

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DIFUSIÓN DE LA LUZ NATURAL
EN UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN MEDIANTE FIBRA ÓPTICA**

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

LUIS ALBERTO GONZÁLEZ ASTUDILLO
gonzast.91@gmail.com

Director: Magister. Santiago Pulla Galindo

2016

DECLARACIÓN

Yo, Luis Alberto González Astudillo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.

Luis Alberto González Astudillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Alberto González Astudillo, bajo mi supervisión.

Ing. Santiago Pulla Galindo.

DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme la sabiduría, salud y bienestar para recorrer el camino que me ha llevado a culminar una meta y una etapa más en mi vida.

A mi director de tesis Ing. Santiago Pulla, quien a lo largo de la carrera y durante el desarrollo del presente trabajo estuvo impartiendo su tiempo y conocimientos con el fin de sacar adelante el proyecto desarrollado.

A mis padres Luis González O. y Rosa Astudillo con quienes he compartido cada etapa de formación, porque gracias al apoyo esfuerzo y dedicación que han puesto sobre mi he logrado culminar un ciclo de mi vida muy importante.

A mí amada esposa que me apoyo con su incondicional amor y me motivo en los momentos más esenciales de mi vida universitaria, por entender la importancia de la misma.

A mis profesores quienes durante cada año de estudio han sabido aportar su conocimiento, y sus experiencias que han fortalecido cada día los conocimientos adquiridos dentro y fuera de la institución.

LUIS ALBERTO

DEDICATORIA

A mi Dios señor y dador de vida, a mi esposa Nube, a mis padres y hermanos quienes con su presencia, alegría y dedicación han estado presentes en cada momento suscitado, ya que son ustedes quienes han inspirado mi deseo de superación, ustedes son los que me han enseñado que en la vida todo lo que se quiere se obtiene con esfuerzo y dedicación, para tener una gran satisfacción al final, como la tengo ahora al ver terminado mi proyecto.

A mi familia y personas que han estado pendientes en cada paso dado, con el afán de extenderme una mano amiga en cada momento sin importar las adversidades presentadas.

A todos los amigos y compañeros con quienes se ha compartido las vivencias en las aulas de la universidad, gracias al compañerismo, amistad y conocimiento que me han brindado.

LUIS ALBERTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN MEDIANTE FIBRA ÓPTICA ENFOCADA EN LA DIFUSIÓN DE LA LUZ Y PRUEBAS DE LABORATORIO	13
1.1. Introducción	13
1.2. Conceptos generales de Luminotecnia	13
1.2.1. Reflexión	13
1.2.1.1. Regular o especular	13
1.2.1.2. Difusa	14
1.2.1.3. Mixta	14
1.2.2. Luminancia	14
1.2.3. Iluminancia	14
1.2.4. Transmisión	15
1.3. Características de funcionamiento de los elementos de un sistema de iluminación natural mediante fibra óptica	15
1.3.1. Lente concentrador solar de Fresnel	15
1.3.1.1. Características básicas de los lentes de Fresnel	16
1.3.2. Filtros o Lentes solares ultravioleta e infrarrojo (UV/NIR)	17
1.3.2.1. Filtro Infrarrojo (NIR)	17
1.3.2.2. Filtro Ultravioleta (UV)	17
1.3.3. Transportador de luz natural de fibra óptica	17
1.3.4. Difusor de la luz natural	18
1.4. Instrumentos de medición de laboratorio	18
1.4.1. Esfera de Ulbricht o Integración	18
1.4.2. Goniophotometer	19
1.4.3. Luxómetro	20
2. ESTADO DEL ARTE RESPECTO A LA DIFUSIÓN DE LA LUZ	21
2.1. Introducción	21
2.2. Métodos Teóricos y Experimentales locales	21
2.2.1. Métodos Experimentales	21
2.2.1.1. Detalles prototipo -A- instaurado	22
2.2.1.2. Detalles prototipo -B- instaurado	22
2.2.1.3. Detalles prototipo -C- instaurado	23
2.2.1.4. Detalles prototipo -D- instaurado	23
2.2.1.5. Análisis de los prototipos	24
2.3. Métodos Teóricos y Experimentales no locales	25

