, realizan estudios de sistemas activos donde la captación de rayos solares se realiza con la utilización de discos convexos. En la investigación se comparan los resultados de la experimentación con la simulación de dos software: Relux y Ecotec.

Los rayos del sol son rastreados continuamente. En el estudio los discos concentradores y el embudo concentrador son diseñados para concentrar los rayos solares y necesitan el rastreo preciso de los mismos para transmitir la luz natural.

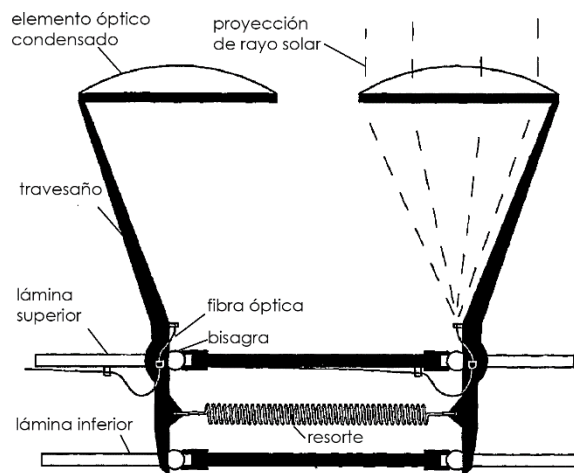
Los rayos paralelos caen directo en el tubo, pero gran porcentaje se pierde antes de entrar al cable de fibra óptica. Se comprobó mediante la colocación de un lente fresnel sobre la entrada del concentrador, que el rayo de sol debe ser concentrado en el disco de forma paralela y estar dirigido al segundo reflector. Posteriormente, la luz es reflejada en el segundo reflector y dirigida al tubo cuya función es transmitir la luz en el cable de fibra óptica. Finalmente, el cable de fibra óptica transmite la luz natural a un difusor (Joo Han, Hyun, Riffat, Saffa B. & Lim, Sang Hoon, 2013).

Las pérdidas de ópticas pueden ocurrir cuando el ángulo de incidencia de la luz a través del conector a la fibra óptica es mayor al ángulo de aceptación de la fibra óptica. (Joo Han, Hyun, Riffat, Saffa B. & Lim, Sang Hoon, 2013). En la investigación de Nottingham se utilizó un ángulo de aceptación de 35° para la fibra óptica, lo que permitió la captura de la totalidad de los rayos a través del conector después de la reflexión del segundo espejo como el máximo ángulo de luz incidente en el extremo de la fibra óptica el cual no debe exceder 10°. En el estudio la fibra óptica mostró una transmitancia de 0.6 de 400 nm a 1000 nm.

7.5 Principio de la patente

El TLNA que se estudió en esta investigación tuvo varias modificaciones a lo largo de cuatro años. En un principio el sistema consistía en un colector solar fijo que transmitía la luz natural a través de cables de fibra óptica. En el 2010 se patenta el colector solar inventado por Bengt Steneby en Partille, Suecia cuya concesión se asignó a la empresa Parans Solar Lighting AB ubicada en Goteborg, Suecia.

El principio de la patente consiste en la incidencia directa de los rayos del sol en un elemento óptico condensado o lente fresnel colocado sobre una estructura que separa el orificio de la fibra óptica del lente, asimismo, el travesaño es colocado sobre dos láminas separadas por un resorte cuya función es evitar que los lentes se muevan de su eje para poder captar los rayos del sol. (Fig.28)



El principio de la patente obedece al TLNA marca Parans de la primera generación cuyo estudio fue realizado por Mayhoub & Carter en el 2011.

Posteriormente se lanza al mercado el sistema activo el cual se encuentra conformado por un GPS que funciona con un motor y una tarjeta de video para seguir la trayectoria solar y proporcionar luz natural durante el día.

Fig. 28. Colector de luz natural (Steneby, 2010).

Existen tres tipos de sistemas activos de acuerdo a su funcionamiento: a) control del tiempo o fórmulas matemáticas b) sensor electroóptico c) sistemas de control híbridos. (Song, J., Yang, Y & Zhu, Y., 2013).

El sistema de control del tiempo consiste en un control lógico de programación el cual no considera las condiciones del tiempo ni el polvo. El sistema funciona con base al cálculo de la posición del sol mediante una computadora programada con algoritmos astronómicos de alta precisión. Sin embargo, las fórmulas no contemplan las variables como la variación de temperatura la cual provoca una desviación en el índice de fluctuación atmosférica de 0.5° (Song, J., Yang, Y & Zhu, Y., 2013).

El sensor electroóptico detecta la dirección de los rayos solares y no requiere de fórmulas complejas para su funcionamiento. El sensor se encuentra instalado en un panel el cual indica la incidencia de los rayos solares, el cambio de indicaciones funcionan con el fotosensor de acuerdo a las variaciones del ángulo de incidencia

de los rayos solares. El motor se mueve de acuerdo a las indicaciones del fotosensor y se detiene en la posición donde el ángulo de incidencia sea igual a cero. Este sistema funciona en cualquier latitud, sin embargo, puede ser impreciso porque posee un rango de medición es limitado y es probable que el sistema de rastreo se desvíe de los rayos solares en especial bajo cielo nublado (Song, J., Yang. Y & Zhu, Y., 2013).

El sistema híbrido utiliza un microprocesador y un sistema de control electroóptico los cuales resultan prácticos para el rastreo preciso de los rayos del sol. (Song, J., Yang. Y & Zhu, Y., 2013).

7.6 Descripción del Sistema de Transmisión de Luz Natural Activo

El TLNA está conformado por un dispositivo de lentes fresnel que rastrea la luz directa la cual es transportada a través de cables de fibra óptica y distribuida a través de un luminario o difusor en el interior de un espacio. En la Fig. 24 se muestra el dispositivo el cual es colocado sobre la losa de un edificio. Cada dispositivo distribuye seis cables de fibra óptica para la colocación de seis luminarias en el interior del espacio.

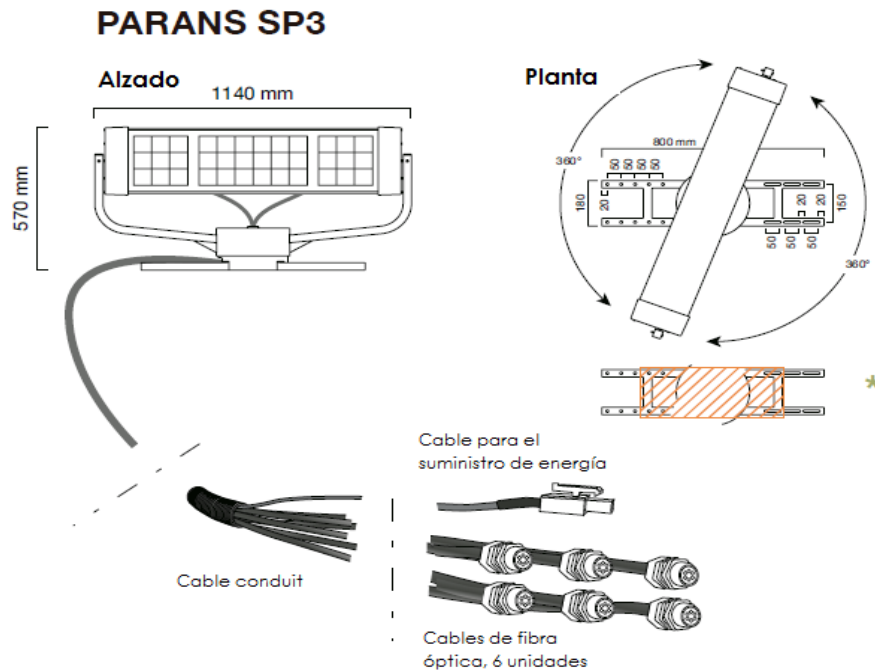


Fig. 29. Sistema TLNA (Parans, 2013).

7.6.1 Luminario Híbrido L2 Parans

El luminario Parans Híbrido L2 combina la luz natural con iluminación LED. La ventaja del luminario, es que, en ausencia de la luz solar, el luminario provee luz artificial (LED).

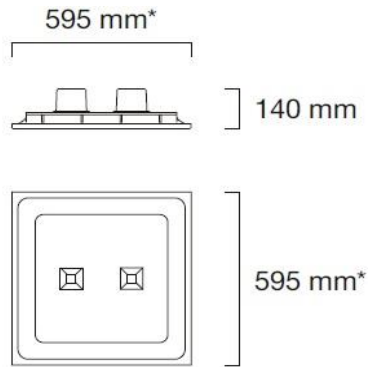


Fig. 30. Luminario L2 Hybrid. (Parans, 2013)



Fig. 31. TLNA marca Parans tercera generación.

El Sistema Parans ha evolucionado en los últimos cinco años, ahora el dispositivo SP3 cuenta con 1.14 metros de ancho lo cual facilita la colocación del mismo en la azotea. De igual manera ocupa menor espacio en el área de instalación. Otro de los avances notorios en el dispositivo es que éste se inclina y rota para recibir directamente los rayos del sol, cualidad que antes no tenía, el dispositivo de lentes fresnel era totalmente estático (ver antecedentes).

8. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

A continuación se describe la arquitectura del local comercial, el cual se utiliza como caso de estudio para comparar el sistema de iluminación convencional con el sistema transmisor de luz natural activo.

8.1 Local comercial

Debido a que en esta tesis se realiza el estudio de la iluminación en la óptima exhibición de artículos en tiendas comerciales, en el caso de estudio se toma en cuenta solo el área de venta la cual cuenta con una superficie de 121.5 m². Asimismo se proyectó una iluminación general con lámparas T5 y una iluminación de acento con lámparas dirigibles MR16.

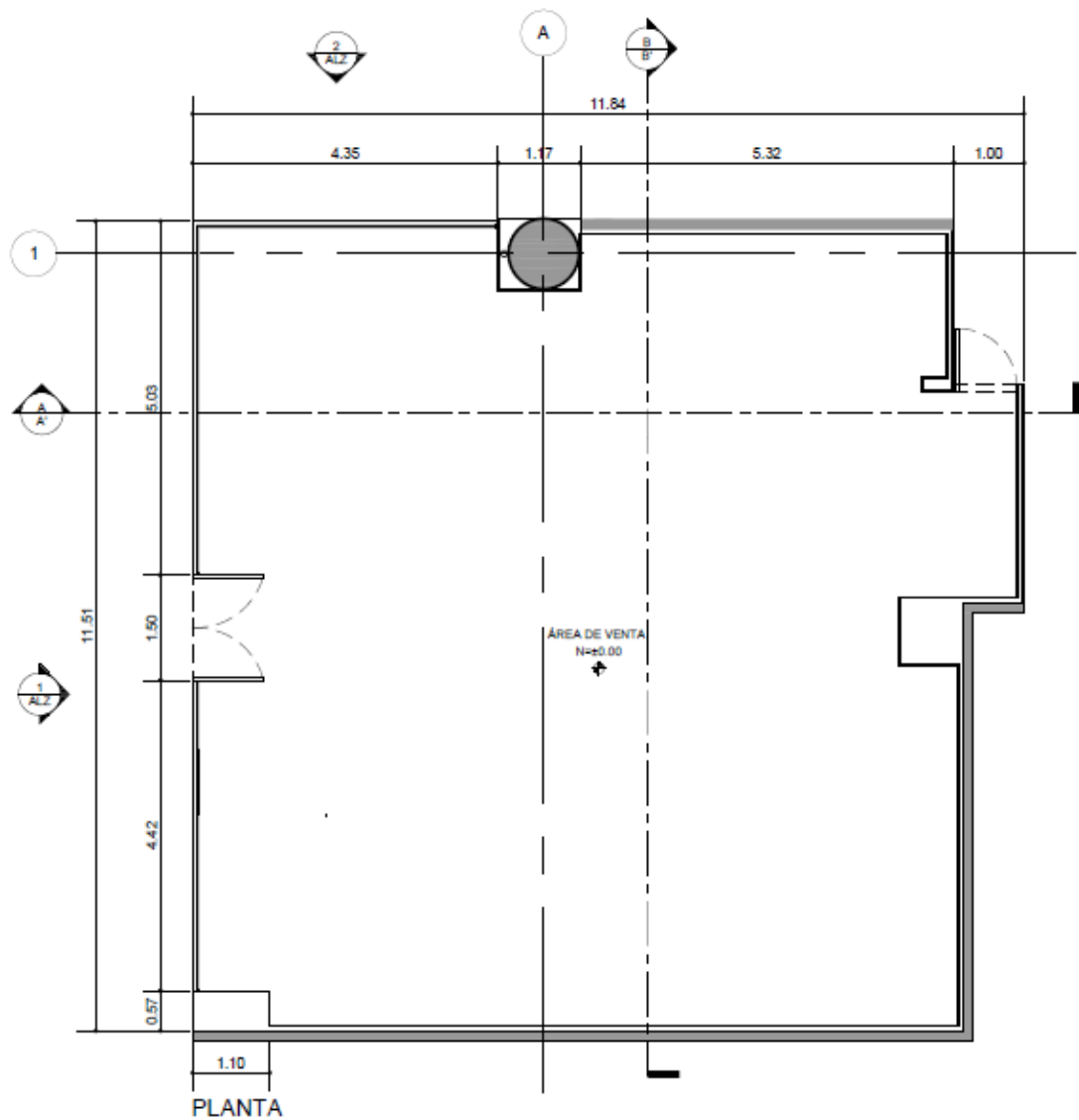


Fig.32. Planta arquitectónica del local. Área de Venta. (Ares Diseño, 2009)

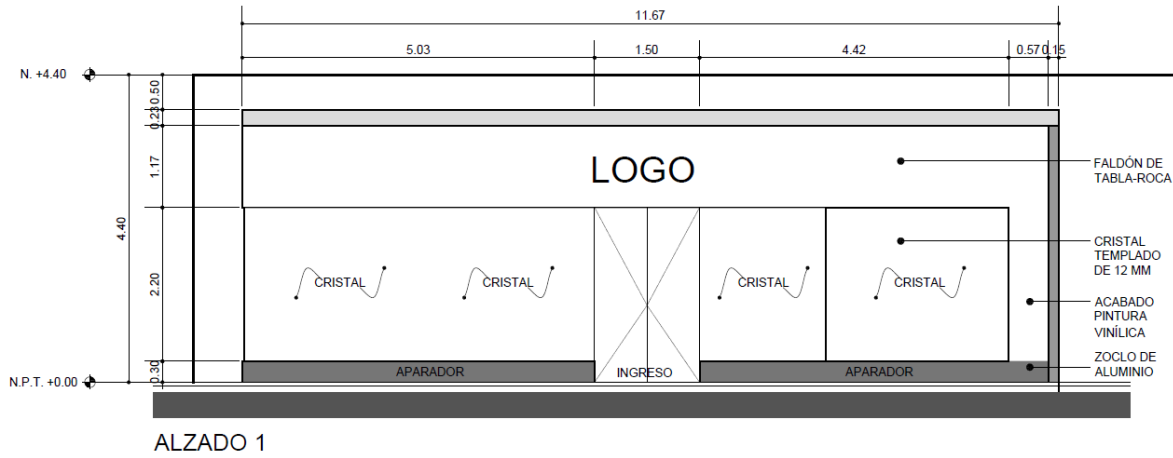


Fig. 33. Alzado principal del local. (Ares Diseño, 2009)

La entrada principal mide 11.67 m de largo con una altura de 4.40 hasta el lecho superior de la losa. Asimismo, la entrada consiste en cristales templados de 10.95 m de longitud por 2.50 m de altura. Por otro lado, el alzado lateral cuenta con 4.34 m de longitud por la misma altura.

En la figura 33 y 34 se representan las secciones del local comercial. La altura al nivel lecho bajo del plafón es de 3.00 m donde se encuentran colocadas las luminarias T5 y MR16. El área de venta del local cuenta con muros lisos con acabado final de pintura vinílica blanca y piso de porcelanato color concreto gris semipulido de 60x60. Asimismo, se colocaron muebles de exhibición color blanco a 0.70 m de altura desde el nivel de piso terminado, lo que nos sirve de referencia para realizar el cálculo de las luminarias y el plano de exhibición a la altura mencionada.

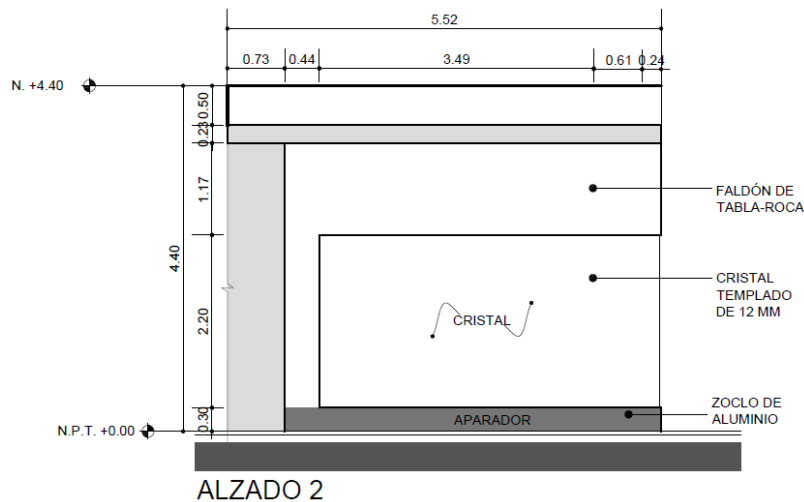


Fig. 33. Alzado lateral del local

Los acabados interiores del local comercial sirvieron como referencia para aplicar el mismo criterio de diseño en la bodega de experimentación en la Unidad de Posgrado.

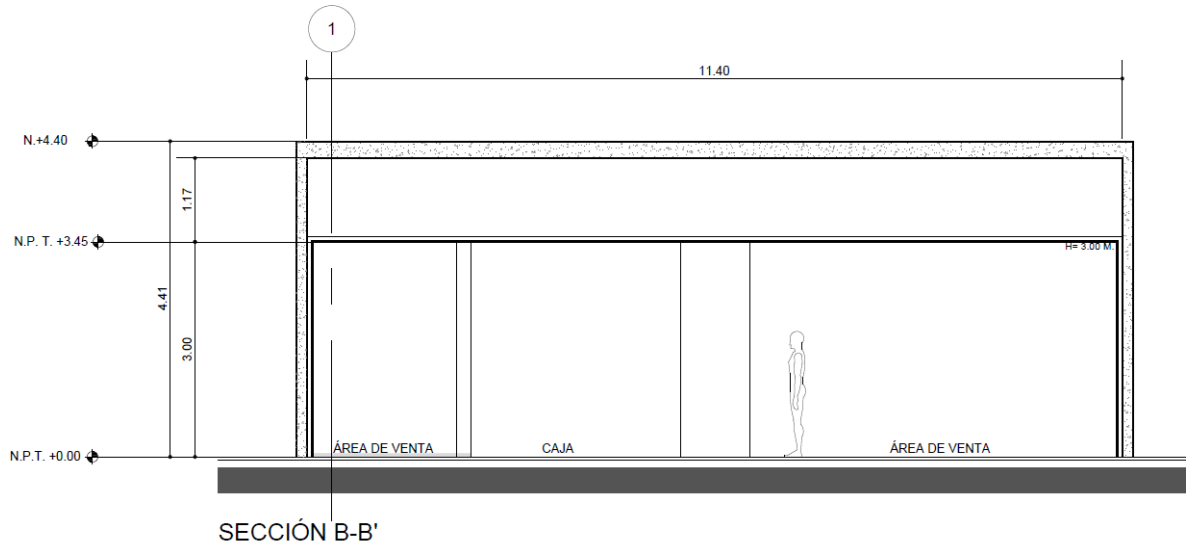


Fig. 34. Sección B del área de venta.

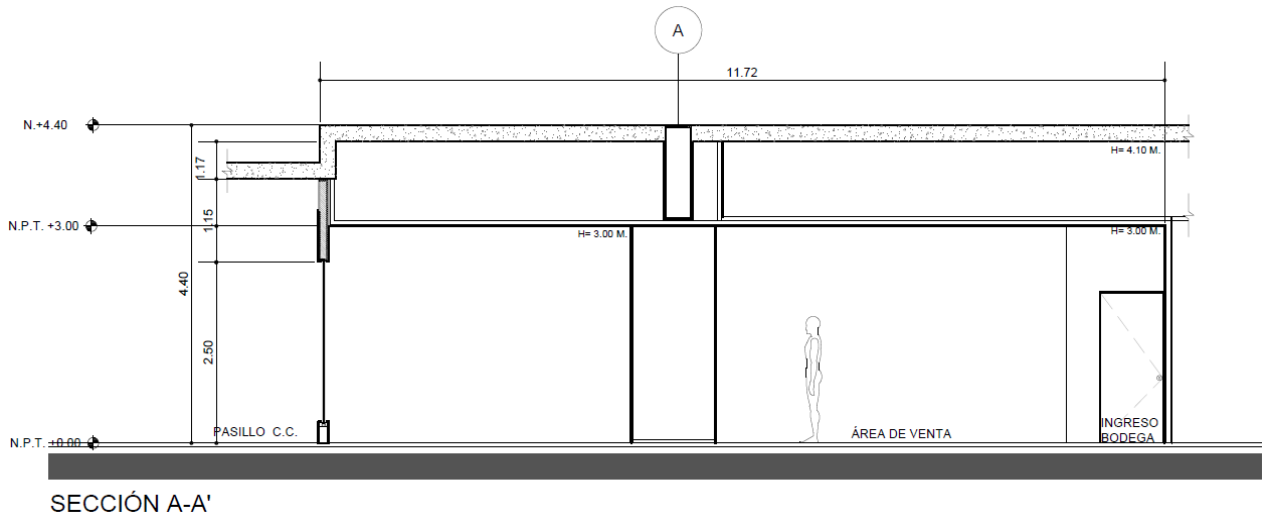


Fig. 35. Sección A del área de venta.

8.2 Zona de prueba

La prueba del TLNA se realizó en la azotea y bodega en el tercer nivel del edificio H de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México cuyas coordenadas geográficas son latitud $19^{\circ}18'33.99''$ Norte y $99^{\circ}11'5.40''$ longitud Oeste, a una altitud de 2268 msnm. Asimismo se adecuó una bodega con una superficie de 27 m² conforme a las características de diseño del caso de estudio.



Fig. 36. Unidad de Posgrado UNAM. Zona de ubicación del TLNA. (Google maps, 2014).

El área de experimentación exterior (azotea) comprende una superficie de 117.80 m² donde se colocó el TLNA 5.74 m del pretil poniente y a 5.95 metros del pretil norte. Asimismo se ubicaron mesas de observación al norte del rastreador solar las cuales se explicarán a detalle más adelante en la metodología.

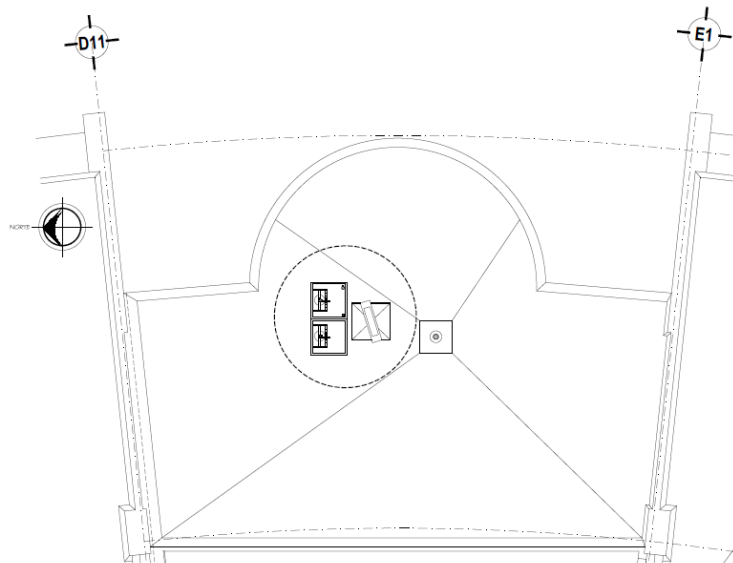


Fig. 37. Azotea de la Unidad de Posgrado. (Dirección General de Obras y Conservación UNAM, 2013).

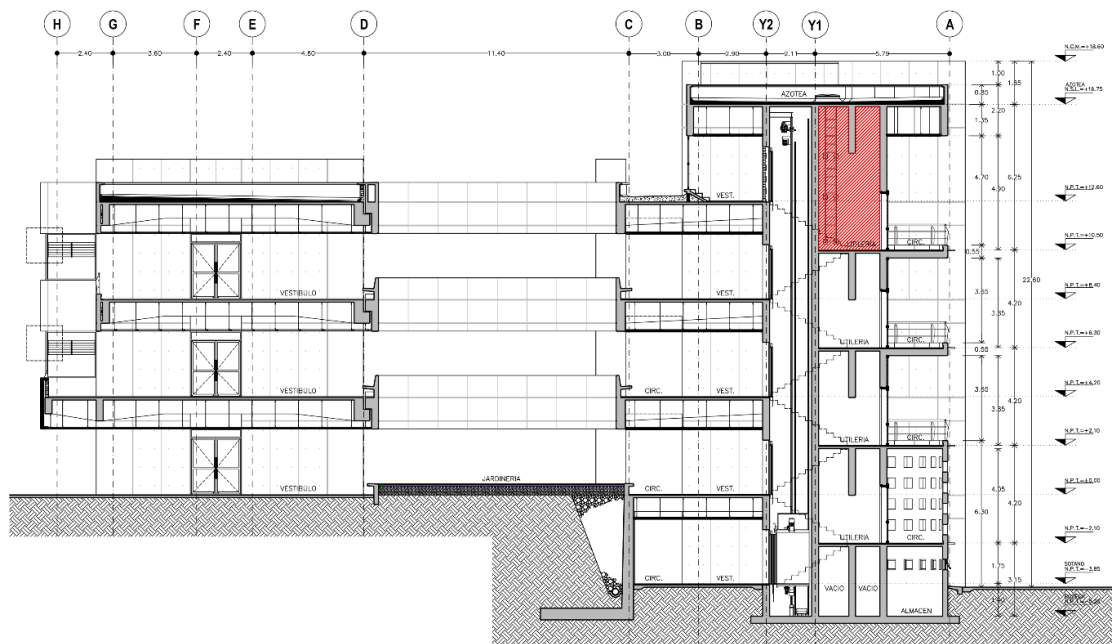


Fig.38. Sección general de la Unidad de Posgrado. Ubicación del lugar de prueba. (Dirección General de Obras y Conservación UNAM, 2013).

El área de prueba interior (bodega) se localiza en el edificio H, nivel +10.50 el cual cuenta con un domo cuya función fue comunicar instalaciones del equipo de medición a la azotea ubicada en el nivel +16.75.

Por otro lado, se aplicó pintura blanca en muros interiores de la bodega, se colocó plafón de tabla-roca a 3.00 m del nivel de piso terminado donde posteriormente se perforó un hueco para la ubicar el luminario híbrido. Asimismo se colocó un panel de tabla-roca para evitar el paso de la luz natural al espacio de experimentación. Luego se fabricó una rejilla de hierro para situar los fotómetros a 0.70 m de altura y realizar las mediciones de iluminancia interior. Igualmente se fabrica una base colocada en la azotea para obstruir cualquier sombra reflejada sobre el rastreador solar y su posición sea la más alta para captar los rayos del sol.



Fig. 39. A) Bodega de experimentación antes de realizar las adecuaciones. B) Bodega adecuada con acabado blanco en muros. C) Luminario Híbrido en plafón.

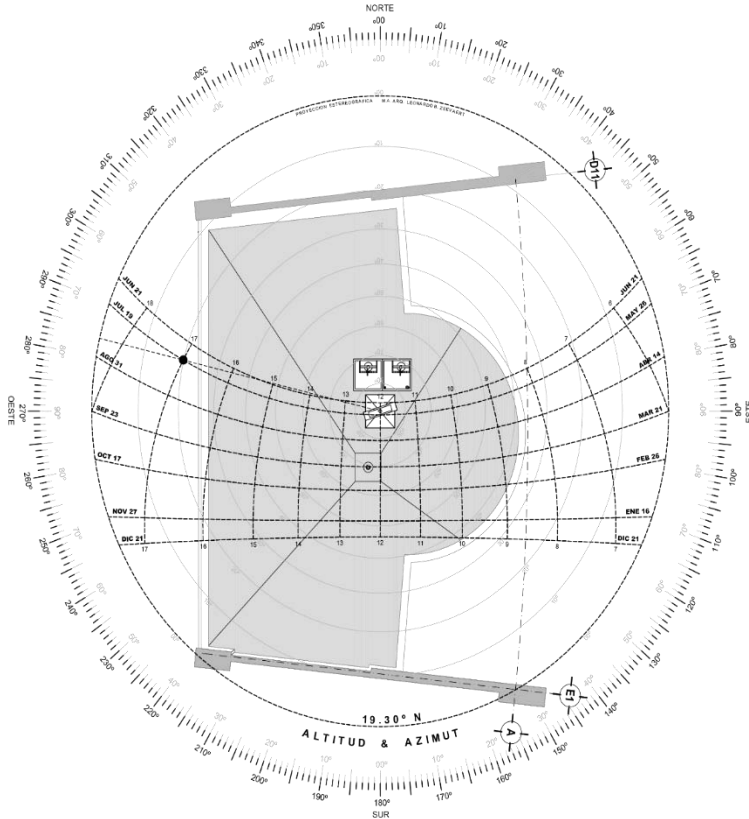


Fig. 40. Trazo de Geometría Solar. (Zeevaert, 2013).

Cabe mencionar que para realizar el trazo de la geometría solar (Fig.40) se deben calcular los ángulos de altitud solar y el azimut (Tabla 10). La hora local difiere 47 minutos de la hora solar, la cual es importante considerar para la correcta orientación de los instrumentos de medición y la correcta colocación del TLNA.

12 de marzo de 2014				13 de marzo de 2014			
Hora Local	Hora solar	Altitud solar	Azimut	Hora Local	Hora solar	Altitud solar	Azimut
06:47	6:00:00	-1.2	86.5	06:46	6:00:00	-1.2	86.9
07:47	7:00:00	12.9	81.4	07:46	7:00:00	13.0	81.8
08:47	8:00:00	26.7	75.4	08:46	8:00:00	26.9	75.8
09:47	9:00:00	40.1	67.4	09:46	9:00:00	40.3	67.9
10:47	10:00:00	52.6	55.3	10:46	10:00:00	52.8	55.8
11:47	11:00:00	62.7	34.3	11:46	11:00:00	63.0	34.8
12:47	12:00:00	67.0	0.0	12:46	12:00:00	67.4	0.0

Tabla 10. Cálculo de hora solar, altitud solar y azimut 12 y 13 de marzo de 2014. (Laboratorio de Interacción con el Medio UNAM, 2014).

9 METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se explica la metodología que se siguió durante la investigación para analizar el comportamiento de un TLNA. El proceso consistió en tres etapas:

1. Etapa experimental o de prueba. Durante la primera fase se comprobó el buen funcionamiento de los instrumentos de medición. Se analizó el comportamiento de un TLNA mediante la medición de datos para obtener la relación de la iluminancia exterior e iluminancia interior.
2. Se obtiene la constante para obtener la relación de la iluminancia interior en relación con las mediciones de la iluminancia exterior del Instituto de Geofísica UNAM durante ocho meses.
3. Se realiza el cálculo de ahorro energético y lumínico del caso base. Así mismo se elaboran varios escenarios para evaluar el comportamiento del TLNA

Esta investigación consistió en la prueba del Transmisor de Luz Natural Activo (TLNA) el cual está conformado por un sistema captador solar compuesto por lentes fresnel. El transmisor consiste en seis cables de fibra óptica y un luminario de luz natural y luz artificial (L2 híbrido).

El objetivo es comprobar el confort visual que puede brindar el TLNA, de acuerdo a los parámetros lumínicos establecidos para un local comercial de acuerdo a la IESNA y obtener el potencial de ahorro energético comparándolo con un sistema lumínico convencional, con la finalidad de establecer estrategias de diseño interior para la venta de productos obteniendo el uso eficiente de energía y ahorro energético.

9.1 Etapa experimental

Antes de iniciar con la etapa de experimental, es necesario probar los instrumentos de medición, para verificar si están calibrados y ver si los datos que arrojan son confiables. Se conectaron los 34 fotómetros marca *Li-Cor*210SA (Fig.43) al datalogger marca Agilent y se tomaron lecturas durante una semana con el objetivo de identificar cuáles instrumentos se encontraban en óptimas condiciones para la prueba del TLNA.



Fig. 41. Prueba de instrumentos



Fig. 42. Piranómetro Kipp&Zonen



Fig. 43. Fotómetro Licor 210SA

Una vez identificados los instrumentos en buenas condiciones, se instalaron el TLNA y los instrumentos de medición en la azotea y en la bodega, después se realizaron las mediciones exteriores e interiores para obtener datos de las siguientes variables:

Variables exteriores

Irradiancia global horizontal

Irradiancia difusa horizontal

Iluminancia global horizontal

Iluminancia global horizontal

Iluminancia difusa horizontal

Variable interior

Iluminancia interior

La primera variable se obtiene mediante la colocación de un piranómetro marca Kipp&Zonen modelo CMP11 (Fig. 42). Asimismo, la iluminancia difusa horizontal se mide con el mismo instrumento, pero el piranómetro se colocó en un aro de sombra CM 121B/C marca Kipp&Zonen, el cual sirve para mantener bajo sombra el instrumento durante el día.

Para obtener la iluminancia global horizontal y la iluminancia difusa horizontal se utilizaron dos fotómetros marca Li-Cor210SA. Asimismo para medir la última variable mencionada, se colocó el aro de sombra de igual marca cuya función es proporcionar sombra durante el día. Cada uno de los instrumentos fue colocado sobre una mesa de observación (Fig. 44).

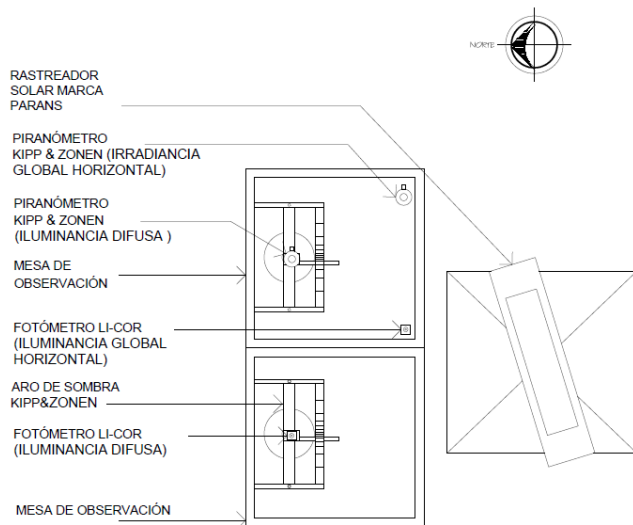


Fig. 44. Mesa de observación



Fig. 45. Orientación norte-sur con plomada y GPS.

De igual manera se colocó el TLNA sobre una base de fierro la cual fue elaborada para cubrir el domo de la bodega de experimentación y evitar la proyección de sombra hacia el aparato de cualquier pretil de la azotea. Cabe mencionar que el TLNA se colocó bajo las especificaciones del manual del proveedor, el cual indica colocar el aparato orientado al sur. Para realizar esta tarea, fue necesario calcular el cenit en el tiempo solar verdadero (12:00 pm) el cual ocurrió a las 12:49 pm Hora local el 4 de marzo de 2014 (Fig. 46).

Después se obtiene la orientación norte-sur con una plomada y se marca una línea recta sobre la base de fierro y sobre las mesas de observación. Posteriormente se comprueba la orientación con un GPS (Fig. 45) con la finalidad de orientar los aparatos con la mayor precisión posible.

LOCALIDAD		CIE, TEMIXCO, MORELOS			
LATITUD:	19.30	GRADOS	FECHA	04-mar-14	
LONGITUD:	99.18	GRADOS	DIA JULIANO	63	
MERIDIANO DE REFERENCIA	90.0	GRADOS			
DECLINACION	-6.77		TIEMPO SOLAR VERDADERO	12.0000	12:00:00
ECUACION DEL TIEMPO	-12.38		AJUSTE EN MINUTOS	49	
DISTANCIA MEDIA	1.02		HORA LOCAL	12:49 p. m.	
PLANO VERTICAL					
AZIMUT	180.0		AMANECER	06:05:59	TSV
VERTICAL	90.0		ATARDECER	17:54:01	TSV

Fig. 46. Cálculo de hora solar de acuerdo a la latitud de la Ciudad de México. Fecha 4 de marzo de 2014

Téngase cuenta que todos los instrumentos y aparatos a probar deben estar en una superficie plana, y de no ser posible, estar bien nivelados en ambos sentidos: longitudinal y transversal.

Por otro lado, se colocaron 12 fotómetros de la misma marca sobre una rejilla de acero a cada 70 cm a lo largo y ancho de la bodega a 70 cm de altura del nivel de piso terminado (Fig.47 y 48). Los fotómetros ubicados en el plano de exhibición miden los luxes emitidos por el luminario L2 Híbrido el cual representa la iluminación general de nuestro caso base.

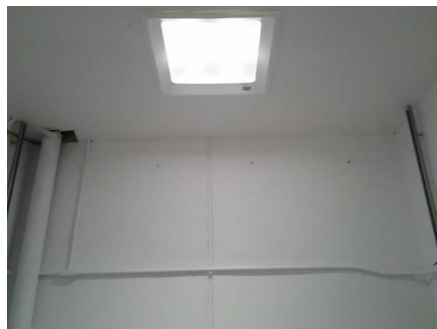


Fig. 47. Difusor de luz natural y luz artificial LED. Interior de bodega de experimentación.



Fig. 48. Colocación de instrumentos de medición y TLNA en la bodega de experimentación.

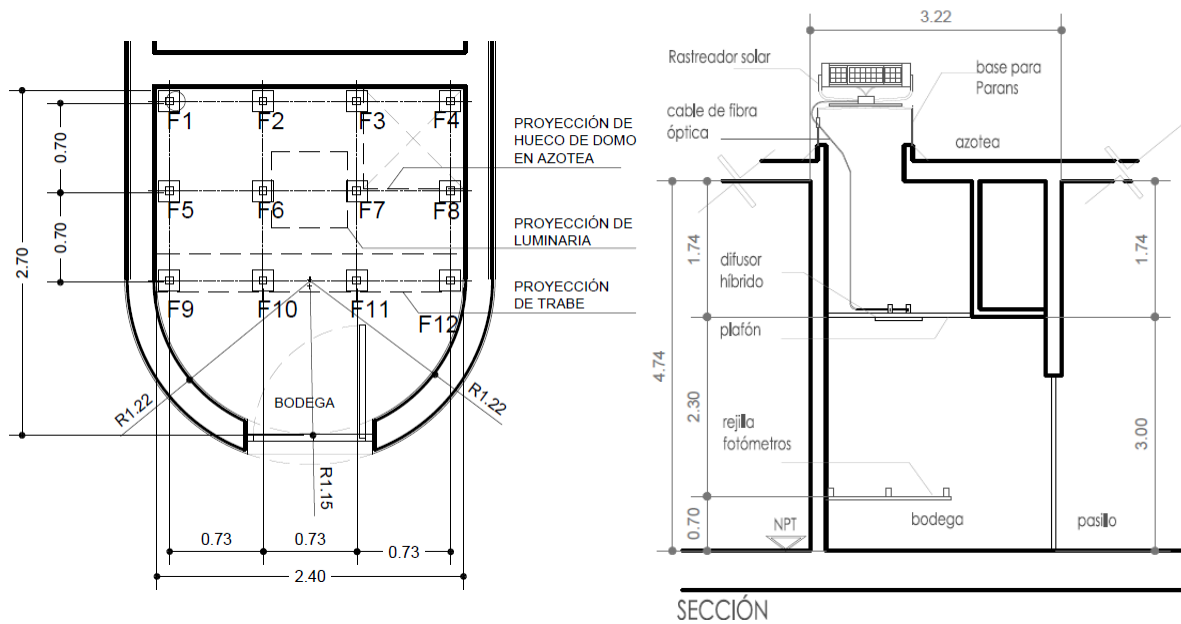


Fig. 49. A) Planta de distribución de fotómetros. B) Sección de bodega de experimentación, ubicación del TLN A y rejilla para fotómetros.

En el interior de la bodega, se colocaron los extremos de dos cables de fibra óptica en el difusor de iluminación híbrida a 3 m de altura del nivel de piso terminado. Como se mencionó anteriormente, la luz natural emitida por el difusor es medida por cada uno de los fotómetros colocados en la rejilla, lo cual nos permitió determinar la cantidad de horas en la que es posible sustituir la iluminación artificial por la iluminación natural mediante la colocación del TLNA. Cabe mencionar que las alturas donde fueron ubicados los fotómetros es de 0.70 m al igual que el plano de exhibición del caso base.

Después se conectaron los instrumentos de medición exterior junto con los fotómetros del interior de la bodega a un adquisidor de datos marca Agilent cuya función es registrar los datos obtenidos por los piranómetros y fotómetros. A su vez el adquisidor es conectado a una PC la cual sirve para bajar los registros a una hoja de cálculo en el programa Excel. Posteriormente se realiza el análisis y procesamiento de los datos capturados.



Fig. 50. Colocación del TLNA e instrumentos de medición. Unidad de Posgrado UNAM

9.2 Relación de iluminancia global horizontal e iluminancia interior

En la segunda etapa de la investigación se obtienen los datos de la irradiancia global horizontal, irradiancia difusa, iluminancia global horizontal e iluminancia difusa durante el periodo del 12 de marzo al 12 de abril de 2014 del Laboratorio de Interacción con el Medio (LIM).

En primer lugar los datos son comparados con el simulador Biosol (Prado, 2011). Los cuales presentaron diferencias considerables a lo largo del día por lo que no se tomó en cuenta para obtener la relación de la iluminancia exterior con la iluminancia interior.

Posteriormente, los datos del LIM son comparados con los registros obtenidos del Observatorio del Instituto de Geofísica UNAM donde la diferencia de datos en porcentaje fue mínima, por lo que se consideran para la simulación de la iluminancia interior durante los ocho meses de medición del mismo instituto.

Se realiza la relación de la iluminancia global horizontal e iluminancia interior de los días 12 y 13 de marzo de 2014 mediante la elaboración de la escala logarítmica en el programa *Excel*. Posteriormente las dos variables se grafican en el programa *Mathematica* (Instituto de Ingeniería UNAM, 2014) para determinar la constante de relación entre ambas.

9.3 Cálculo de ahorro energético y lumínico

La tercera fase de la investigación consiste en el cálculo del ahorro energético y lumínico del caso base. Se calcula el potencial de ahorro del TLNA de acuerdo a las mediciones y simulaciones obtenidos en la etapa 1 y 2 de la investigación.

En este sentido, se realizan los cálculos de *iluminancia interior*, en el software Dialux⁷, donde se inserta el archivo .IES proporcionado por el proveedor, el cual consiste en un luminario requerido para la elaboración del *análisis eléctrico* del caso base (zapatería). Se calcula el *consumo (kWh)* y la *demanda eléctrica (kW)* del local comercial existente, el cual funciona con un sistema de iluminación convencional.

Asimismo se calculan varios escenarios utilizando la iluminación híbrida y se comparan con el sistema de iluminación convencional del caso base, se analizan ventajas, desventajas, potencial de ahorro energético y económico. De igual manera se valora el mejor escenario para realizar la sustitución de luminarios y/o difusores de iluminación natural en el caso base tomando en cuenta las normas mexicanas de iluminación y eficiencia energética así como la norma de la IESNA (Illuminating Engineering Society of North America).

⁷ Programa de cálculo de iluminación gratuito de origen alemán, utilizado por diseñadores de iluminación, arquitectos, técnicos de iluminación y electricistas. Recuperado de: <http://www.dial.de/DIAL/es/dialux/download.html>

10. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO LUMÍNICO

En este capítulo se representan de manera gráfica las mediciones de irradiancia e iluminancia para probar comportamiento del TLNA. Se inicia con la colocación del rastreador en la azotea de la Unidad de Posgrado y el luminario general en la bodega ubicada en el nivel 3 del edificio (caso de estudio).

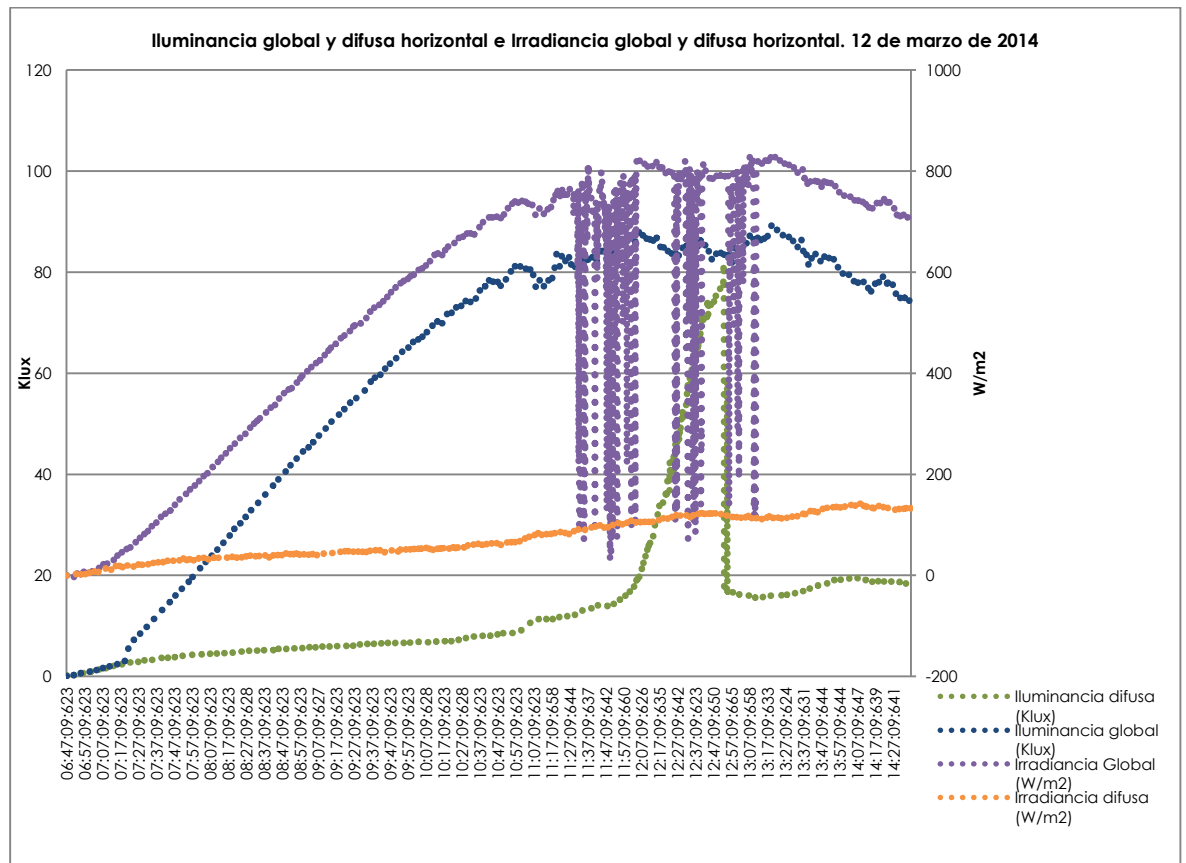
10.1 Resultados

Se obtienen datos y se calcula la irradiancia global y difusa, iluminancia global y difusa e iluminancia interior de un módulo de 27 m³. Después se realiza el análisis eléctrico y análisis económico de un sistema convencional y un TLNA.

En la gráfica 1 se muestran los niveles de irradiancia e iluminancia y del amanecer de acuerdo a la hora local de la Ciudad de México según el Servicio de Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA, 2013).