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DIFUSIÓN DE LA LUZ	28
3.1. Introducción	28
3.2. Diseño y construcción de los elementos del prototipo	28
3.2.1. Diseño y construcción de un concentrador solar	28
3.2.2. Diseño y construcción de un seguidor solar	30
3.2.3. Tablas de las características de los elementos del prototipo de un concentrador solar	32
3.3. Diseño y construcción de un difusor instaurado	34
3.3.1. Diseño de un difusor en Solid Works	34
3.3.2. Construcción de un difusor	35
4. PRUEBAS DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN MEDIANTE FIBRA ÓPTICA CON ORIENTACIÓN A LA DIFUSIÓN DE LA LUZ	36
4.1. Introducción	36
4.2. Análisis de la Irradiación solar y la humedad relativa en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica	36
4.3. Pruebas de Laboratorio	38
4.4. Pruebas de los difusores con el Luxómetro	38
4.5. Pruebas de los difusores con el Esfera de Ulbricht	39
4.6. Pruebas de los difusores con el fotogoniómetro	41
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	44
5.1. Comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio de los difusores D1, D2	44
5.2. Comparación de la distribución de la luz en el espacio de los difusores D1 y D2 con una lámpara fluorescente compacta	48
5.3. Análisis adversos de las pruebas de los difusores D1 y D2	49

LISTA DE FIGURAS

1.1.	Tipos de reflexión ¹	14
1.2.	Transmisión de la luz. ²	15
1.3.	Concentrador solar. ³	16
1.4.	Lente de Fresnel. ⁴	16
1.5.	Esfera de Ulbricht o de integración. ⁵	19
1.6.	Goniophotometer. ⁶	19
1.7.	Luxómetro. ⁷	20
2.1.	Difusor de vidrio transparente, con agua clorada. ⁸	22
2.2.	(a) Difusor de tubo de ensayo, relleno de silicón, (b) Prueba del difusor tubular. ⁹	22
2.3.	(a) Difusor de plástico, relleno de aire, (b) Prueba del difusor plástico. ¹⁰	23
2.4.	(a) Difusor de cristal, relleno de agua clorada, (b) Prueba del difusor de cristal. ¹¹	23
2.5.	Difusor Optimizado de plafón. ¹²	24
2.6.	(a)Partículas de dispersión, y el tamaño medio de las partículas de dispersión es 2um, (b)Tamaño del VSDs son los 3 cm,3 cm, 2 mm. ¹³	25
2.7.	Aparato experimental, para mediciones de la variación de la luz blanca. ¹⁴	26
3.1.	Diseño del concentrador solar. ¹⁵	29
3.2.	Tipos de movimiento del concentrador solar. ¹⁶	29
3.3.	(a)Prototipo de aluminio, (b)Prototipo de plástico ABS. ¹⁷	30
3.4.	Circuito esquemático del seguidor solar. ¹⁸	31
3.5.	Circuito electrónico del concentrador solar. ¹⁹	31
3.6.	Diseño difusor de luz natural. ²⁰	34
3.7.	Diseño difusor de luz natural. ²¹	35
3.8.	Molde del difusor de luz natural. ²²	35
3.9.	Difusor de luz natural terminado. ²³	35
4.1.	Ubicación de la facultad de Ingeniería Eléctrica, latitud - longitud. ²⁴	37
4.2.	(a)Difusor 1 - D1, (b)Difusor 2 - D2. ²⁵	38
4.3.	Distancia entre el difusor y el sensor de luz. ²⁶	38
4.4.	Medición con luxómetro. ²⁷	39
4.5.	Difusor emitiendo luz natural. ²⁸	40
4.6.	Difusor en la esfera de ulbrich. ²⁹	41
4.7.	Difusor fijo y centrado en el fotogoniómetro. ³⁰	42
5.1.	Comparación luminancia D1 con D2. ³¹	44
5.2.	Gráfica dentro del espectro visible D1. ³²	45
5.3.	Gráfica dentro del espectro visible D2. ³³	45
5.4.	Gráfica 3D isolux difusor D1. ³⁴	46

5.5. Gráfica 3D isolux difusor D2. ³⁵	47
5.6. (a)Distribución de la luz D1, (b)Distribución de la luz D2, (c)Distribución de la luz lámpara fluorescente (foco ahorrador). ³⁶	48
5.7. Dimerizado de fuente artificial con difusor D2. ³⁷	49

LISTA DE TABLAS

I.	Tabla comparativa de prototipos. ³⁸	24
I.	Características del lente de fresnel. ³⁹	32
II.	Características del difusor - Lente de Vidrio. ⁴⁰	32
III.	Características de la fibra óptica con chaqueta. ⁴¹	33
IV.	Características del filamento de fibra óptica. ⁴²	33
V.	Características arduino uno. ⁴³	33
VI.	Características servo motor. ⁴⁴	34
I.	Irradiación solar sobre la facultad de Ingeniería Eléctrica ⁴⁵	37
II.	Humedad relativa en la facultad de Ingeniería Eléctrica ⁴⁶	37
III.	Promedio luxes D1, D2 ⁴⁷	39
I.	Parámetros esfera de ulbrich ⁴⁸	45
II.	Parámetros fotométricos difusores D1, D2. ⁴⁹	46
III.	Determinación el difusor mas eficiente. ⁵⁰	47

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A.** PRUEBAS DE LABORATORIO, FOTOGRAFÍAS MEDICIONES DEL LUXÓMETRO
- ANEXO B.** PRUEBAS DE LABORATORIO, REPORTE ESFERA DE ULBRICHT.
- ANEXO C.** PRUEBAS DE LABORATORIO, REPORTE GONIOMETRO.
- ANEXO D.** PROGRAMACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR, COMPILADOR PARA ARDUINO.
- ANEXO E.** INFORME DIALUX LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA (FOCO AHORRADOR).

RESUMEN

La presente investigación se centra en el análisis de la difusión de la luz natural en un sistema de iluminación mediante fibra óptica, este análisis se efectuara al ser comparados dos tipos de difusores el primer difusor es comercial hecho de vidrio, el segundo es un difusor instaurado hecho de resina transparente, así mismo para que estos difusores logren su propósito que es el de poder dispersar luz, además de pasar por una serie de pruebas de laboratorio, se diseñó y construyó un prototipo de un sistema de iluminación natural mediante fibra óptica que sirvió para poder captar y transportar la luz natural proveniente del sol, a este sistema se adaptaron los difusores encargados de dispersar la luz transportada, los difusores fueron evaluados en el laboratorio de alumbrado público que se encuentra en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Católica de Cuenca, por equipos certificados como son el luxómetro, la esfera de Ulbricht y el fotogoniómetro de los que se obtuvieron varios parámetros fotométricos relacionados a la luminotecnia por cada difusor, y con estos datos tenemos el conocimiento sobre el desempeño, rendimiento lumínico y dificultades de los mismos.

Referido al sistemas de iluminación natural mediante fibra óptica, es un sistemas utilizado en la iluminación de ambientes oscuros haciendo la función de una luminaria, este cumple tres funciones para poder llevar la luz natural proveniente del sol hacia un ambiente cualquiera, la primera es la de concentrar la luz natural en un solo punto focal esto se obtiene empleando lentes de fresnel, la segunda función es la de transportar esta luz concentrada hacia un ambiente cualquiera, para esto se empleó filamentos de fibras ópticas de plástico y la última función es la de poder dispersar la luz natural transportada en un ambiente de tal manera que este sea iluminado, para esto fue necesario colocar un difusor.

Palabras clave: Luminotecnia, iluminación, fotometría, sistema, difusor.

ABSTRACT

This investigation is centered on the analysis of the diffusion of natural light in a system of illumination by fiber optics, this analysis is done by comparing two types of diffusers, the first diffuser is made of glass and commercially sold, the second is a diffuser created of transparent resin, in the same way so as both can achieve their job of dispersing light, furthermore they have to pass various lab tests. A prototype of a natural light system was designed and constructed out of fiber optics that helped capture and transport natural light that we get from the sun, to this system we adapted the diffusers in charge of dispersing the light that was transported. The diffusers were evaluated in the Public Lighting Laboratories that exists in the Electrical Engineering Faculty of the Catholic University of Cuenca, by certified equipment like the luxometer, the Ulbricht Sphere and the photogoniometer from which various photometric parameters related to luminotecnica were obtained for each diffuser, and with this data we obtain the knowledge of their performance, luminic resilience and their difficulties as well.