10.1.1 Resultados de las mediciones reales

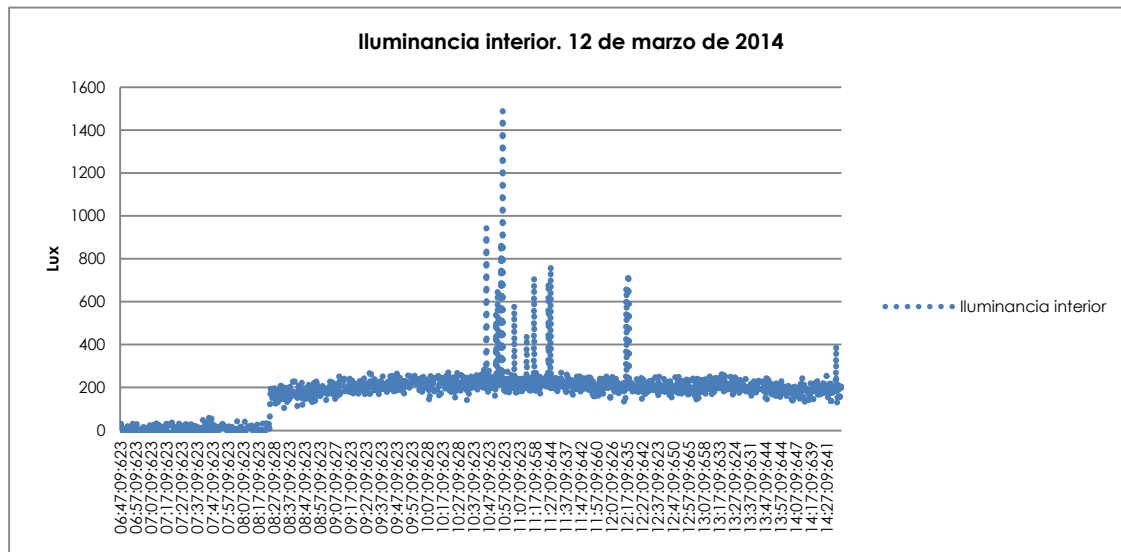
A continuación se presentan los resultados de irradiancia e iluminancia obtenidos en el Laboratorio de Interacción con el Medio (LIM) los días 12 y 13 de marzo de 2014. Posteriormente, se muestran los resultados de las simulaciones de iluminancia interior mediante las ecuaciones desarrolladas (Instituto de Ingeniería UNAM, 2014), de acuerdo a los datos de irradiancia global registrados en el periodo que comprende de octubre de 2013 a abril de 2014 (Instituto de Geofísica UNAM, 2014).



Gráfica 1 Iluminancia global y difusa horizontal e irradiancia global y difusa horizontal del día 12 de marzo de 2014. (Laboratorio de Interacción con el Medio UNAM, 2014).

En la gráfica 1 se representan los niveles de iluminancia e irradiancia del día 12 de marzo hasta las 14:36 horas. De acuerdo a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA, 2014), el amanecer ocurre a las 6:47, la hora del cenit a las 12:46 y el atardecer a las 18:45 horas.

Se obtuvieron mediciones de las siguientes variables: Irradiancia global horizontal con un máximo de 834.32 W/m² las 13:24 horas, una iluminancia global horizontal máxima de 89.29 Klux, la irradiancia difusa horizontal máxima de 142.47 W/m² y la iluminancia difusa máxima de 81.77 Klux. La última variable mencionada, registra datos superiores de iluminancia global horizontal desde las 12:17 a las 12:53 horas. Esto podría deberse a que el fotómetro recibió luz directa y el arillo colocado no proporcionó sombra al instrumento.



Gráfica 2 Iluminancia interior del día 12 de marzo de 2014. (Laboratorio de Interacción con el Medio, UNAM).

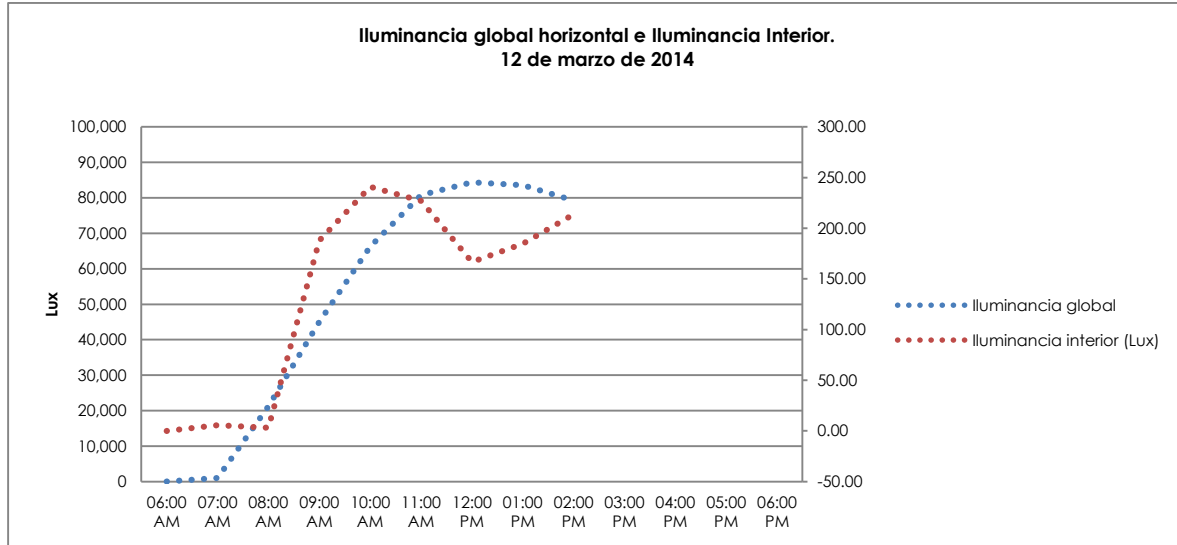
La gráfica 2 muestra los niveles de iluminancia interior de la bodega, durante el mismo horario de la gráfica 1. Se cuenta con mediciones hasta las 14:26 horas, por lo que el resto del día, los datos de iluminancia interior se obtienen a través de simulaciones. Se adquiere una iluminancia interior entre los 200 y 300 luxes en un plano de exhibición de 0.70m a nivel de piso terminado. En este sentido, podemos deducir que el rastreador solar trabaja con la luz difusa que alcanza a recibir del exterior.

El nivel de 1490 luxes alcanzados a las 10:57 horas pudo deberse a la incidencia directa de los rayos del sol desde el lente al orificio de la fibra óptica ubicado en el rastreador. El resto del día, el rastreador solar siguió la trayectoria solar, sin embargo es probable que la luz reflejada en el interior no haya sido directa, por lo que transmitió la luz difusa del exterior.

En la tabla 11 indica el rango de W/m² y Klux que se requieren para alcanzar una iluminancia interior de 200 a 330 luxes con un difusor de 2 cables de fibra óptica, en el interior de un espacio completamente cerrado de 8.20 m².

Variable Exterior	Cantidad	Iluminancia interior
Irradiancia global horizontal	300 a 900 W/m ²	200 a 330 luxes
Irradiancia difusa horizontal	50 a 250 W/m ²	200 a 230 luxes
Iluminancia global horizontal	30 a 90 Klux	200 a 230 luxes
Iluminancia difusa horizontal	5 a 90 Klux	200 a 230 luxes

Tabla 11. Relación de variables iluminancia e irradiancia global y difusa horizontal con iluminancia interior. 12 de marzo de 2014 (LIM, UNAM, 2014).



Gráfica 3. Relación de iluminancia global horizontal e iluminancia interior. 12 de marzo de 2014 (LIM UNAM, 2014).

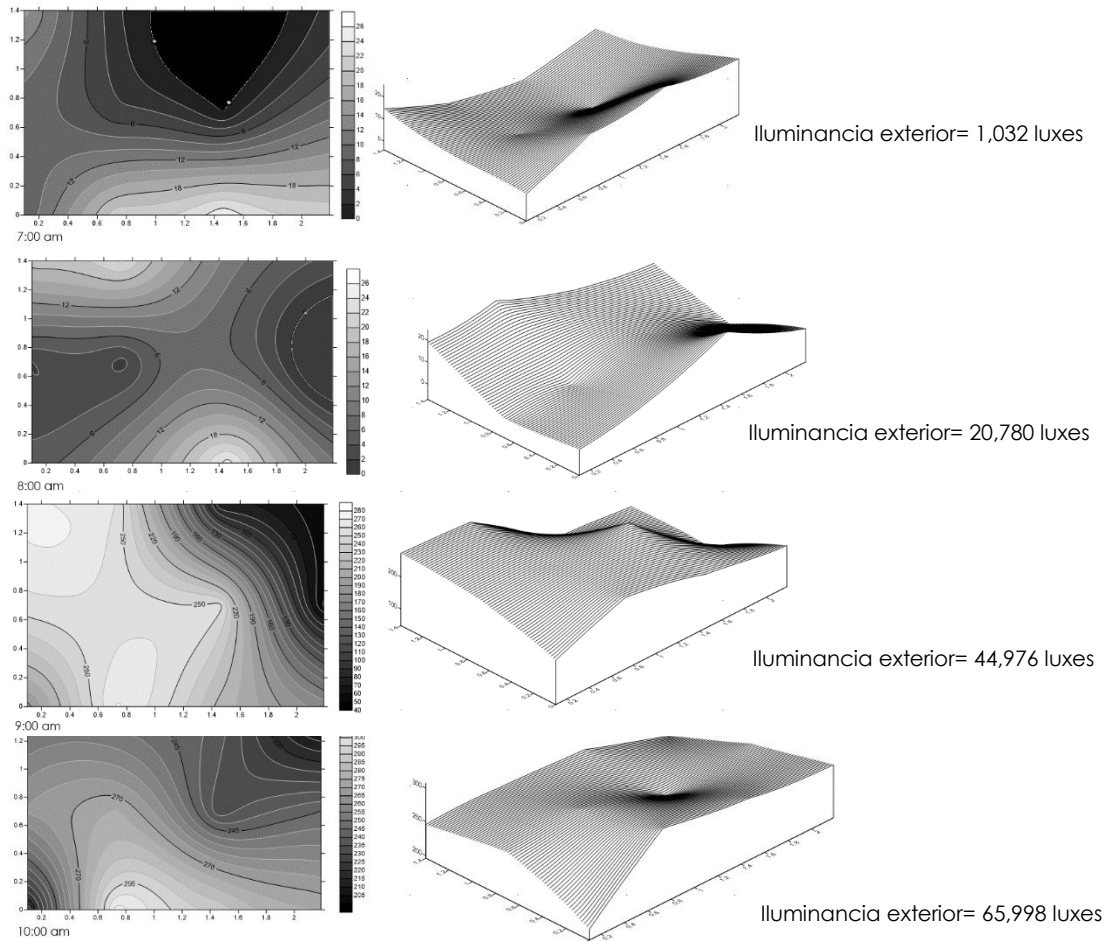
Hora	Iluminancia global (Lux)	Iluminancia interior promedio (Lux)
06:00 a.m.	0.00	0.00
07:00 a.m.	1,032	5.70
08:00 a.m.	20,780	3.10
09:00 a.m.	44,976	187.76
10:00 a.m.	65,998	240.78
11:00 a.m.	80,985	227.15
12:00 p.m.	84,402	166.83
01:00 p.m.	85,165	184.67
02:00 p.m.	79,263	213.91

Tabla 12. Relación de iluminancia global horizontal e iluminancia interior cada hora. 12 de marzo de 2014 (LIM UNAM, 2014).

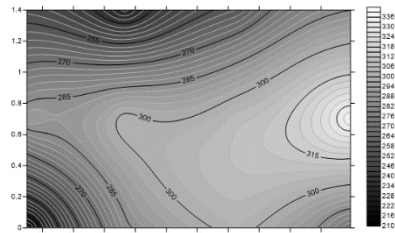
La gráfica 3 muestra la relación de la iluminancia global horizontal y la iluminancia interior por cada hora del día 12 de marzo de 2014. Al igual que la tabla 12 se representa la cantidad de luxes obtenidos a lo largo de la mañana hasta las 14:00 horas. El nivel máximo de iluminancia global horizontal es a las 1:20 horas con 85,165 luxes. Sin embargo el nivel de iluminancia interior promedio alcanza los 166.83 luxes. Se observa que el nivel máximo de *li* es de 240.78 a las 10 am con 65,998 luxes en el exterior.

10.1.2. Iluminancia exterior e interior por hora. 12 de marzo de 2014

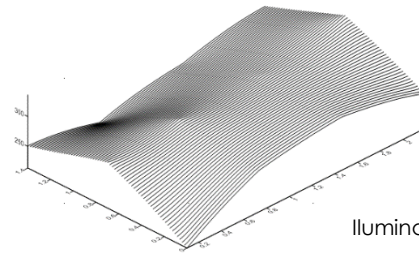
A continuación se muestran las isóneas de las mediciones capturadas en el interior de la bodega de experimentación, las cuales fueron realizadas con el programa Surfer versión 12⁸. Cada rectángulo representa los luxes obtenidos por los 12 fotómetros ubicados en la rejilla colocada a 70 cm de altura del nivel de piso terminado. Asimismo se anexa la gráfica en 3D correspondiente a los recuadros de isóneas de cada hora.



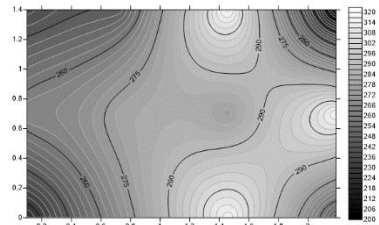
⁸ Software para la representación gráfica en 3d y volumetría. <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>



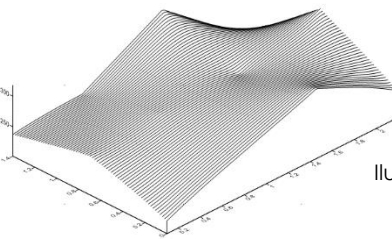
11.00 am



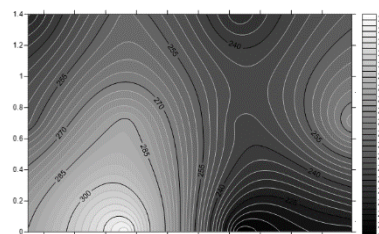
Iluminancia exterior= 80,985 luxes



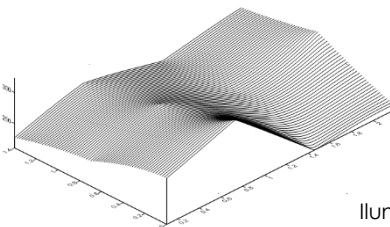
12.00 pm



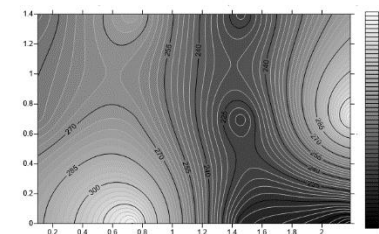
Iluminancia exterior= 84,402 luxes



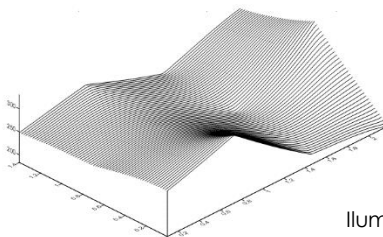
1:00 pm



Iluminancia exterior= 85,165 luxes



2:00 pm



Iluminancia exterior= 79,263 luxes

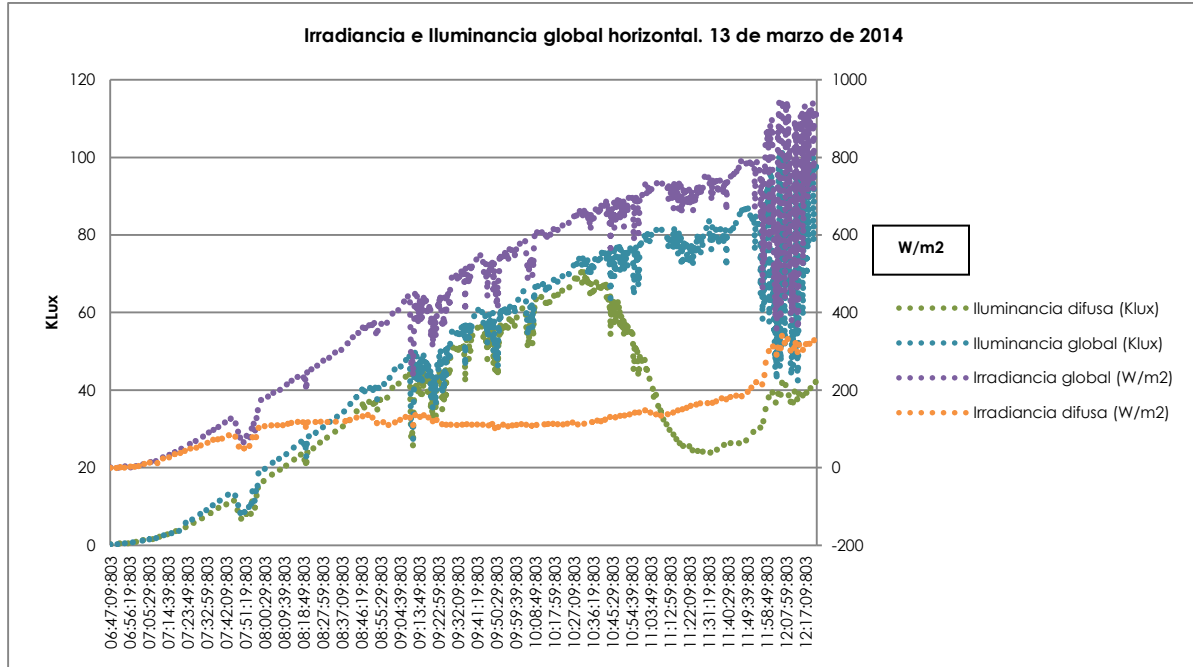
El día 12 de marzo solo fue posible capturar datos hasta las 2 pm por un error de programación en el adquirente de datos. Sin embargo, con las mediciones obtenidas se deduce que conforme aumenta la iluminancia exterior, el nivel de iluminancia interior alcanza los 330 luxes y que el difusor puede ser aprovechado desde las 10 am hasta las 2 pm en la iluminación general de la tienda.

Asimismo en la tabla 13 se muestra la posición y los valores de cada fotómetro capturados en el medio día solar y a la iluminancia máxima a las 1:20 pm hora local. En este sentido se calcula el porcentaje de la iluminancia interior capturada por cada fotómetro con relación a la iluminancia exterior también representada en la tabla. Donde la relación se obtiene de la división de la iluminancia interior entre la iluminancia exterior entre 100.

$$\text{porcentaje de relación} = \frac{\text{iluminancia interior}}{\text{iluminancia global horizontal o exterior}} / 100$$

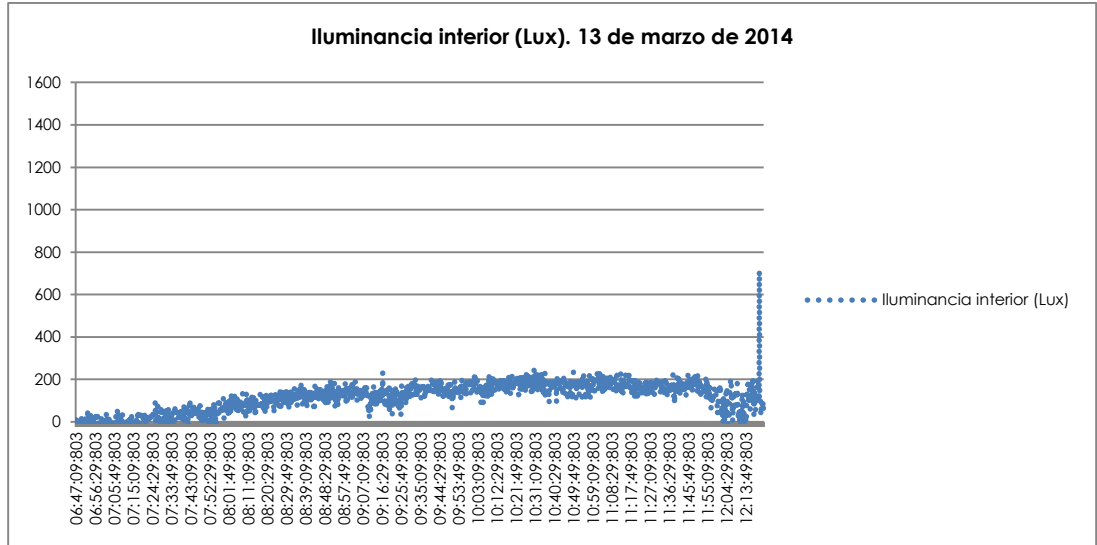
Medio día solar						Iluminancia máxima									
Hora Local	Fotómetro	Posición		Nivel lx interior	Porcentaje con relación a la iluminancia exterior	Hora Local	Fotómetro	Posición		Nivel lx interior	Porcentaje con relación a la iluminancia exterior				
		X	Y					X	Y						
12:46 p. m.	1	0.1	1.4	305.54	0.37	1:20 p. m.	1	0.1	1.4	227.41	0.25				
Tiempo solar verdadero						2						0.73	1.4	297.99	0.36
12:00 p. m.						3						1.46	1.4	268.69	0.32
						4						2.19	1.4	288.26	0.35
						5						0.1	0.7	254.02	0.31
						6						0.73	0.7	274.15	0.33
						7						1.46	0.7	239.16	0.29
						8						2.19	0.7	243.60	0.29
						9						0.1	0	283.27	0.34
						10						0.73	0	258.79	0.31
						11						1.46	0	273.16	0.33
						12						2.19	0	213.72	0.26
Iluminancia global horizontal		82,887	lx	100%		Iluminancia global horizontal		89,286	lx	100%					
Iluminancia difusa horizontal		73,418	lx			Iluminancia difusa horizontal		15,962	lx						
Irradiancia global horizontal		780.56	W/m2			Irradiancia global horizontal		833.55	W/m2						
Irradiancia difusa horizontal		122.76	W/m2			Irradiancia difusa horizontal		113.78	W/m2						

Tabla 13. Relación de iluminancia exterior e iluminancia interior. Mediodía solar e iluminancia máxima del 12 de marzo de 2014.



Gráfica 4. Iluminancia global y difusa horizontal e Irradiancia global y difusa horizontal del día 13 de marzo de 2014. (LIM UNAM, 2014).

En la gráfica 4 se representan los niveles de iluminancia e irradiancia del día 13 de marzo hasta las 12:22 horas. Al igual que en la gráfica 1, el amanecer ocurre a las 6:47, la hora del cenit a las 12:46 y el atardecer a las 18:46 horas (NOAA, 2014). Asimismo se obtienen las cuatro variables: Irradiancia global horizontal con un máximo de 950.96 W/m² las 12:08 horas, una iluminancia global horizontal máxima de 101.79 Klux, la irradiancia difusa horizontal máxima de 344.72 W/m² y la iluminancia difusa máxima de 70.63 Klux. Al igual que el 12 de marzo de 2014, este fue un día despejado, ideal para alcanzar una iluminancia interior óptima de 250 luxes.

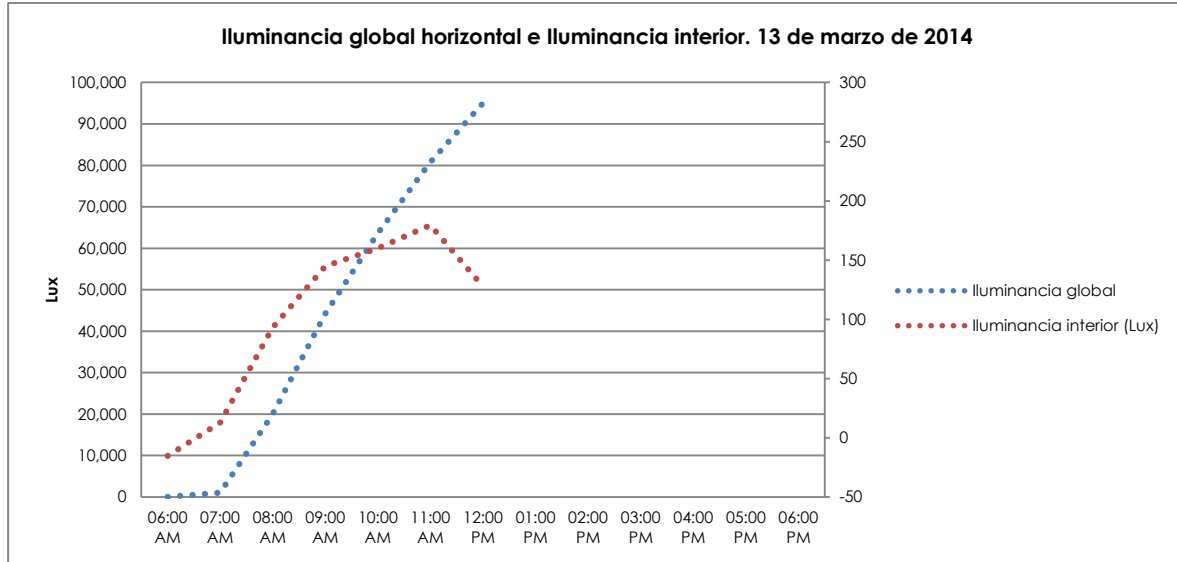


Gráfica 5. Iluminancia interior del día 13 de marzo de 2014. (LIM UNAM, 2014).