Referring to the system of natural illumination through fiber optics, it is a system used in the illumination of dark ambiances doing the work of a luminary, this meets with three functions to be able to transport natural sun light to any ambience, the first one is the concentration of natural light on a single focal point, this is achieved by the use of fresnel lenses. The second one is the transportation of this concentrated light onto any ambience, for this we employed the use of fiber optic filaments made from plastic. And the last function is being able to disperse the natural light which was transported into an ambience in such a way that it is illuminated by it, for this the use of a diffuser was necessary.

Keywords: luminotecnica (lighting engineering), illumination, photometry, system, diffuser.

Capítulo 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN MEDIANTE FIBRA ÓPTICA ENFOCADA EN LA DIFUSIÓN DE LA LUZ Y PRUEBAS DE LABORATORIO

1.1. Introducción

En general un sistema de iluminación natural mediante fibra óptica al igual que un sistema de iluminación convencional necesitan ser especializados para las diferentes aplicaciones para iluminación, por lo que estos sistemas también deben pasar por diferentes pruebas estrictas de luminotecnia en laboratorio, para así poder verificar su eficiencia, y así poder hacer comparaciones entre diferentes sistemas de iluminación.

Se dará una descripción del funcionamiento de todos los elementos que conforman este sistema de iluminación natural, además de todos los instrumentos de medición utilizados a la hora de realizar las pruebas de laboratorio y dentro de este estudio también conoceremos los parámetros de luminotecnia que intervendrán en este análisis.

1.2. Conceptos generales de Luminotecnia

1.2.1. Reflexión

Se denomina así a la devolución de un rayo luminoso por una superficie en la que choca, sin cambiar las radiaciones que lo componen. Esta característica es necesario tenerla muy en cuenta en la elaboración de los reflectores de los aparatos de alumbrado.[Domínguez, 2004]

Existen 3 tipos de reflexiones fundamentales, a saber:

1.2.1.1. Regular o especular

”La reflexión es regular, cuando la luz reflejada forma con la perpendicular a la superficie reflectante, el mismo ángulo que la luz incidente o de entrada. Este tipo de reflexión se presenta en los metales pulidos y en los líquidos.”[Domínguez, 2004]

¹Domínguez 2004 instalaciones

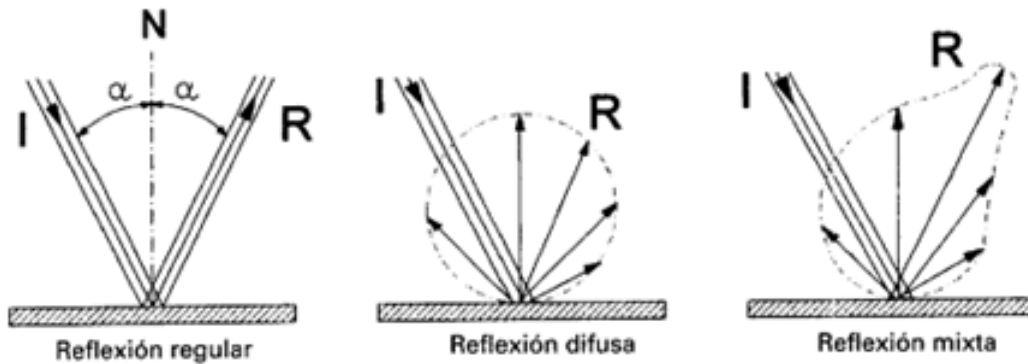


Fig. 1.1: Tipos de reflexión¹

1.2.1.2. Difusa

“La reflexión es difusa cuando el rayo incidente se difunde en todas las direcciones. Es la reflexión típica de las superficies mates como el papel, nieve, etc”. [Domínguez, 2004]