La gráfica 5 muestra el nivel de iluminancia interior el día 13 de marzo de 2014. Se adquieren datos hasta las 12:20 horas, el resto de los datos se obtienen a través de simulaciones. Se alcanza una iluminancia promedio de 252 luxes en un plano de exhibición a 0.70 m del nivel de piso terminado. A partir de las 8 horas se aprecia un ascenso en el nivel de iluminancia de 100 luxes y alcanza los 250 luxes a las 10:32 horas. Alrededor de las 12:20 se alcanzan los 713 luxes, al igual que en el caso del día 12 de marzo, es probable que los rayos del sol apuntaron directamente desde el lente al orificio de la fibra óptica del rastreador, y el resto de la mañana se transmitió la luz difusa.

Variable Exterior	Cantidad	Iluminancia interior
Irradiancia global horizontal	400 a 900 W/m ²	200 a 250 luxes
Irradiancia difusa horizontal	150 a 350 W/m ²	200 a 250 luxes
Iluminancia global horizontal	40 a 100 Klux	200 a 250 luxes
Iluminancia difusa horizontal	40 a 60 Klux	200 a 250 luxes

Tabla 14. Relación de variables iluminancia e irradiancia global y difusa horizontal con iluminancia interior. 13 de marzo de 2014(LIM UNAM, 2014).



Gráfica 6. Relación de iluminancia global horizontal e iluminancia interior. 13 de marzo de 2014 (LIM UNAM, 2014).

En la gráfica 6 se representa la relación entre la iluminancia global horizontal y la iluminancia interior en la bodega de experimentación. Se capturaron mediciones hasta las 12:22 horas.

Hora	Iluminancia global	Iluminancia interior promedio (Lux)
06:00 a.m.	0.20	-15.35
07:00 a.m.	1,075.42	12.68
08:00 a.m.	19,922.53	93.12
09:00 a.m.	44,277.08	144.90
10:00 a.m.	63,669.50	160.02
11:00 a.m.	80,783.92	179.49
12:00 p.m.	94,979.51	127.99

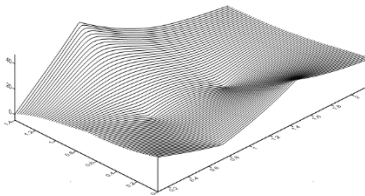
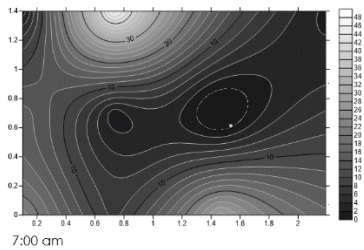
Tabla 15. Relación de iluminancia global horizontal e iluminancia interior. 13 de marzo de 2014 (LIM UNAM, 2014).

Asimismo se muestra la relación de la iluminancia global horizontal y la iluminancia interior por cada hora del día 13 de marzo de 2014. Al igual que la tabla 15 se representa la cantidad de luxes obtenidos a lo largo de la mañana hasta las 12:00 horas. El nivel máximo de iluminancia global horizontal es a las 12:00 horas con 94,979.51 luxes con un nivel de E_i de 127.99 luxes.

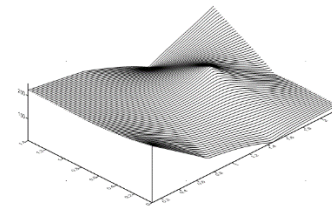
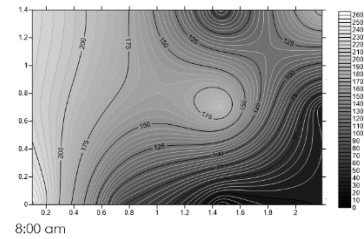
10.1.3 Iluminancia exterior e interior por hora en plano de exhibición. 13 de marzo de 2014

De igual manera se obtienen mediciones del día 13 de marzo de 2014 hasta las 12 pm por error en la programación del adquisidor de datos. Este mismo día el TLNA presenta fallas que no permiten la continuación de la investigación. Sin embargo, se muestran las mediciones hasta el medio día donde la iluminancia exterior alcanza los 90,318 luxes con una iluminancia interior máxima de 330 luxes.

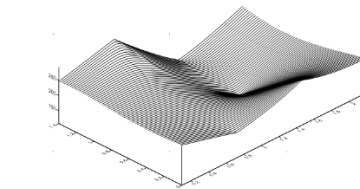
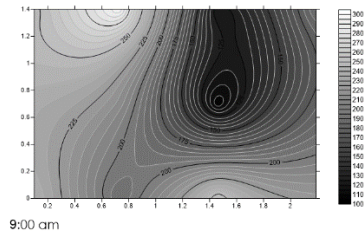
Así como las mediciones presentadas el día anterior, es posible utilizar el difusor de luz natural desde las 10 am hasta las 12 pm con un nivel óptimo para la iluminación general de la tienda.



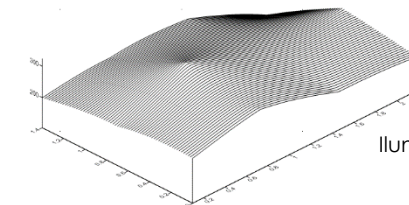
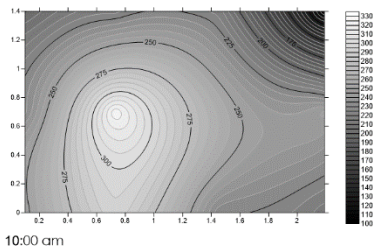
Iluminancia exterior= 1,075 luxes



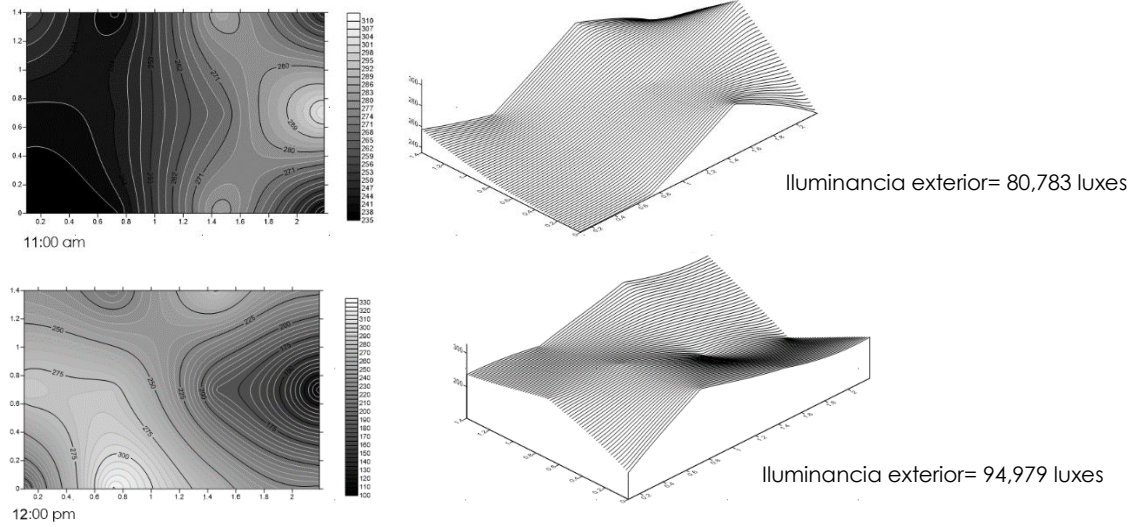
Iluminancia exterior= 19,922 luxes



Iluminancia exterior= 44,277 luxes



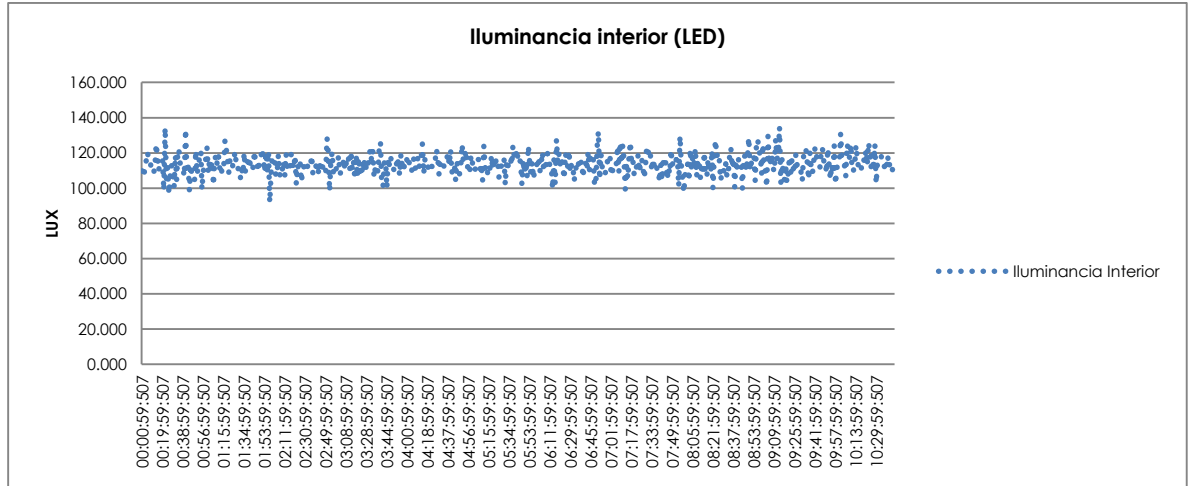
Iluminancia exterior= 63,669 luxes



Asimismo en la tabla 16 se muestra la posición y los valores de cada fotómetro capturados en la iluminancia máxima a las 11:33 pm hora local. En este sentido se calcula el porcentaje de la iluminancia interior capturada por cada fotómetro con relación a la iluminancia exterior también representada en la tabla. Donde la relación se obtiene de la división de la iluminancia interior entre la iluminancia exterior entre 100. $porcentaje\ de\ relación = \frac{iluminancia\ interior}{iluminancia\ global\ horizontal\ o\ exterior} / 100$

Iluminancia máxima (hasta las 12:22 pm HL)					
Hora Local	Fotómetro	Posición		Nivel lx interior	Porcentaje con relación a la iluminancia exterior
		X	Y		
11:33 a. m.	1	0.1	1.4	235.67	0.23
Tiempo solar verdadero	2	0.73	1.4	210.71	0.21
12:05 p. m.	3	1.46	1.4	276.61	0.27
	4	2.19	1.4	229.11	0.23
	5	0.1	0.7	285.2	0.28
	6	0.73	0.7	280.14	0.28
	7	1.46	0.7	179.04	0.18
	8	2.19	0.7	105.84	0.10
	9	0.1	0	185.37	0.18
	10	0.73	0	326.77	0.32
	11	1.46	0	263.2	0.26
	12	2.19	0	228.25	0.22
Iluminancia global horizontal		101,792	lx	100%	
Iluminancia difusa horizontal		41,900	lx		
Irradiancia global horizontal		950.96	W/m2		
Irradiancia difusa horizontal		340.49	W/m2		

Tabla 16. Relación de iluminancia exterior e iluminancia interior. Mediodía solar e iluminancia máxima del 12 de marzo de 2014.

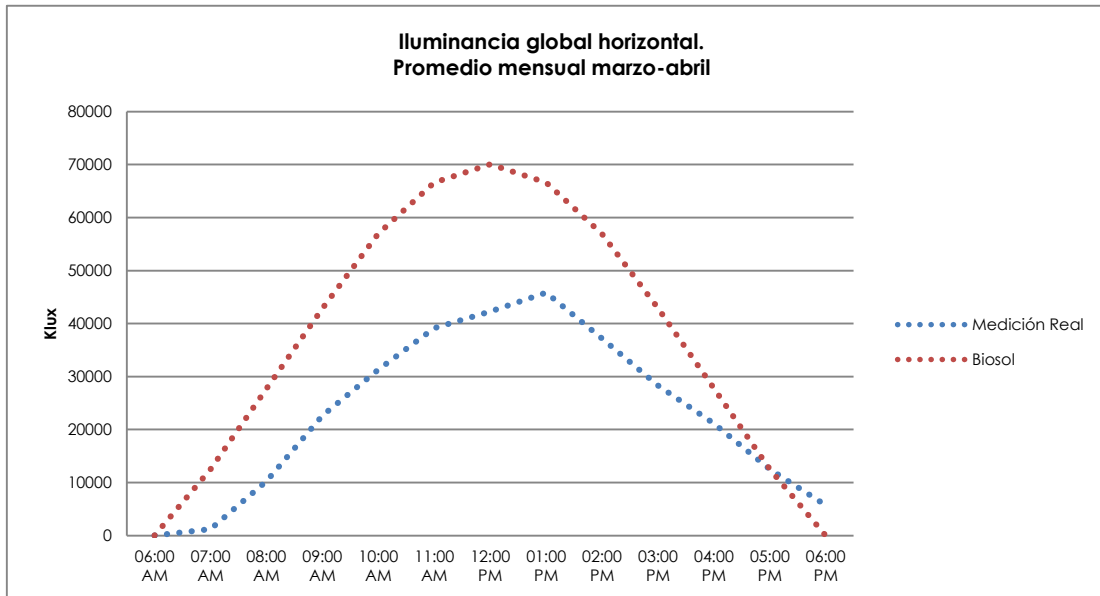


Gráfica 6. Iluminancia interior del difusor LED día 8 de abril de 2014. (LIM UNAM, 2014).

En la gráfica 6 se representa el nivel de iluminación alcanzado con la instalación del luminario LED. Se adquiere un promedio de 113 luxes en un plano de exhibición a 0.70m del nivel de piso terminado. Se considera un nivel bajo para utilizarlo en una tienda departamental, incluso no es recomendable en una tienda de nivel alto donde se requieren solo 250 luxes para mostrar un artículo.

10.2 Resultados del Simulador Biosol

En primer lugar, se comparan los resultados de las mediciones reales contra los datos arrojados por el simulador Biosol desarrollado en el Instituto de Ingeniería para después suponer el nivel de iluminancia interior en el resto del año. Sin embargo, se decide recurrir a los datos del Instituto de Geofísica para así, desarrollar una relación para elaborar el resto de las simulaciones. Se toman las coordenadas de la ubicación de la estación meteorológica del Instituto de Geofísica de la UNAM: 19°20'01" latitud Norte y 99° 11' 54" longitud Oeste, a una altitud de 2268 msnm en el simulador Biosol para obtener los datos de las proyecciones durante ocho meses (ver anexos).



Gráfica 7. Promedio mensual periodo de marzo a abril. Comparación de resultados de la Iluminancia global horizontal.

En la gráfica 7 se muestran los datos de cada hora obtenidos durante el periodo de marzo a abril de 2014. Las mediciones se comparan contra los datos arrojados por el simulador Biosol. Se aprecia una diferencia considerable entre las líneas de la gráfica. En la tabla 17 se muestra la diferencia en Klux y en porcentaje. Nótese que la diferencia en porcentaje máximo es del 40%, por lo que no podemos tomar como válido el simulador para proyectar el comportamiento del TLNA y la simulación de los niveles de iluminación interior durante un año.

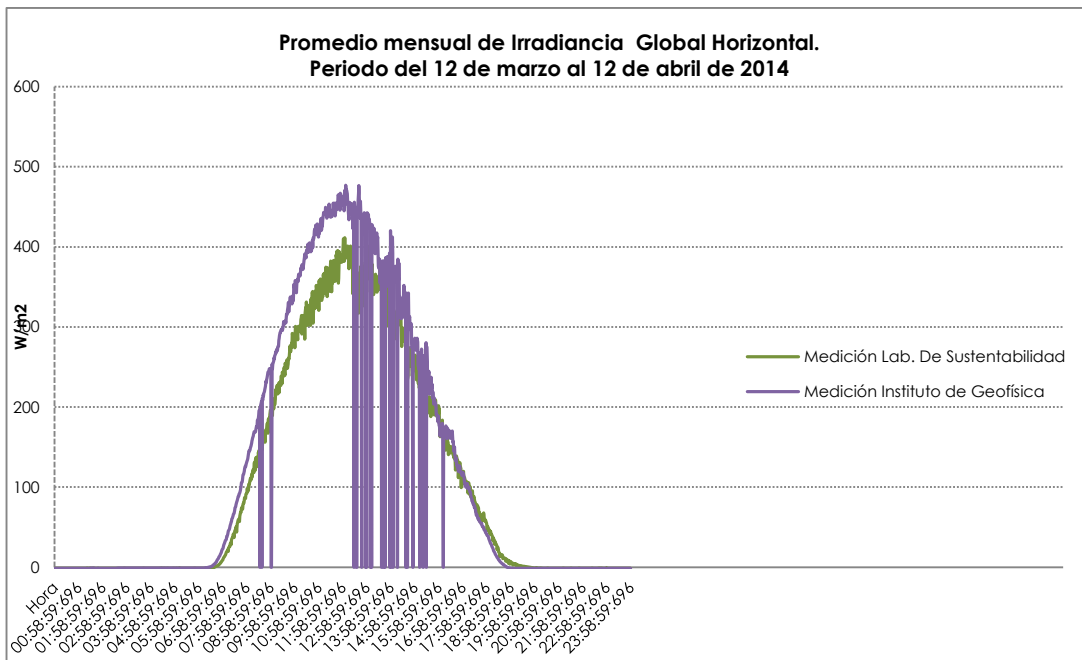
Hora	Medición Real	Biosol	Diferencia en Klux	Porcentaje
06:00 a.m.	0.01	0.00	-0.01	0
07:00 a.m.	1185.19	12489.03	11303.84	16
08:00 a.m.	10259.29	27702.88	17443.60	25
09:00 a.m.	22634.06	42903.08	20269.03	29
10:00 a.m.	31285.83	56914.61	25628.78	37
11:00 a.m.	39134.75	66587.01	27452.26	39
12:00 p.m.	42280.29	70044.10	27763.80	40
01:00 p.m.	45851.35	66599.16	20747.81	30
02:00 p.m.	37226.72	56940.98	19714.26	28
03:00 p.m.	28339.37	42942.13	14602.77	21
04:00 p.m.	21145.58	27753.29	6607.71	9
05:00 p.m.	12518.93	12518.93	0.00	0
06:00 p.m.	5735.76	0.00	-5735.76	-8

Tabla 17 .Diferencia en Klux y porcentaje de las mediciones reales y datos del simulador Biosol. (LIM UNAM, 2014 & Preciado, 2011).

10.3 Mediciones LIM UNAM e Instituto de Geofísica UNAM

Debido a la diferencia del 50% entre las mediciones del LIM y el simulador Biosol, se consultan los datos procesados en el Instituto de Geofísica, UNAM con la finalidad de elaborar una constante de relación que nos permita simular la iluminación interior de un espacio cerrado durante todo el año, de acuerdo a los datos que se obtuvieron los días 12 y 13 de marzo de 2014.

Posteriormente se comparan solo las mediciones de irradiancia global horizontal obtenidas en el LIM y los adquiridos en el Observatorio de Geofísica, debido a la confiabilidad de los datos. Después éstos se promedian durante el periodo de 12 de marzo al 12 de abril de 2014 (gráfica 8).



Gráfica 8. Promedio mensual periodo de marzo a abril. Comparación de resultados de la Iluminancia global horizontal.

En la gráfica 8 se aprecia la diferencia entre las dos curvas, y en la tabla 18 se valora la diferencia máxima en porcentaje la cual es del 21% a las 11:00 horas. Por esta razón se toman los datos medidos en el Observatorio para calcular la relación entre variables y desarrollar las simulaciones de iluminación interior (Ver anexos).

Hora	LIM	I. Geofísica	Diferencia en W/m ²	Diferencia en Porcentaje
06:00	-1.29	-0.92	0.37	0
07:00	8.38	22.23	13.85	3
08:00	91.79	129.05	37.25	8
09:00	92.17	131.61	39.44	8
10:00	196.30	248.19	51.89	11
11:00	320.81	420.02	99.21	21
12:00	382.29	452.75	70.46	15
13:00	396.76	436.41	39.65	8
14:00	344.86	420.07	75.21	16
15:00	254.40	282.48	28.08	6
16:00	201.50	188.63	-12.88	3
17:00	104.19	116.68	12.49	3
18:00	52.57	40.04	-12.53	3
19:00	6.89	-1.25	-8.14	2

Tabla 18. Diferencia de mediciones en Klux. (LIM UNAM & Instituto de Geofísica, 2014).

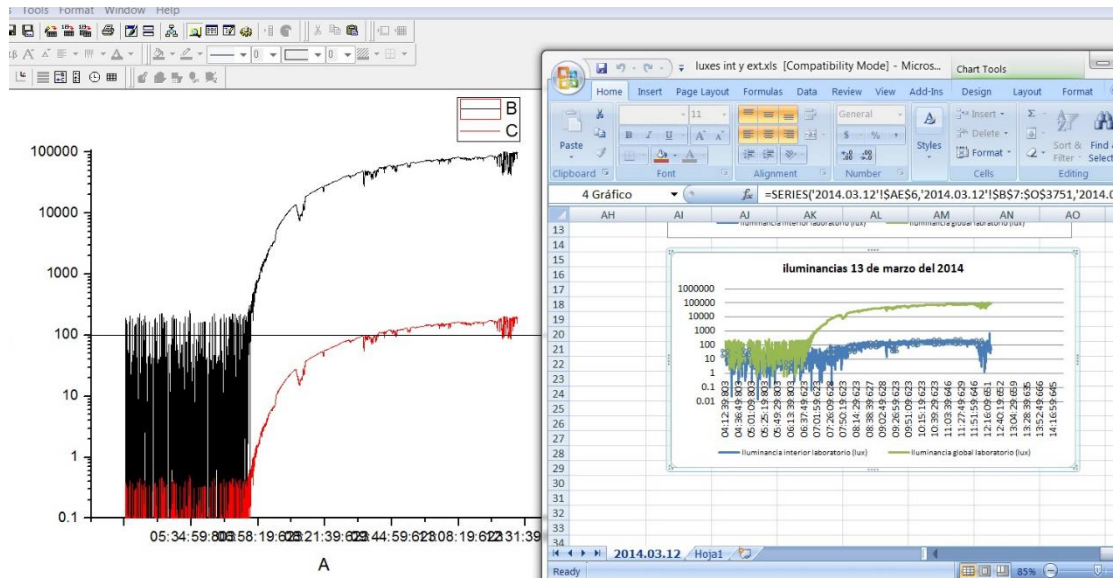
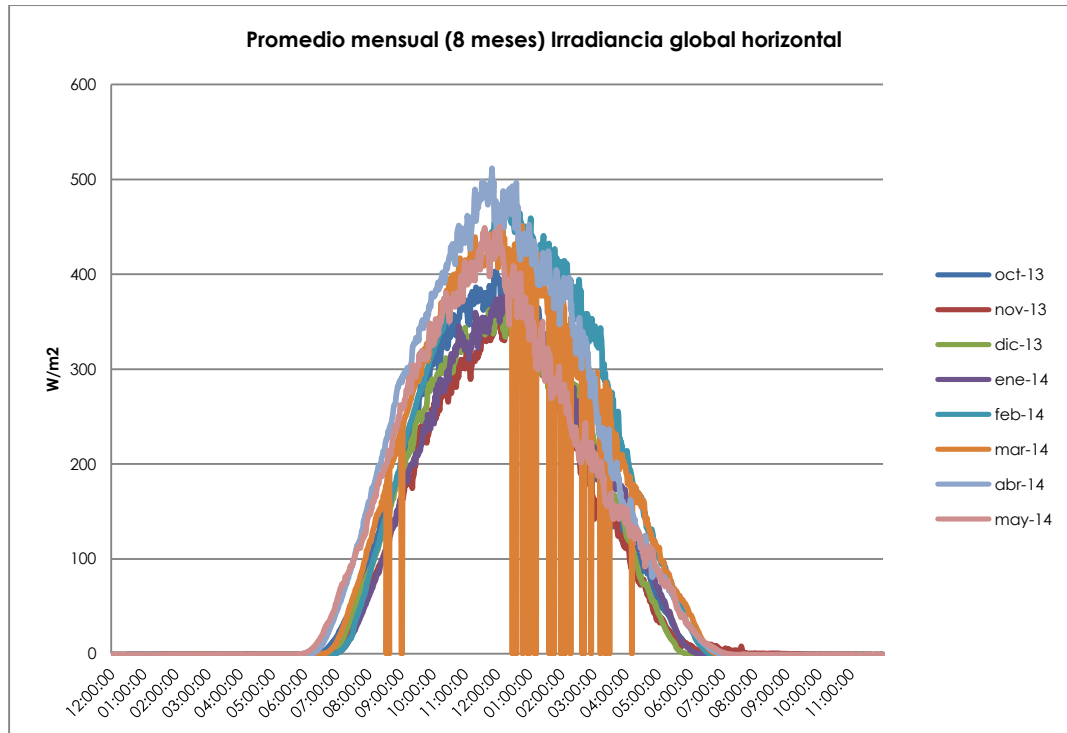


Fig. 51. Izquierda: Cálculo de relación entre Iluminancia exterior e iluminancia interior. Derecha: Escala logarítmica de mediciones día 12 y 13 de marzo de 2014.

Debido a que solo se obtuvieron mediciones del día 12 y 13 de marzo de 2014 hasta las 2 pm y 12 pm respectivamente, se toman como referencia las mediciones del día 13 de marzo de 2014. En este sentido se calcula la escala logarítmica y se introducen los mismos datos al software Mathematica. La imagen de la derecha representa la escala logarítmica de las mediciones reales (LIM UNAM, 2014), donde

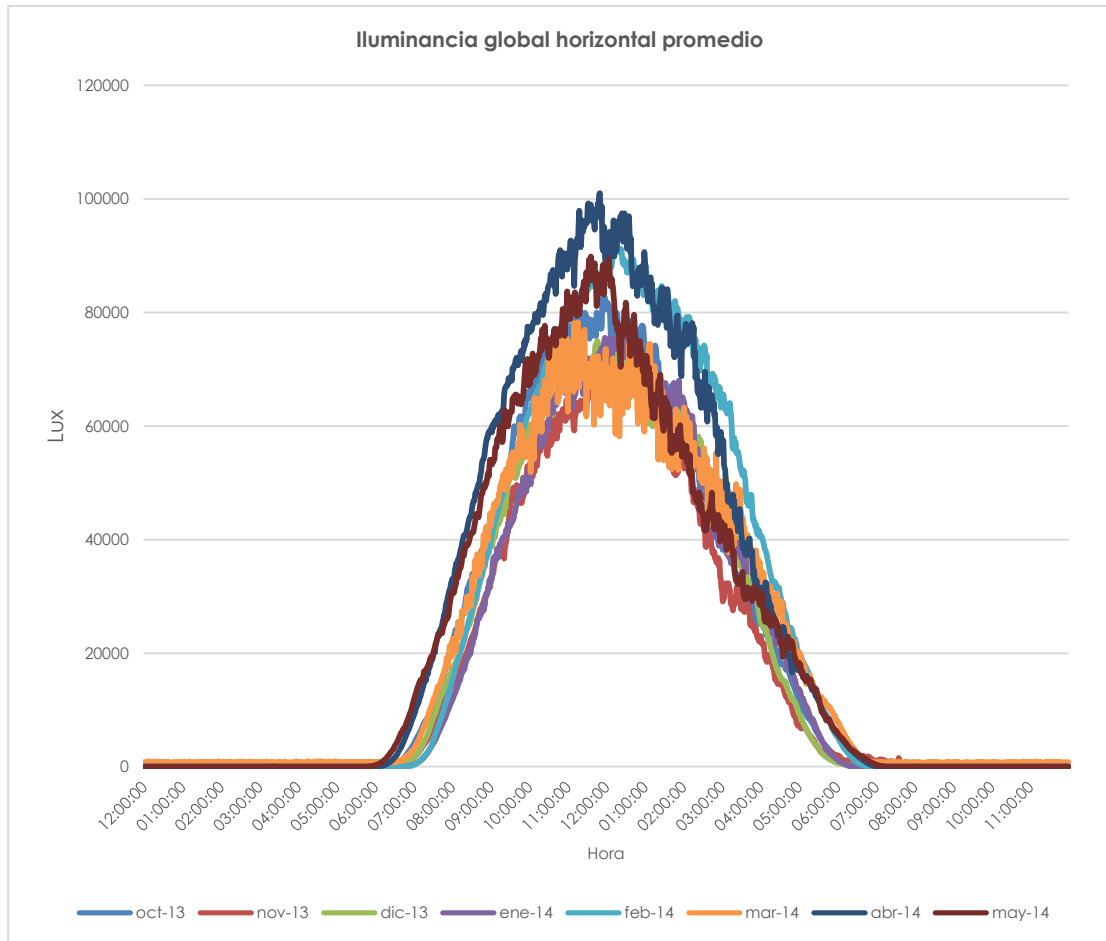
la línea verde muestra la iluminancia global horizontal y la línea azul muestra la iluminancia interior promedio. Posteriormente se introducen los datos de iluminancia global horizontal en el programa Mathematica para calcular la constante que simulará la iluminancia interior promedio. En este sentido, la línea negra de la imagen del lado izquierdo representa las mediciones reales, y la línea roja marca una tendencia similar a la de la línea azul de la imagen derecha. De esta manera obtenemos la constante de 500 unidades que se utiliza para simular la iluminancia interior del periodo del mes de octubre de 2013 a mayo de 2014 con los datos proporcionados por el Instituto de Geofísica UNAM (ver anexos apartado 13).



Gráfica 9. Irradiancia global periodo octubre de 2013 a mayo de 2014. (Instituto de Geofísica UNAM, 2014).

Asimismo se calculó el promedio de Irradiancia global horizontal durante del periodo de octubre de 2013 a mayo de 2014 (gráfica 9) donde se aprecia una irradiancia mínima en el mes de noviembre donde alcanza los 350 W/m. Cabe mencionar que el nivel de irradiancia asciende conforme transcurren los meses hasta abril y mayo de 2014 con una irradiancia máxima mensual promedio que alcanza los 500 W/m².

En la gráfica 10 se muestran los niveles de iluminancia global horizontal promedio durante los meses de octubre de 2013 a mayo de 2014. Al igual que la irradiancia, se perciben valores ascendentes con una iluminancia mínima en el mes de noviembre y una iluminancia máxima en el mes de abril la cual alcanza los 100,000 luxes. Cada una de las curvas obtienen su nivel máximo entre la 10 y 15 horas, periodo en el cual se puede aprovechar la luz natural captada por el TLNA.



Gráfica 10. Iluminancia global horizontal promedio periodo octubre de 2013 a mayo de 2014. (Instituto de Geofísica UNAM, 2014).

10.4 Comparación de resultados de las investigaciones anteriores

Los estudios de la Universidad de Liverpool muestran los resultados del comportamiento de un TLNA SP1 (Parans primera generación). A continuación se mencionan los aspectos a considerar en el experimento:

- Se coloca un captador solar fijo con 35° de inclinación hacia el sur. Acabado en piso gris oscuro y plafón negro mate. Módulo de $3 \times 1.8 \times 2.20$ medidas capturadas por goniómetro ubicados de 0 a 90°
- Se utilizan cuatro cables de fibra óptica de 20 m al luminario, horas de sol de 10:50 a 17:50
- Se mide la Iluminancia global horizontal e iluminancia interna, esta última a 0.20 m del nivel de piso terminado

Rango de iluminancia externa (klux)	Promedio de iluminancia externa (klux)	Promedio de iluminancia interna (lux)
$Y > 100$	107.3	780
$90 < Y \leq 100$	94.9	764
$80 < Y \leq 90$	84.9	714
$70 < Y \leq 80$	75.4	627
$60 < Y \leq 70$	65.5	490
$50 < Y \leq 60$	55.1	353
$40 < Y \leq 50$	45.8	165
$30 < Y < 40$	36.0	63
$20 < Y \leq 30$	25.6	16
$10 < Y \leq 20$	15.3	12
$Y \leq 10$	7.3	14

Tabla 19. Iluminancia global horizontal externa correspondiente a la iluminancia interna 2 m debajo del centro del luminario. (Mayhoub, 2011).

En la tabla 19 se muestran las mediciones realizadas por el Dr. Mayhoub en el año 2011 en la Universidad de Liverpool, donde se instaló el colector de luz (diseño anterior al utilizado en esta investigación). Se obtiene la relación de la iluminancia global horizontal externa en kiloluxes y la iluminancia interna promedio en luxes. Se observa que si se tenemos una iluminancia global mayor a 50 kiloluxes, obtenemos una iluminancia interna óptima para una oficina, pero bajo para la iluminación general de una tienda departamental. Sin embargo, alcanzaría los niveles para el diseño de una iluminación acentuada. En este caso se probó un luminario L1 marca Parans, el cual proporcionó estos niveles de iluminancia.

<p>Universidad de Uppsala, Suecia SISTEMA ACTIVO SP3</p>	<p>Universidad Autónoma de México SISTEMA PASIVO</p>	<p>Universidad Autónoma de México Sistema activo</p>
<p>• 95,000 a 130,000 lux = 500 lux con un parans SP3 10 m cable de fibra óptica</p>	<p>• Cielo despejado iluminancia exterior de máxima de 94.258 luxes iluminancia interior de 620 luxes</p>	<p>• Cielo despejado Iluminancia exterior máxima 94,979 luxes iluminancia interior máxima 330 luxes</p>

11. AHORRO ENERGÉTICO Y ECONÓMICO

A continuación se calcula el potencial de ahorro energético del TLNA y se describen varios escenarios donde se representan diseños de iluminación interior en la zapatería y el caso de estudio según los parámetros lumínicos del proveedor. Asimismo se realiza un cálculo energético y económico de acuerdo a cada propuesta para demostrar las ventajas y desventajas de un sistema de iluminación convencional y un sistema de iluminación híbrida.

En nuestro país, las tarifas eléctricas se encuentran divididas en tres regiones, y el costo difiere según el sector. El sector al que pertenece nuestro caso base es el comercial, asimismo se encuentra ubicado en la Ciudad de México por lo que la tarifa corresponde a la región central del país. En este sentido se buscó la tarifa eléctrica de acuerdo a las características antes mencionadas, la cual corresponde a la tarifa 2 (rango de 1 a 25 kW) con un costo de 2.304 pesos (agosto de 2014) ya que el caso base opera mediante una carga de baja tensión y la demanda del local es de 2.87 kW.

Con base a la tarifa eléctrica se evalúa el ahorro energético y económico en varios escenarios donde se realiza el cálculo lumínico con las luminarias de acuerdo a los parámetros del proveedor.

11.1 Caso base

El caso base se encuentra conformado por 25 luminarias T5 las cuales componen la iluminación general de la zapatería. Asimismo 42 luminarias MR16 halógenas integran la iluminación direccional que sirve de acento a los artículos en exhibición en un plano de 0.70 m de altura. En consecuencia, se realiza una simulación en el programa Dialux para visualizar los niveles de iluminación de referencia y realizar diferentes escenarios convenientes para lograr un ahorro energético y calcular el tiempo de retorno de inversión.

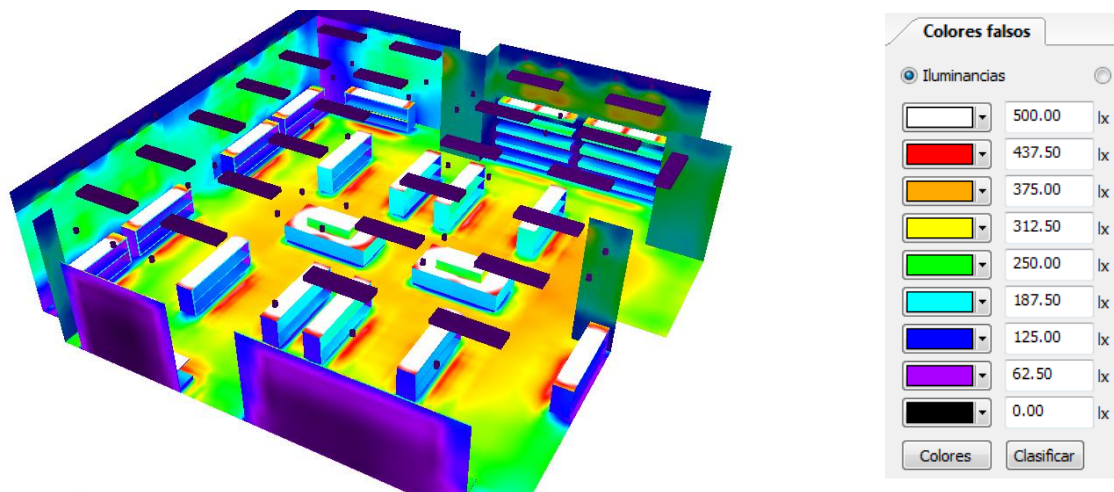


Fig. 52. A) Simulación cálculo lumínico Caso base. B) Colores falsos

En la figura 52 A se observan los niveles de iluminación general que van de 250 a 375 luxes y de 500 luxes en la iluminación de acento. De acuerdo a la IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) los niveles pueden variar desde 30 a 300 lx y desde 500 a 1000 lx según el concepto o imagen de la marca. Asimismo, una tienda de categoría media, como lo es el caso base, utiliza niveles de iluminación promedio de 300 a 600 lx. Por otro lado se toma en cuenta la NOM-007-ENER-2014, de eficiencia energética para sistemas de alumbrado en edificios no residenciales,

la cual establece un DPEA (densidad de potencia por metro cuadrado) de un máximo de 18.08 W/m² en el área de venta. Este dato nos permite identificar cuál es el escenario óptimo para restituir lámparas en el local comercial. De igual forma, México cuenta con la NOM-025-STPS-2008 la cual establece los niveles de iluminación en un área de trabajo, sin embargo, no se implantan los niveles adecuados para una tienda departamental, así que tomaremos la norma de la IESNA o en el caso de nuestro país, el área de trabajo de talleres, tales como áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas, donde se requieren 300 luxes para operar correctamente.

CASO BASE							
CAPACIDAD INSTALADA Y CONSUMO ENERGÉTICO							
Especificación luminaria	Cantidad	Potencia total (W)	h/d	Factor coincidencia	Demanda total kW	Consumo kWh/mes	DPEA W/m ²
Barras de sobreponer. Tecnología fluorescente lineal T5 (2x28)	25	1400	12	1.00	1.40	509.54	11.52
Luminario downlight de empotrar dirigible para lámpara halógena MR16 color: blanco.	42	1470	12	1.00	1.47	535.02	12.10
	67.00	2870.00			2.87	1044.57	23.62

Tabla 20. Capacidad instalada y consumo energético del caso base.

Se realiza el cálculo de capacidad instalada y consumo energético de acuerdo a las luminarias existentes en el caso base, con un total de 42 lámparas halógenas y 25 luminarios T5 los cuales se estima un consumo mensual de 1044.57 kWh. Al igual que los niveles de iluminación, la capacidad instalada y el consumo mensual sirven de referencia para comparar los escenarios propuestos a continuación y valorar cuál de ellos es el más óptimo para utilizar en el local comercial.

11.2 Escenario 1 (Luminarias L2, T5 y MR16)

En el escenario 1 se proponen 23 luminarias T5, 42 luminarios dirigibles con lámparas MR16 y un luminario L2 Híbrido. Este último se propone para lograr un ahorro energético en la zapatería.

De acuerdo a las mediciones y cálculos realizados para obtener los niveles de iluminación del difusor en el interior de la bodega, se estimaron las horas en las que el luminario L2 podría distribuir la luz natural a niveles requeridos por la imagen de la tienda. Las horas óptimas para utilizar el difusor de iluminación natural, serían entre las 10:00 am a las 3:00 pm en un día despejado.

Cabe mencionar que para mantener los niveles de iluminación del caso base se pueden sustituir dos luminarios T5 (2X28W) durante el horario mencionado. Una vez que bajen los niveles de iluminación, el L2 puede encenderse y utilizar la luz artificial. En la Fig. 53 se muestran los niveles de iluminación con un luminario Híbrido L2 el cual

sustituye a dos luminarias T5 (2X28W). Se observa que mantiene el nivel de iluminación de 250 luxes el cual es óptimo para los pasillos de la tienda comercial.

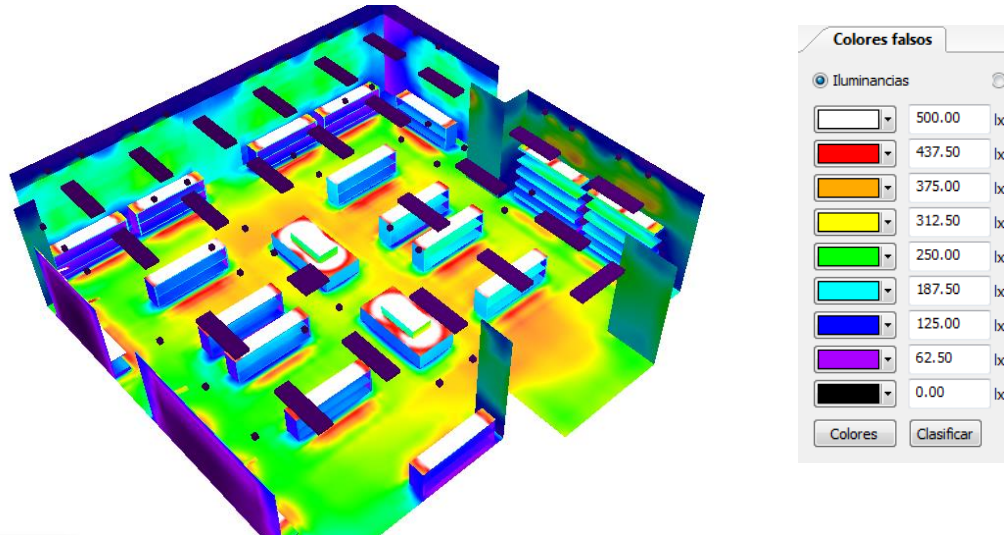


Fig. 53. A) Simulación cálculo lumínico escenario 1. B) Colores falsos

Tal como se elaboró en el caso base, se realizan los cálculos de la capacidad de demanda y el consumo energético

ESCENARIO 1							
CAPACIDAD DE DEMANDA Y CONSUMO ENERGÉTICO							
Especificación luminaria	Cantidad	Potencia total (W)	h/d	FC	Demanda total kW	Consumo kWh/mes	DPEA W/m2
SP3	1	7	6	1.00	0.007	1.27	0.06
L2 Hybrid	1	15	6	1.00	0.015	2.73	0.12
Barras de sobreponer. Tecnología fluorescente lineal T5 (2x28)	23	1288	12	1.00	1.29	468.8	10.60
Luminario downlight de empotrar dirigible para lámpara halógena MR16 color: blanco.	42	1470	12	1.00	1.47	535.02	12.10
	67.00	2780.00			2.78	1007.81	22.88

Tabla 21. Capacidad instalada y consumo energético del escenario 1.

En el escenario 1 se observa una reducción en el consumo de 32.76 kWh, sin embargo, la densidad de potencia sigue por encima del parámetro que indica la NOM-007-ENER-2014. En consecuencia se propone el siguiente escenario.

11.3 Escenario 2 (L2, Slim LED y MR16 LED)

La propuesta 2 consiste en el diseño de luminarias Slim LED colocadas como iluminación general y las lámparas MR16LED como iluminación acentuada. Asimismo se ubica un luminario L2 híbrido el cual sustituye tres luminarias Slim LED de la tienda, sin perder los niveles de iluminación que van de acuerdo al concepto de la marca y a la NOM-025-STPS-2008 entre 250 y 320 luxes de iluminación general y 500 luxes de iluminación acentuada.

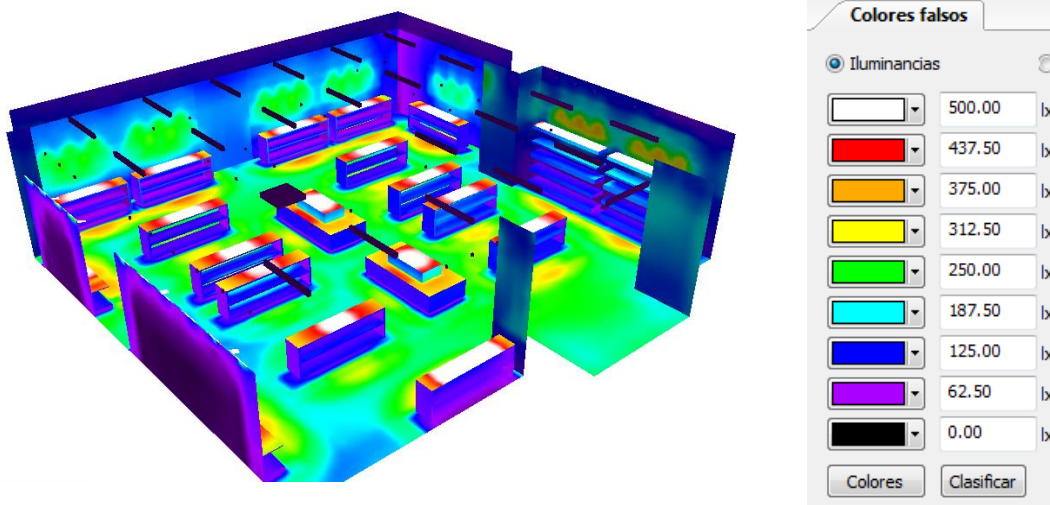


Fig. 54. A) Simulación cálculo lumínico escenario 2. B) Colores falsos

Igual que en el escenario anterior, esta propuesta utiliza un luminario L2 híbrido que sustituye tres luminarias Slim LED durante seis horas desde las 10:00 am a las 3:00 pm, horario óptimo para utilizar el difusor natural en un día despejado. El resto del día, será necesario encender el L2 hasta las 10 pm.

Asimismo, se realizan los cálculos correspondientes a la capacidad de demanda y consumo energético (tabla 22) donde se estima que la densidad de potencia se reduce de manera considerable a 6.91 W/m², esto es, menos de la mitad del indicador que establece la NOM-007-ENER-2014. Por otro lado, tenemos una demanda menor a la del caso base de 0.84 kW, esto es un ahorro de 2.03 kW en capacidad instalada. De igual manera, nótese que el consumo mensual se reduce a 303 kWh, casi una tercera parte del caso base y del escenario anterior.

ESCENARIO 2							
CAPACIDAD DE DEMANDA Y CONSUMO ENERGÉTICO							
Especificación luminaria	Cantidad	Potencia total (W)	horas/día	FC	Demanda total kW	Consumo kWh/mes	DPEA W/m2
SP3	1	7	12	1.00	0.007	2.55	0.06
L2 Hybrid	1	15	6	1.00	0.015	2.73	0.12
Slim de empotrar en techo fabricado de aluminio extruido. Tecnología LED. Driver electrónico incluido	22	440	12	1.00	0.44	160.14	3.62
Luminario downlight de empotrar dirigible para lámpara LED MR16 color: blanco.	54	378	12	1.00	0.38	137.58	3.11
TOTALES	78.00	840.00			0.84	303.00	6.91

Tabla 22. Capacidad de demanda y consumo energético escenario 2.

11.4 Escenario 3 (Slim LED y MR16 LED)

La tercera propuesta consiste en 25 luminarias Slim LED y 52 luminarias MR15 LED cuya función es la iluminación de acento en la tienda. En esta propuesta se omite el uso de sistema SP3 y luminario L2 para evaluar el ahorro en consumo energético y económico de los escenarios presentados. En este escenario fue necesario colocar tres luminarios SLIM LED para alcanzar un nivel de iluminación general de 250 luxes.

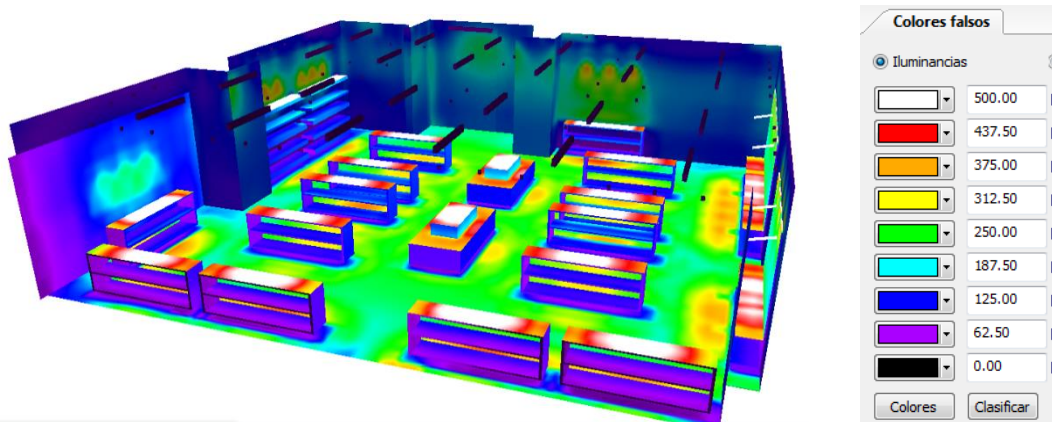


Fig. 55. A) Simulación cálculo lumínico escenario 3. B) Colores falsos

De igual manera se realizan los cálculos para determinar la capacidad de demanda y el consumo energético. En este escenario la demanda calculada fue de 0.88 kW y un consumo de 319.56 kW mes (tabla 23), menor al caso base y al escenario uno, pero mayor al escenario 2 por utilizar solo luz artificial. Sin embargo la densidad de potencia (DPEA) se mantiene debajo de los 18.08 W/m², respetando la NOM-007-ENER-2014.

ESCENARIO 3							
CAPACIDAD DE DEMANDA Y CONSUMO ENERGÉTICO							
Lámpara	Cantidad	Potencia total (W)	horas/día	FC	Demanda total kW	Consumo kWh/mes	DPEA W/m ²
SLIM LED (Arreglo de 24 LEDs)	25	500	12	1.00	0.50	181.98	4.12
MR16 LED	54	378	12	1.00	0.38	137.58	3.11
	79.00	878.00			0.88	319.56	7.23

Tabla 23. Capacidad de demanda y consumo energético escenario 3.

11.5 Resumen energético y económico

El objetivo de presentar los diferentes escenarios es evaluar el potencial de ahorro de un difusor de luz natural y proponer el mejor escenario para el ahorro energético y evaluar su retorno de inversión mediante la tarifa eléctrica y la vida útil de la lámpara (ver anexos).

El escenario 1 presenta un ahorro en demanda de 0.09 kW, un ahorro en consumo de 32.76 kWh/mes y un ahorro económico de 75.47 pesos al mes en comparación con el caso base. Asimismo se calcula una inversión en luminarias de 126,635 pesos con un tiempo de recuperación de 139.83 años. Los datos presentados en el escenario 1 nos indican que no es recomendable utilizar el mismo caso base con solo el luminario L2, ya que la inversión se recuperaría en 139.83 años lo cual no es redituable.

Por otro lado, en la segunda propuesta se calcula un ahorro en la capacidad de demanda de 2.03 kW, un ahorro en el consumo mensual de 738.84 kWh y un ahorro de 1702.28 pesos mensuales con la tarifa 2 de agosto de 2014. En este escenario la inversión fue de 173,1785 pesos con una recuperación de inversión de 8.48 años.

En el escenario 3 se calcula un ahorro en la demanda de 1.99 kW, un ahorro en el consumo mensual de 725.01 kWh y un ahorro de 1670.42 pesos al mes. De igual manera se calcula la inversión la cual fue de 71,502 pesos y una recuperación de inversión de 3.57 años.

Existe un ahorro en la demanda máximo de 2.03 kW en el escenario 2, sin embargo, el tiempo de recuperación entre los escenarios 2 y 3 tiene una diferencia de cinco años. Lo cual nos hace pensar que el escenario 3 es el mejor para realizar la sustitución de luminarias y lograr una eficiencia energética. No obstante, debemos tomar en cuenta la vida útil de las luminarias. En el caso del escenario 2 la vida útil del SP3 y L2 híbrido es de 175,000 horas, 50,000 horas (5.7 años) para una Slim LED y 40,000 horas (4.6 años) para una lámpara MR16 según ficha técnica del proveedor. En consecuencia, se evitaría la inversión de 3 luminarias Slim LED cada 5 años durante 20 años, esto es, un ahorro de 12 luminarias en 20 años (22,968.00 pesos).

	AHORROS			ANÁLISIS ECONÓMICO		
	Demanda kW (Ahorro en potencia)	Ahorro en consumo (kWh/mes)	Económico (\$/mes)	Inversión	Tiempo (meses)	Tiempo (años)
Escenario 1	0.09	32.76	75.47	\$ 126,635.00	\$ 1,677.93	\$ 139.83
Escenario 2	2.03	738.84	1702.28	\$ 173,185.00	\$ 101.74	\$ 8.48
Escenario 3	1.99	725.01	1670.42	\$ 71,502.00	\$ 42.80	\$ 3.57

Tabla 24. Ahorro en demanda, ahorro en consumo, ahorro económico al mes y recuperación de la inversión en la restitución de luminarias de cada escenario.

12. CONCLUSIONES

Se experimentó con un TLNA para analizar su comportamiento lumínico y energético en la azotea de la Universidad Nacional Autónoma de México donde las mediciones indicaron una iluminancia máxima interior de 330 luxes bajo una iluminancia global horizontal de 90,318 luxes en un día con cielo despejado. Un TLNA con un difusor modelo L2 Híbrido alcanza los niveles óptimos de iluminación en la aplicación en la iluminación general de una tienda departamental como auxiliar de la iluminación artificial. Sin embargo existen varios puntos. Sin embargo el equipo presenta varias fallas de diseño y cálculo en el microprocesador.

De acuerdo a los datos de relación de iluminancia externa e iluminancia interna que presenta Mayhoub en el 2011 (tabla 19), se deduce que el TLNA primera generación es más eficaz y capta la luz natural con menor margen de error en los cálculos del colector. Esto puede deberse a que los conos de cristal colocados en el módulo de 1 m² concentran los rayos del sol en una superficie mayor y cada cono de lente fresnel trabaja de manera independiente. Asimismo la distancia entre el lente y el concentrador de fibra óptica es menor.

Respecto a los datos que proporciona la Universidad de Uppsala en Suecia, pone en duda el periodo en el que se midió, ya que sólo menciona un dato de relación entre la variable exterior e interior bajo una iluminancia de 95,000 a 130,000 donde obtiene 500 luxes en el interior con un TLNA tercera generación.

Por otro lado, se deduce que un TLNP alcanza una iluminancia interior de 620 luxes con una iluminancia exterior de 94,258 luxes, en un cielo despejado (García, 2011).

Con base a los datos de las investigaciones previas y los capturados en este estudio, se deduce que los Sistemas de Transmisión Natural Pasivos o Activos alcanzan niveles óptimos de iluminación interior de un espacio bajo un cielo despejado. Los tres sistemas: TLNA primera generación, TLNA tercera generación y TLNP proyectan una iluminancia menor a los estándares cuando operan bajo las condiciones de un cielo seminublado o nublado.

Cabe mencionar que es necesario el análisis del funcionamiento del TLNA tercera generación, ya que en esta investigación presentó fallas que impidieron la captura de datos durante un periodo mayor de dos días. De acuerdo a la teoría y experimentación que se presentó en esta investigación, las deficiencias del equipo pudieron deberse a los siguientes factores:

1. El TLNA no fue calculado de acuerdo a los ángulos de incidencia del sol. (Joo, H., Riffat, S. & Lim, S., 2013).
2. El ángulo de incidencia en la fibra óptica fue mayor a 10° (Joo, H., Riffat, S. & Lim, S., 2013).
3. No se toma en cuenta la fórmula astronómica con un error de rastro del 3° en días nublados.

4. El captador solar requiere un ventilador que evite el exceso de calor en la cavidad entre el lente fresnel y la fibra óptica para que permita captar los rayos del sol bajo una irradiancia entre 150W/m² a 2000 W/m².
5. Diferencia entre el diámetro del concentrador solar y la fibra óptica (< 2 mm). (Song, J., Yang, Y & Zhu, Y., 2013).
6. Falta de sellador en las piezas del captador solar. La colocación del sellador evitaría la filtración de agua en el captador solar, tarjeta de video y motor.

Aunque el TLNA requiere de un estudio minucioso en cuanto al diseño del aparato y del microprocesador, se calcula el potencial de ahorro energético donde se presentaron tres escenarios que simularon el comportamiento lumínico del TLNA de acuerdo a las especificaciones del proveedor, en comparación con el caso base el escenario 2 donde se utiliza el TLNA existe un ahorro mensual de 738.84 kWh y un ahorro económico mensual de 1,702.28 pesos de acuerdo a la tarifa CFE del mes de agosto de 2014. Asimismo se calcula una inversión de 173,185 pesos con un retorno de inversión en 8.48 años. Sin embargo existe un mejor escenario en el que se utilizan lámparas LED donde existe un ahorro energético menor de 1,670.42 kWh/mes pero con un retorno de inversión de 3.57 años.

Por otro lado, de acuerdo a las simulaciones realizadas durante ocho meses y con el cálculo de la constante de relación de iluminancia exterior-iluminancia interior, concluimos que el TLNA proporciona un nivel óptimo para la iluminación general de una tienda departamental solo en condiciones de cielo despejado entre las 10:00 y 15:00 horas (hora local). El TLNA aún no cuenta con un microprocesador que calcule la trayectoria solar con precisión, sin embargo es posible alcanzar un nivel mayor a los 330 luxes en un cielo despejado (Gráfica 2).

Finalmente se concluye que si el TLNA funcionara correctamente, poseería potencial de ahorro energético en las tiendas departamentales solo en los primeros tres meses del año en los que se cuenta con cielo despejado en la Ciudad de México. Sin embargo, los escenarios de ahorro energético y económico mostraron que no podemos asegurar un potencial de ahorro energético de un TLNA ya que el ahorro en consumo de los escenarios 1 y 2 fue de 75.47 kW y 1702.20 kW respectivamente, y un retorno de inversión de 139.83 y 8.48 años.

Futuras líneas de investigación y recomendaciones

A continuación se enuncian algunas futuras líneas de investigación que deben dar seguimiento a esta tesis para lograr el ahorro de energía en edificios, brindar al usuario una iluminación óptima con el objetivo de que realice sus tareas de manera comfortable:

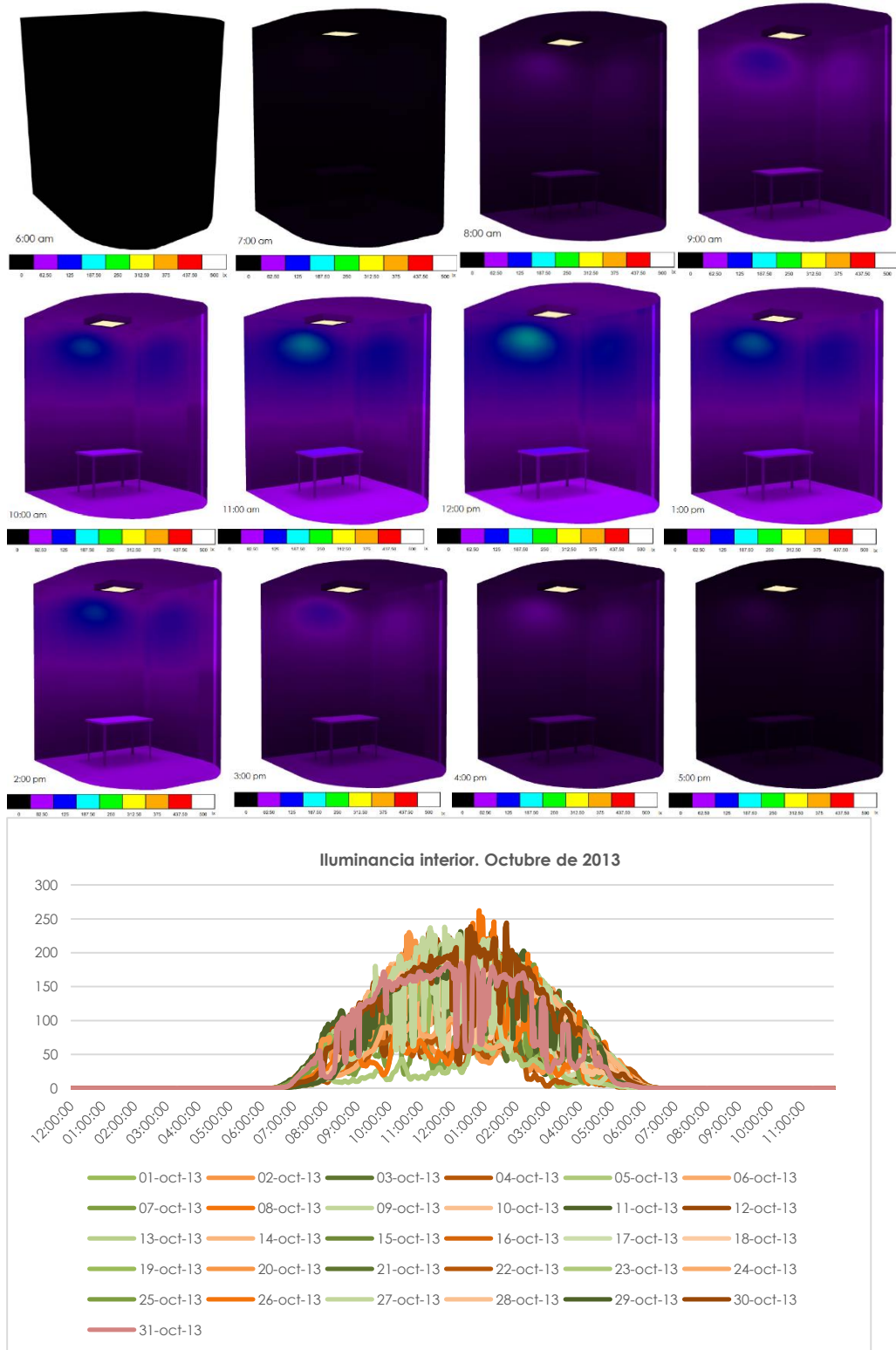
- o Diseño del captador y diseño en la programación del microprocesador para la captura precisa de los rayos solares. Se sugiere que los lentes fresnel que conforman el captador solar se coloquen a lo largo de una retícula de 1x 1 metros y que cada lente siga la trayectoria solar de manera independiente. (Ver diseño de SP1 y Principio de patente).

- Se recomienda diseñar un difusor para el interior de un espacio el cual permita la transmisión de la luz natural de manera nítida.
- Se recomienda realizar un cálculo exacto de la trayectoria solar y la incidencia de los rayos solares en la apertura de la fibra óptica donde la inclinación no sea mayor a 10° en un diámetro de 2 mm. Posteriormente diseñar un software para el microprocesador con base a los cálculos obtenidos.
- Evaluación post-ocupacional en un espacio arquitectónico con el propósito de establecer estrategias de diseño interior en el espacio.

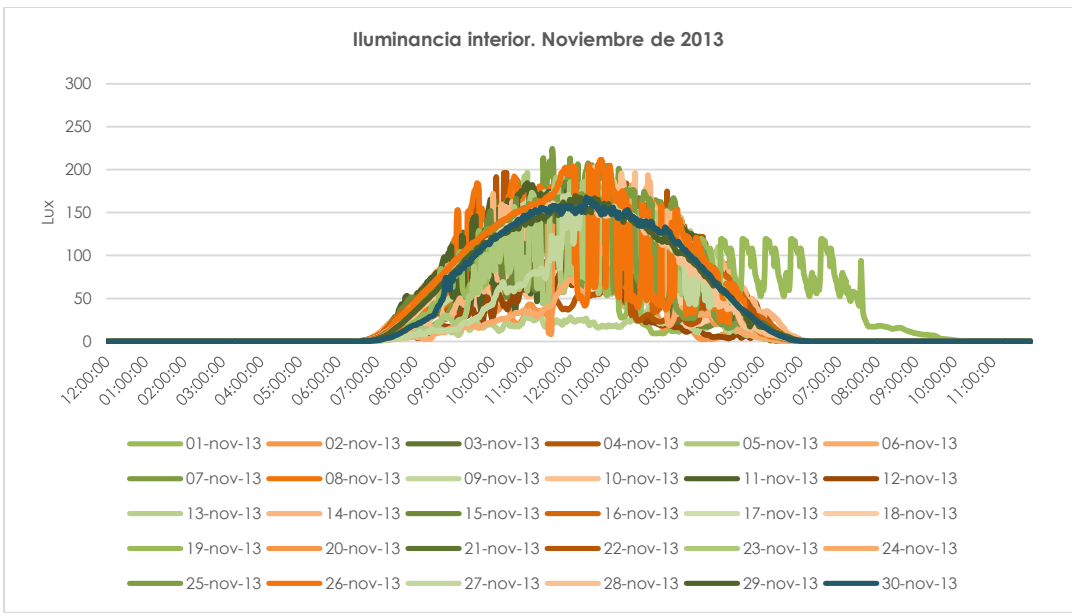
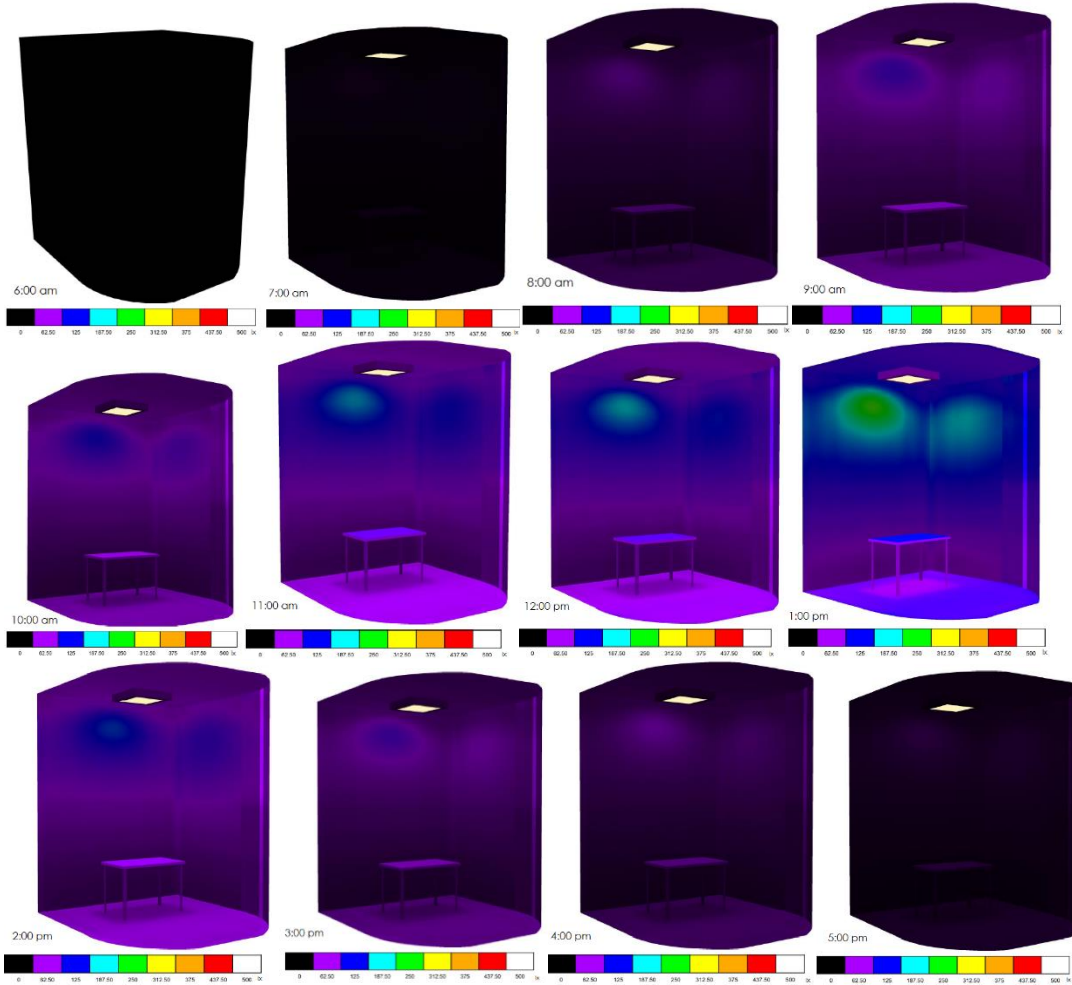
13. ANEXOS

A continuación se presentan una serie de imágenes las cuales consisten en la simulación de la iluminancia interior (periodo de octubre de 2013 a mayo de 2014) dentro de la bodega de experimentación con relación a los datos de iluminancia exterior del Instituto de Geofísica de la UNAM. La variable se calcula de acuerdo a la constante obtenida de la iluminancia exterior y la iluminancia interior de los días 12 y 13 de marzo de 2014. **Estos cálculos son simulaciones y no se consideraron variables que influyen en los niveles de irradiancia e iluminancia exterior, tales como la variación de temperatura, precipitación y contaminación.**

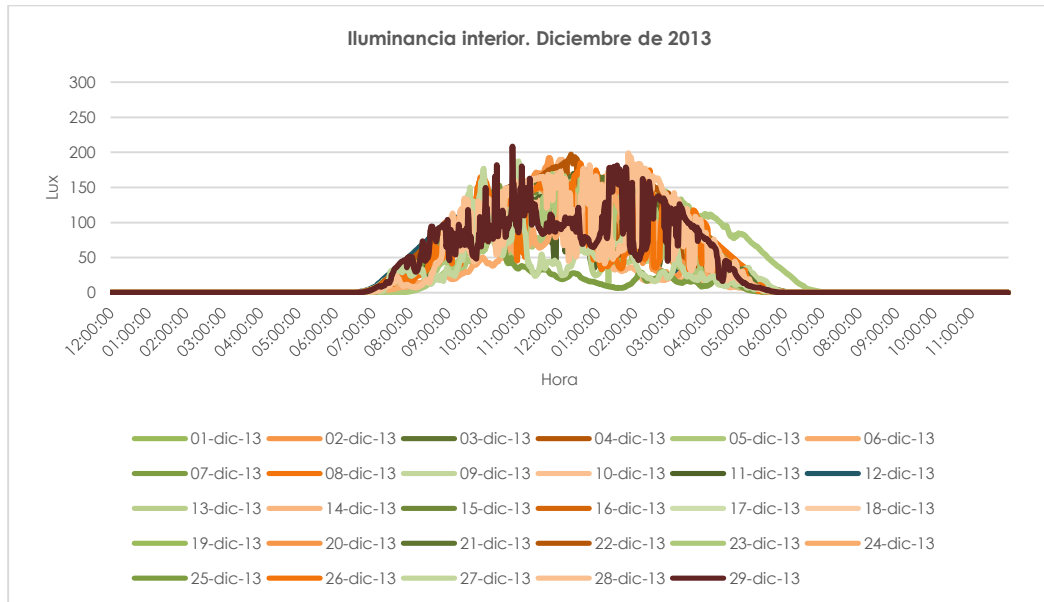
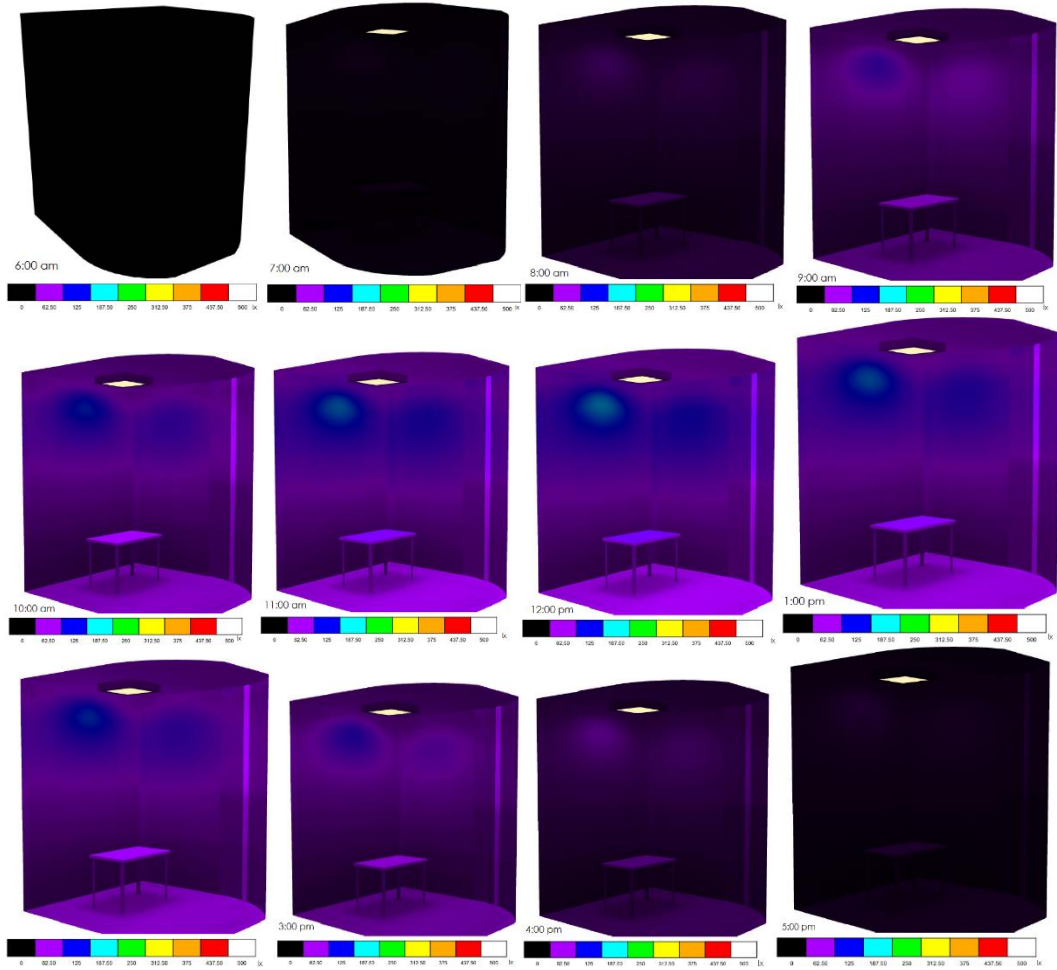
13.1 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual octubre de 2013



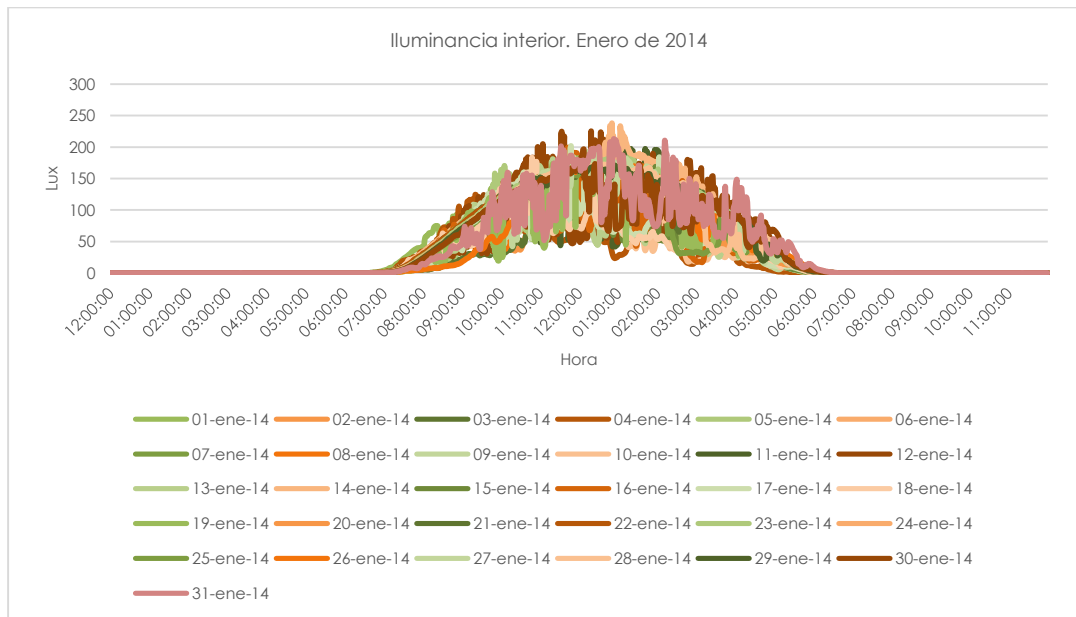
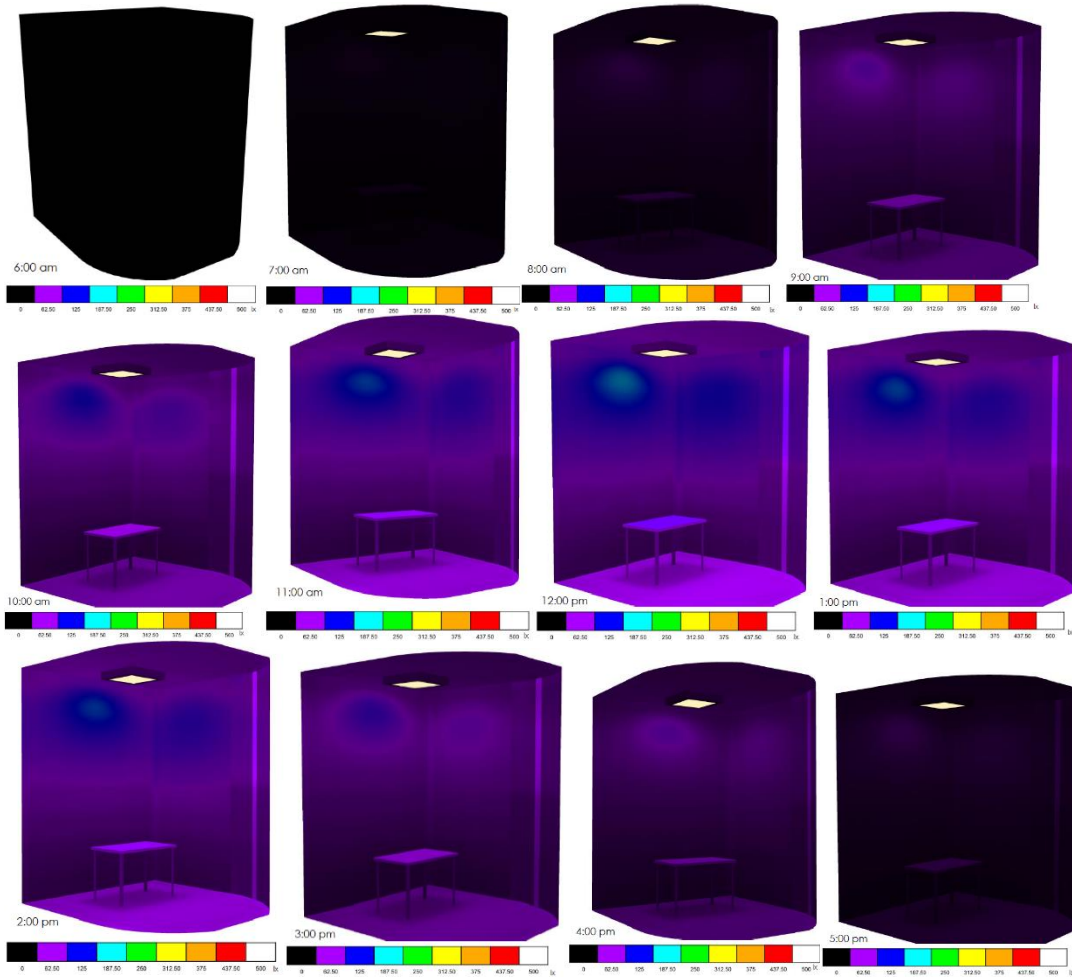
13.2 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual noviembre de 2013



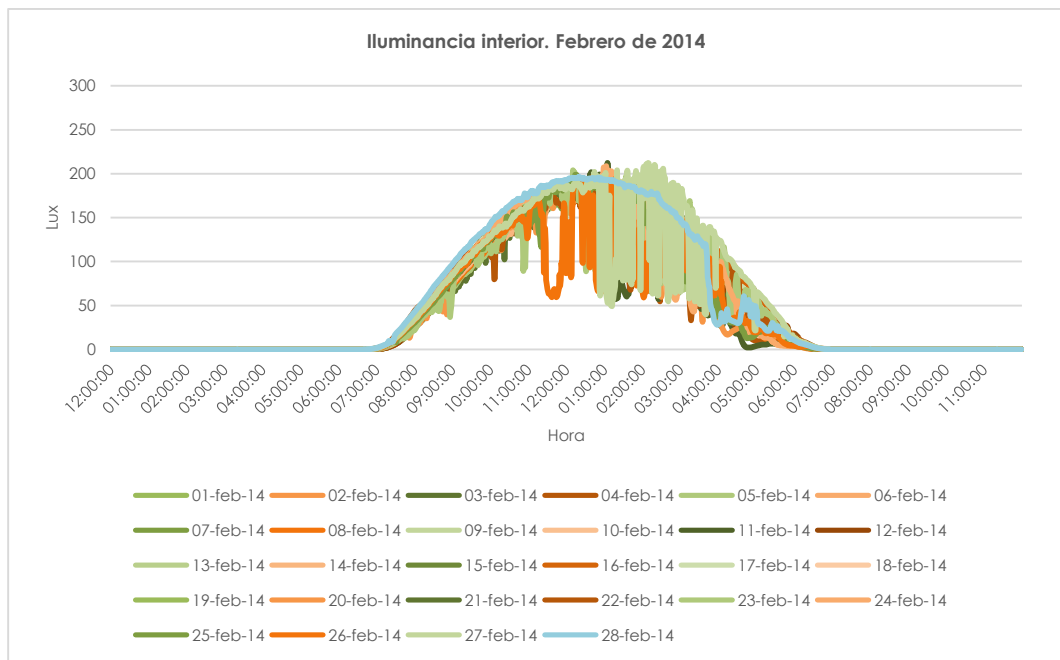
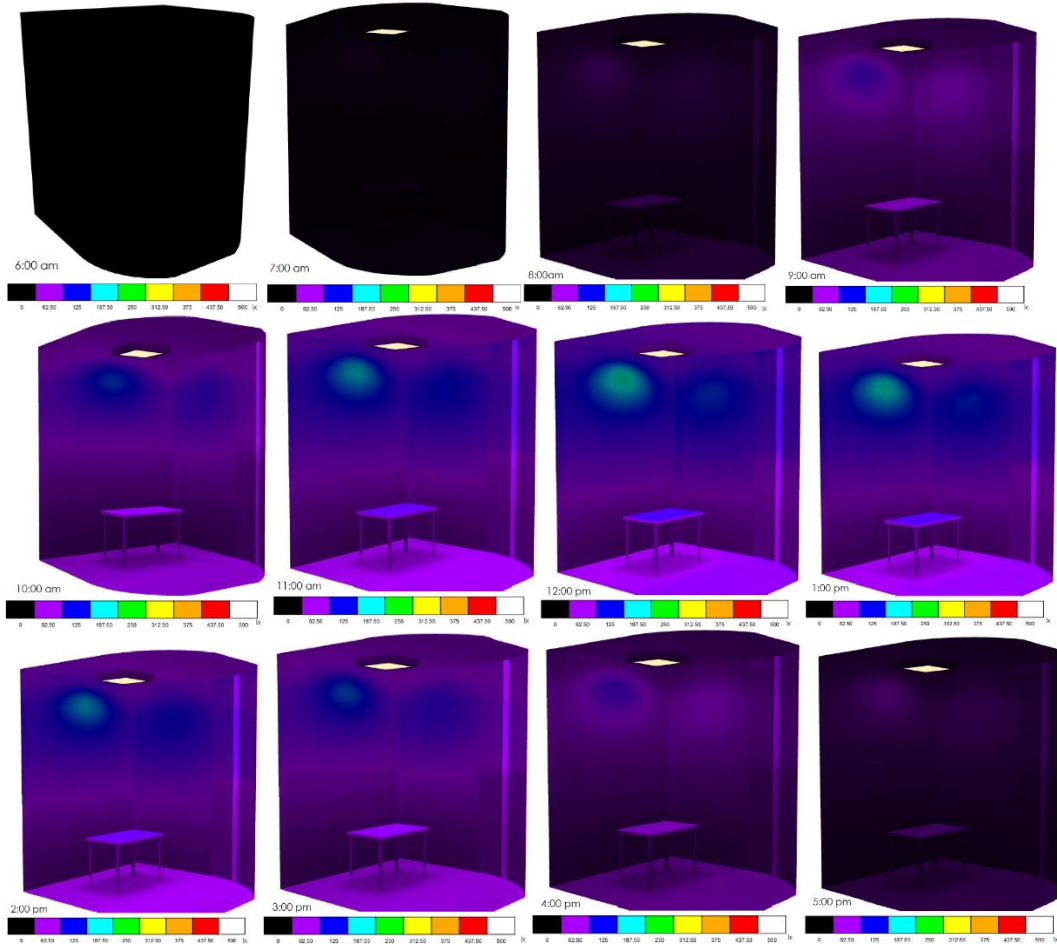
13.3 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual diciembre de 2013



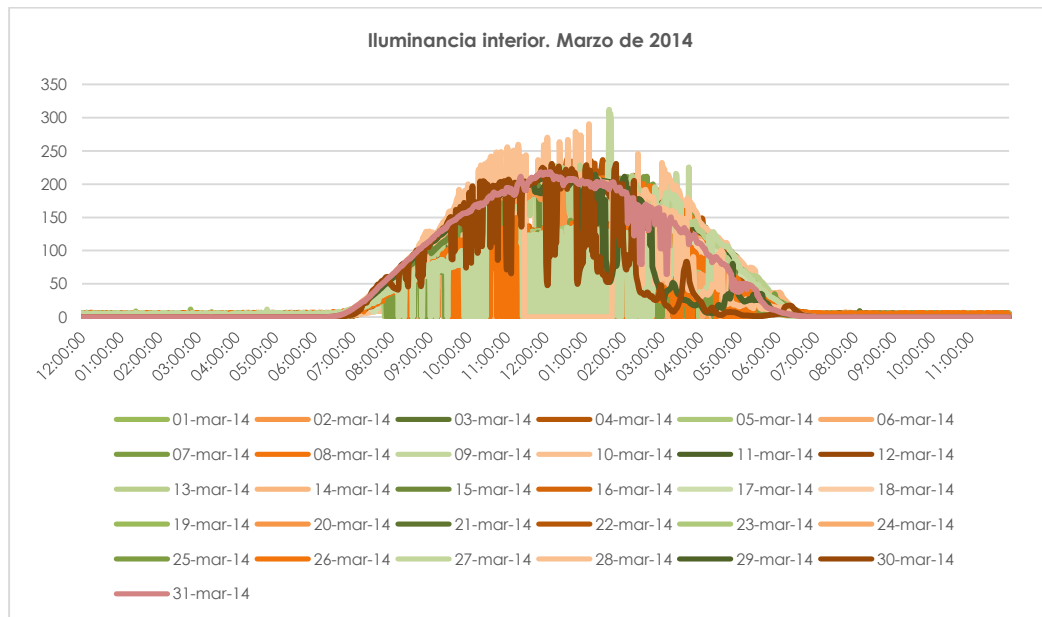
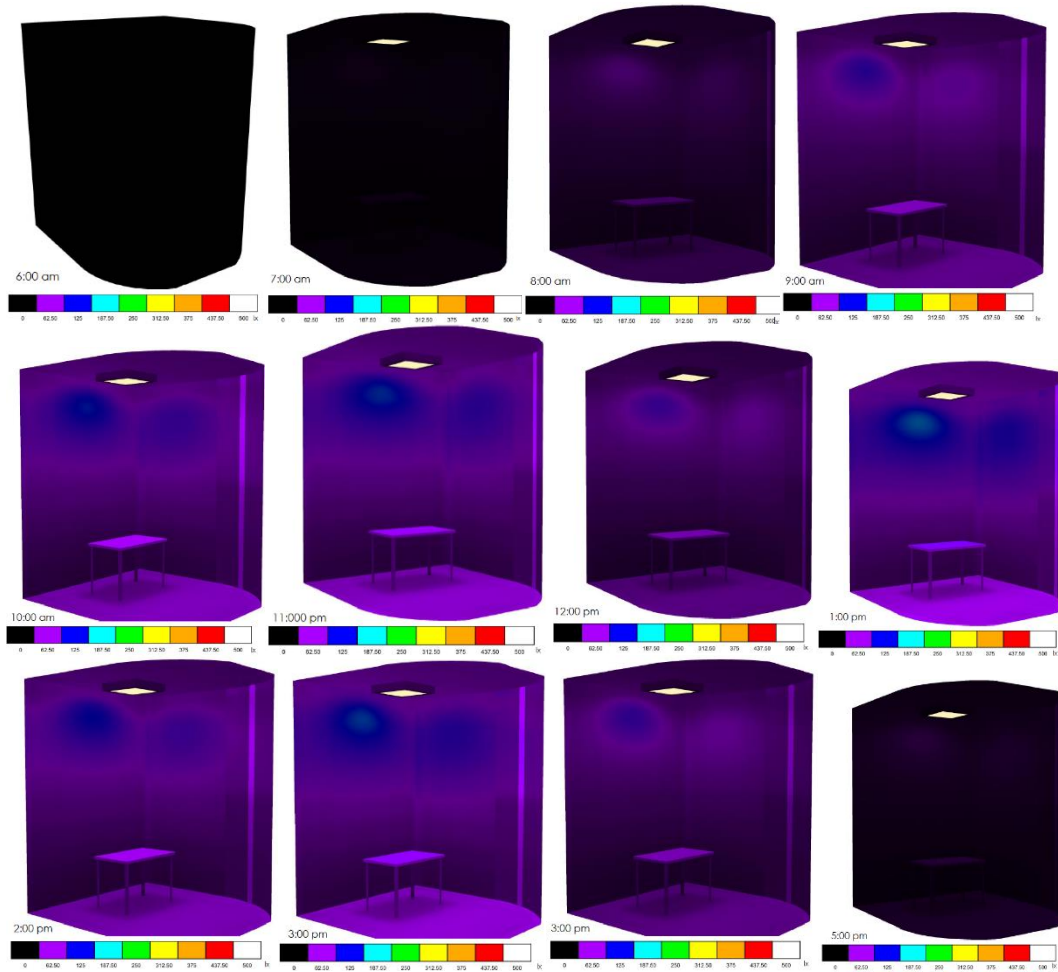
13.4 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual enero de 2014



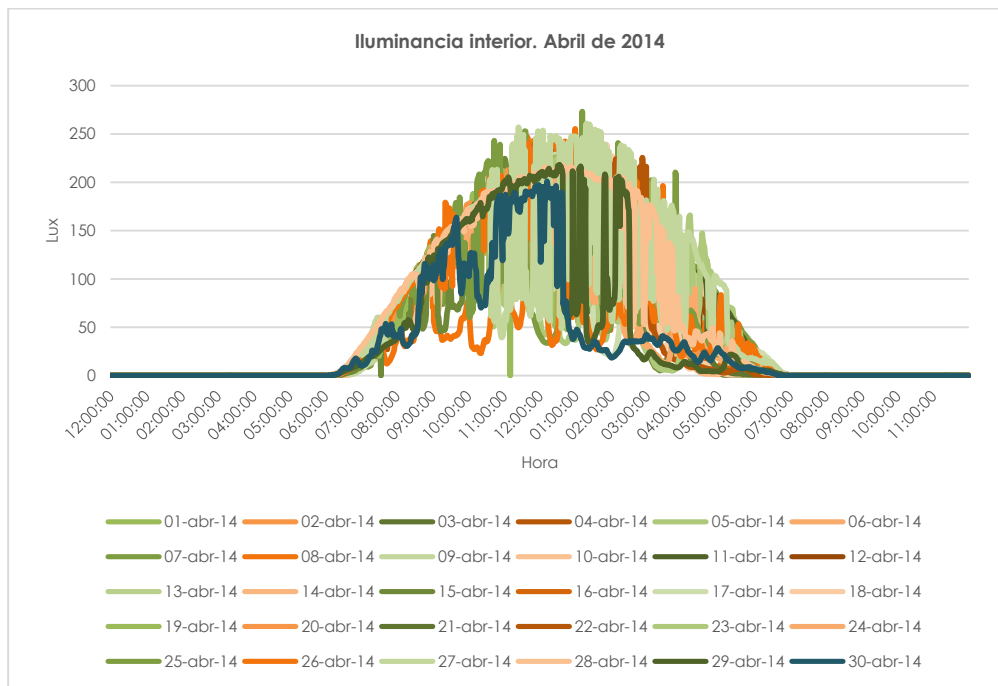
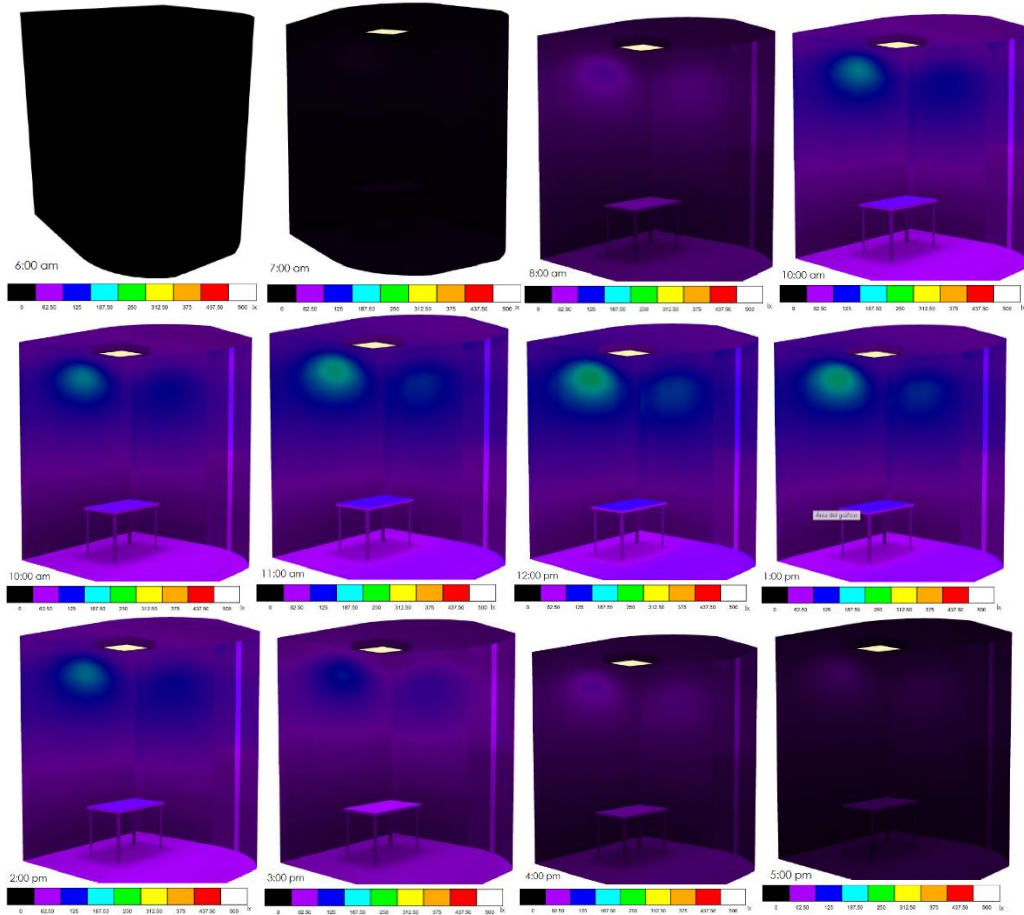
13.5 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual febrero de 2014



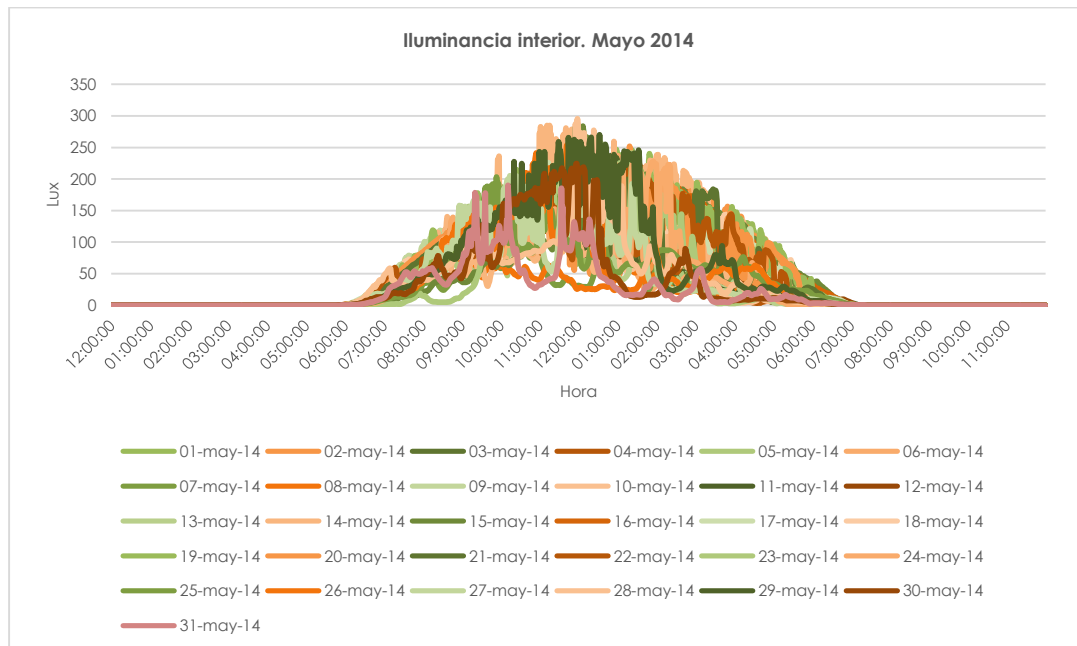
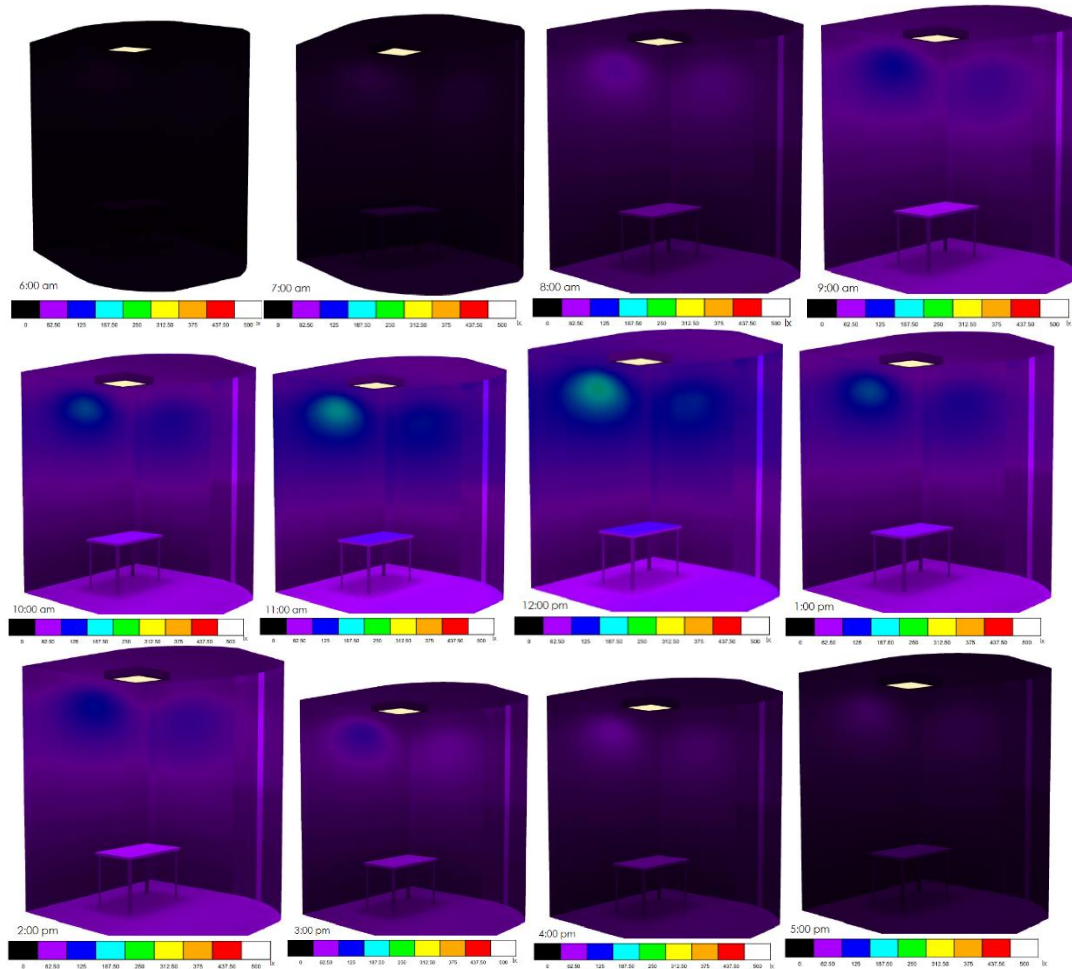
13.6 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual marzo de 2014



13.7 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual abril de 2014



13.8 Simulaciones en colores falsos cada hora. Promedio mensual mayo de 2014



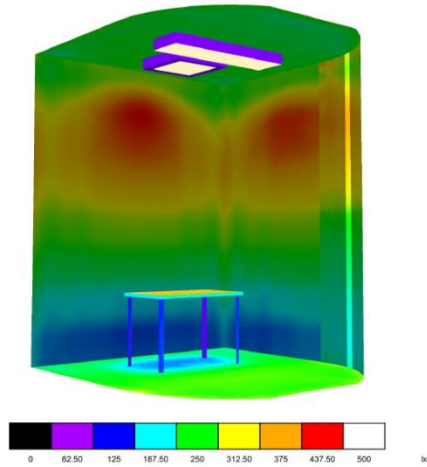


Fig. 54. Simulación del TLNA y T5 de acuerdo a los datos del proveedor.

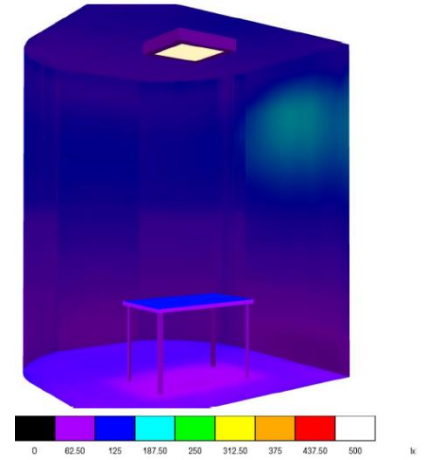


Fig. 55. Simulación del TLNA de acuerdo a los datos del proveedor.

13.9 NOTA TÉCNICA

Introducción

Se realizó el estudio del comportamiento de un Transmisor de Luz Natural Activo (TLNA) a través de fibra óptica para comprobar si los niveles de iluminancia interior corresponden a los parámetros de iluminación exigidos por la IESNA en un local comercial. Asimismo se calcula el potencial de ahorro energético del sistema en comparación con un sistema de iluminación convencional.

Palabras clave: luz natural, iluminancia interior, lente de fresnel, fibra óptica.

Condiciones en las que debe operar un TLNA

Un TLNA sólo puede operar bajo condiciones de cielo despejado durante los meses de enero, febrero y marzo en la Ciudad de México bajo una irradiancia horizontal de mínimo 700 W/m² y una iluminancia mayor a 90,000 luxes. En este sentido se incrementa la posibilidad de alcanzar una iluminancia interior óptima de 500 a 1000 luxes en el interior de un espacio cerrado.

Asimismo el rayo de incidencia solar en el orificio de la fibra óptica debe ser igual o menor a 10° y el orificio del cable no excederá 2 mm. Cabe mencionar la importancia del cálculo exacto de la trayectoria solar durante el día desde el amanecer hasta el atardecer para lograr el aprovechamiento máximo de la transmisión de luz natural. Los lentes fresnel deben ser ubicados en una retícula de 1x1 m y cada lente se colocará sobre un orificio de cable de fibra óptica con una cavidad de aire que permita la incidencia del rayo solar.

El Captador solar debe ser sellado con material que impida el paso del agua en caso de lluvias para proteger los cables motores y tarjetas electrónicas. Asimismo el microprocesador debe ser diseñado para reencenderse de manera automática en caso de una variación de voltaje

En caso de no contar con las características antes mencionadas, el TLNA no podrá garantizar su buen funcionamiento y deberá evitarse su aplicación como sustituto de la luz eléctrica. Asimismo se debe considerar su precio en el mercado y analizar si la inversión será redituable.

13.10 Fichas técnicas de instrumentos de medición

<http://www.kippzonen.es/Product/210/CMP-11-Piranometro#.VCnn8vI5Ny0>

http://licor.com/env/products/light/photometric_sensors/index.html

<http://www.kippzonen.com/Product/42/CM-121B-C-Shadow-Ring#.VCnpavI5Ny0>

13.11 Tarifa CFE

http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp?Tarifa=CMABT&Anio=2014

13.12 Normas mexicanas

SEGOB. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2004, Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2042919&fecha=15/04/2005

SEGOB. (2014). NORMA Oficial Mexicana NOM-030-ENER-2012, Eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (LED) integradas para iluminación general. Límites y métodos de prueba.

SEGOB. (2008). NORMA Oficial Mexicana NOM-025-STPS-200. Condiciones de iluminación en los centros de trabajo. Recuperado de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgst/normatividad/normas/Nom-025.pdf>

GLOSARIO

Centro comercial: Grupo de negocios minoristas y otros establecimientos comerciales planificados, desarrollados y que pertenecen y son administrados como propiedad única. Se provee estacionamiento en el lugar. El tamaño y la orientación del centro son generalmente determinados por las características en el mercado y del área de influencia que presta servicios al centro. Las tres configuraciones físicas principales de los centros comerciales son centros comerciales cerrados, abiertos y centros híbridos.

Irradiancia: potencia que incide por unidad de área en una superficie y su unidad de medida es el Watt/m².

Illuminancia interna: flujo luminoso que incide por unidad de área en una superficie y su unidad de medida es el lux ($lx=lm/m^2$).

Intensidad luminosa: cuantificación del flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica.

Reflectancia: es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.

Transmitancia: fracción de luz incidente, a una longitud de onda especificada, que pasa a través de una muestra.

Fondo: Plano de una imagen que queda tras las figuras o elementos que ocupan el plano principal

Contraste: La diferencia relativa en la intensidad entre un punto de una imagen y sus alrededores.

Illuminancia nadir: Aquella iluminancia que tiene su origen desde el punto inferior en una superficie.

Eficiencia energética: Es un proceso empleado para reducir el consumo energético mediante tecnologías renovables y diseño sustentable.

Confort visual: Se refiere al impulso o sentimiento de compra del consumidor hacia un producto bajo el efecto de colores de iluminación y diseño interior.

Luminarios LED: Sistema completo de iluminación, que cuenta con una fuente de luz a base de tecnología LED, controlador, disipador de calor y un control óptico para distribuir la luz.

Luminario convencional: Aquél que posee características incandescentes y halógenas con baja eficiencia energética.

Lámpara incandescente: Se componen de un filamento de alambre encerrado en un bombillo o foco de vidrio relleno de gas o al vacío. Al conectarse, la corriente que pasa por el alambre supera su resistencia y calienta el filamento al punto de incandescencia.

Lámpara halógena: Son aquellas que utilizan el ciclo halógeno, el tungsteno evaporado regresa al filamento que está encerrado en un tubo de vidrio.

Lámpara fluorescente: Bulbos tubulares rectos cuyo diámetro varía entre 12 mm, designadas T4 y 54 mm designadas T17. Consisten en una lámpara y balastro unidos en una base con rangos de potencia de 5 a 55 W.

.Sistema de iluminación: Es el conjunto de luminarias y cableado destinados a proporcionar un nivel de iluminación adecuado para la realización de actividades específicas.

Lámpara: Dispositivo que genera luz a partir de energía eléctrica.

Balastro: Es un dispositivo que, por medio de inductancias o resistencias solas o en combinación, limita la corriente de las lámparas al valor requerido para su operación correcta. Se clasifican en balastos para lámparas fluorescentes, balastos para lámparas de alta intensidad de descarga (HID), balastos para lámparas de baja intensidad de descarga (LID).

Luminario: Conjunto de lámparas que forman parte de un sistema de iluminación.

Vida útil: Duración promedio en horas de una lámpara.

Eficacia luminosa: característica que indica el flujo que emite la lámpara por cada unidad e potencia eléctrica consumida para su obtención. Se obtiene de la siguiente fórmula: $E = \frac{\text{flujo luminoso (lm)}}{\text{Potencia eléctrica (W)}}$

Flujo luminoso: Es la medida de la cantidad de la luz que emite una lámpara y su unidad se mide en lúmenes (lm).

Flujo luminoso total: energía radiante en forma de luz visible al ojo humano, emitida por una fuente luminosa en la unidad de tiempo (segundo); su unidad de medida es el lumen (lm).

Flujo luminoso total final: Flujo luminoso total emitido de una fuente de luz, medido al término de un periodo de prueba, en condiciones específicas.

Flujo luminoso total inicial: Flujo luminoso total emitido de una fuente de luz, medido al inicio de su vida, después de un periodo de estabilización.

Flujo luminoso total nominal: Flujo luminoso total emitido de una fuente de luz, en su posición ideal y que declara el fabricante.

Flujo luminoso total mantenido: Relación del flujo luminoso después de un tiempo de uso determinado de la lámpara LED, en condiciones de operación específicas, dividido por el flujo luminoso inicial de la lámpara, comúnmente expresado como porcentaje.

Factor potencia: Relación entre la potencia eléctrica activa (P) y la potencia eléctrica aparente (S), en un circuito de corriente alterna.

Color: Niveles de energía de luz.

Iluminancia: Es la cantidad de luz que incide en una superficie. Es el nivel de iluminación y se mide en luxes (lx). $\text{Lux} = \frac{\text{lúmen}}{\text{m}^2}$

Índice de rendimiento de color: Capacidad que tiene una lámpara para reproducir fielmente los colores de los objetos. Se mide en una escala de 0 a 100

Temperatura de color: Se refiere a la apariencia o tonalidad de la luz que emite la fuente luminosa. La forma en que vemos cierto ambiente depende de la tonalidad de la luz de la lámpara.

Mantenimiento de lúmenes (DLL): Es un proceso natural de envejecimiento que sufren todas las lámparas y se establece como el cociente de los lúmenes al 70% de la vida nominal.

Temperatura de color correlacionada (TCC): expresa la apariencia cromática de una fuente de luz por comparación con la apariencia cromática de la luz emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta determinada, su unidad de medida es el Kelvin (K).

Demanda eléctrica: Se refiere a la cantidad de energía que se necesita en un momento determinado y se mide en kilowatts (kW.).

Consumo de energía: Es la energía eléctrica utilizada por toda o una parte de una instalación de utilización durante un periodo determinado (CONUEE, 2013). Su unidad de medida es el kilowatt-hora (kWh).

Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA): Es la cantidad de potencia instalada por metro cuadrado (W/m²) (SENER, 2004).

Índice de Consumo de Energía Eléctrica: Es el consumo energético por metro cuadrado a lo largo de un año (kWh/m² año).

REFERENCIAS

Libros

- Aguilar, M. & Blanca, V. (1995). *Iluminación y color*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Allan, W.B. (1973). *Fibre Optics, Theory and Practice*. Michigan, EUA: Springer.
- Boyce, P. & Raynham, P. (Eds.). (2009). *The SSL Lighting Handbook*. Recuperado de <http://www.cibse.org>
- Capilla, P., Artigas, J. & Pujol, J. (2002). *Fundamentos de Colorimetría*. Valencia, España: Maite Simon.
- Cetto, A. (2003). *La luz en la naturaleza y en el laboratorio*. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Gifford, R. (2007). *Environmental Psychology. Principles and Practice*. Victoria, Canada: 4ª ed. Optimal Books.
- IESNA. (2000). *The IESNA Lighting Handbook. Reference & Application*. Estados Unidos de América: IES.
- Martín, F. (2007). *Instalaciones de iluminación*. Madrid, España: Fundación Escuela de la Edificación.
- Muñoz, J. (1994). *Instalaciones de Iluminación en la Arquitectura*. Valladolid, España: Secretariado de publicaciones Universidad de Valladolid.
- Newton, I. (1952). *Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light based on the 4 ed.* London 1730. New York: Dover.
- SLL. (2009). *The SLL Lighting Handbook*. London, England: SLL.
- Style, O. (2013). *Energía Solar Autónoma. Planificación, dimensionado e instalación de un sistema fotovoltaico autónomo*. 1 ed. Itaca.

Sitios Web

- Assaf, L. (2002). *Manual de Iluminación Eficiente ELI*. Recuperado el 22 de agosto de 2013 desde <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dllyv/files/2011/05/cap12.pdf>
- Cobham, M. (2012). *Using light as a sales tool in retail. Using functional, cognitive and emotional approaches*. Recuperado el 5 de enero de 2013 desde [#http://www.youtube.com/watch?v=Y7hTxc2D1e8&feature=youtube_gdata_player #](http://www.youtube.com/watch?v=Y7hTxc2D1e8&feature=youtube_gdata_player)

Colombo, E. & O'Donell, B. (2002). *Manual de Iluminación Eficiente ELI*. Recuperado el 13 de marzo de 2013 desde <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dllyv/files/2011/05/cap02.pdf>

FPO. IP Research&Communities (2014). United States Patent Steneby. Recuperado el 20 de agosto de 2014 desde <http://www.freepatentsonline.com/7813061.pdf>

Mercamétrica Ediciones S.A. (2008). *Directorio de Centros comerciales*. Recuperado el 12 de octubre de 2012 desde <http://www.mercametrica.com/>

http://www.heliodon.com.mx/grafica_descargas.html

Muhamad, W., Yusof Mat Zain, M. & Wahab, Norfishah. (2010). *Energy Efficient Lighting System Design for Building*. Recuperado el 20 de septiembre 2012 desde http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5416080&tag=1

Netdisseny. (2013) *Nociones básicas de diseño. Teoría del color*. Recuperado el 21 de noviembre de 2013 desde <http://www.weblogictnet.com/descargas/teoria-del-color.pdf>

U.S. Department of Commerce, National Oceanic & Atmospheric Administration, NOAA. (2008). Earth System Research Laboratory, *NOAA Solar Calculator*. Recuperado el 30 de marzo de 2014 desde <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/>

Pattini, A. (2011). *Manual de Iluminación Eficiente ELI*. Recuperado el 13 marzo de 2013 desde <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dllyv/files/2011/06/cap11.pdf>

Press Release, Parans Solar Lighting launches world novelty-hybrid luminaire combining sunlight and LED light. (2012). *Parans*. Recuperado de <http://www.parans.com/eng/latestnews/news/documents/PM201219ENGBildHybridluminairecombiningSunlightandLED-light.pdf>

SENER (2011). *Balance Nacional de Energía: Consumo de energía en los sectores residencial, comercial y público*. Recuperado el 15 de octubre de 2012 <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C03>

SENER (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-013-ENER-2004, Eficiencia energética para sistemas de alumbrado en vialidades y áreas exteriores públicas*. Recuperado el 20 de agosto de 2013 desde http://www.anes.org/anes/formularios/LeyesyNormas/Leyes/LEY_NOM013ENER2004.pdf

<http://www.himawari-net.co.jp>

Artículos

- Haans, A. (2014). The natural preference in people's appraisal of light. *Journal of Environmental Psychology* 39, 51-61
- Babin, B., Hardesty, D., Suter, T. (2003). Color and shopping intentions: The intervening effect of price fairness and perceived affect. *Journal of Business Research*, 56, 541-551. doi: 10.1016/S0148-2963(01)00246-6
- Veitch, J.A., Hine, D.W., & Gifford, R (1993). End users' knowledge, preferences, and beliefs for lighting. *Journal of Interior Design*, 19(2), 15-26.
- Guarnizo, C.L., Veintimilla, J.C. & Jaramillo, J.L. (2013) Diseño de un concentrador solar experimental para sistemas de iluminación natural con fibra óptica basado en la utilización de lentes de Fresnel. *Universidad Técnica Particular de Loja*
- Joseph, C. & HW, L. (2003). Electricity consumption characteristics in shopping malls in subtropical climates. *Energy Conversion and Management*, 44, 1391-1398. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/pbidi.unam.mx:8080/science/article/pii/S019689040200167X>
- Hidayetoglu, M. L., Yildirim, K. & Akalin, A. (2011). The effects of color and light on indoor wayfinding and the evaluation of the perceived environment. *Journal of Environmental Psychology*, 32, 50-58
- Joo Han, H., Riffat, S.B. & Lim, S. H. (2013). Fiber optic solar lighting: Functional competitiveness and potential. *Solar Energy*, 94, 86-101
- Mayhoub, M. & Carter, D. (2011). A feasibility study for hybrid lighting systems. *Building and Environment*, 53, 83-94. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.011
- Mayhoub, M. & Carter, D. (2011). The costs and benefits of using daylight guidance to light office buildings. *Building and Environment*, 46, 698-710. doi: 10.1016/j.buildenv.2010.03.014
- Mayhoub, M. & Carter, D. (2011). Hybrid lighting systems: Performance and design. *Lighting Research and Technology*, 0, 1-16. doi: 10.1177/1477153511416324
- Nair, MG., Ramaurthy, K. & Ganesan AR. (2013). Classification of indoor daylight enhancement systems. *Lighting Research and Technology*, 46, 245-267. doi:10.1177/1477153513483299
- Park, J. & Hong, T.. (2011). Maintenance management process for reducing CO2 emission in shopping mall complexes. *Energy and Buildings*, 43, 894-904. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.010

Quartier, K., Vanrie, J. & Van Cleempoel, K. (2014) As real as it gets: What role does lighting have on consumer's perception of atmosphere, emotions and behavior?. *Journal of Environmental Psychology*, 39, 32-39
DOI: 10.1016/j.jenvp.2014.04.005

Smolders, K., Kort, Y. & Berg, S. (2013). Daytime light exposure and feelings of vitality: Result of a field study during regular weekdays. *Journal of Environmental Psychology*, 36, 270-279. DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.09.004

Song, J., Yang, Y. & Zhu, Y. (2013). A high precision tracking system based on a hybrid strategy designed for concentrated sunlight transmission via fibers. *Renewable Energy*, 57, 12-19. doi: 10.1016/j.renene.2013.01.022

Tesis

García, M. (2012). *Luz Natural: Sistema de captación, transmisión y distribución*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Guadarrama, C. (2011). *Luz natural. Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del s.XIX del centro Histórico de la Ciudad de México*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Hinojosa Gómez, L. (2007). *Tópicos Selectos de Fibra Óptica*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hgo.

Islas, C (1995). *Ahorro de Energía y diagnósticos energéticos*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Valeriano, A. (2010). *Iluminación Natural en Arquitectura, validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México*. . (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Zamora, L. (2008). *La Tecnología de LEDs. Prospectiva del Diseño Industrial de objetos portadores de luz*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Seminarios

Cobham, M. (2012). *Using light as a sales tool in retail. Using functional, cognitive and emotional approaches*. Philips Lighting University, 2012 Recuperado de http://www.youtube.com/watch?v=Y7hTxc2D1e8&feature=youtube_gdata_player#