1.2.1.3. Mixta

La reflexión se denomina mixta, cuando es intermedia entre las otras dos, o sea que una parte de la luz incidente se refleja y otra se difunde. Este tipo de reflexión es típico en metales no pulidos, papel brillante, superficies barnizadas, etc. [Domínguez, 2004]

1.2.2. Luminancia

“Es la intensidad luminosa (I) emitida por una superficie reflectora ajena a la fuente luminosa o por una superficie autoluminosa. Se mide en *candelas/m²*”. [Domínguez, 2004]

$$Luminancia = \frac{I}{S} = \frac{I}{S * \cos\Theta} \quad (1.1)$$

La luminancia es una sensación subjetiva de la claridad de un manantial de luz o de un objeto reflexivo, que puede ser considerada también como el grado de deslumbramiento, ya que la luz se hace visible solamente cuando es rechazada por un objeto sobre la cual choca o la deja pasar dispersándola. [Domínguez, 2004]

1.2.3. Iluminancia

“El nivel de iluminación es la relación entre el flujo luminoso y la superficie iluminada. Tiene una unidad de medida propia llamada lux (lx)”. [Domínguez, 2004]

$$Iluminancia = E = \frac{I}{S * \cos\Theta} \quad (1.2)$$

“Esta magnitud es muy importante en luminotecnia ya que caracteriza a la fuente de luz; en otras palabras, define en conjunto la eficiencia de una luminaria y las lámparas que contiene, y se representa por la curvas de distribución luminosa.”[Domínguez, 2004]

1.2.4. Transmisión

La transmisión de la luz se da en el momento que un rayo de luz atraviesa una superficie que puede tener o no irregularidades, y en esta superficie ya no está un solo rayo reflejado o refractado, sino que la energía proveniente de la luz se distribuye en todas las trayectorias desde el punto de incidencia.

El efecto de transmisión de la luz se divide en 3 clases:

Transmisión Dirigida. Esta se da cuando la luz atraviesa una superficie transparente y la luz se propaga en una sola dirección sin ninguna alteración.

Transmisión Difusa. Esta se da cuando la luz atraviesa una superficie translúcida y su propagación es simétrica en toda dirección.

Transmisión Semidifusa. Esta se da cuando la luz atraviesa una superficie translúcida menos densa y su propagación es de forma asimétrica en todas las direcciones.

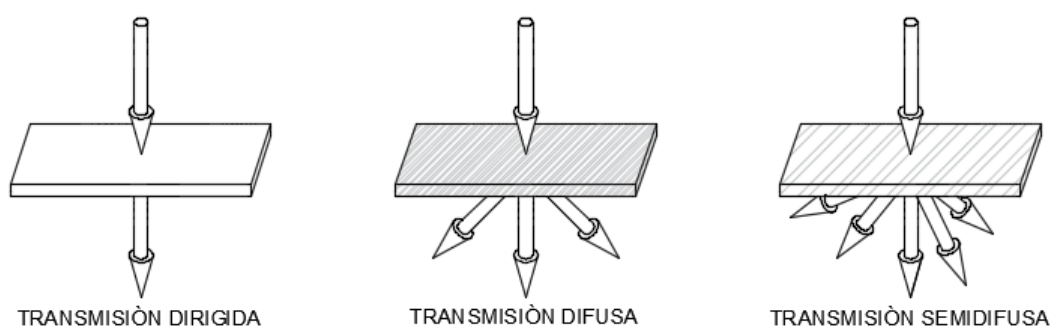


Fig. 1.2: Transmisión de la luz.²

1.3. Características de funcionamiento de los elementos de un sistema de iluminación natural mediante fibra óptica

1.3.1. Lente concentrador solar de Fresnel

“En general, se conoce como concentradores o colectores solares, a elementos aptos de concentrar la luz que proviene del sol, luego concentrarla, y por último dirigirla hacia un punto fijo.”[Leuarnizo, 2013]

²Fuente Propia - Autocad

“El sistema de iluminación natural mediante fibra óptica utiliza lentes tipo refractivo ya que concentra al igual los rayos provenientes del sol en un solo punto, en este caso en el comienzo del filamento de fibra óptica.”[Leuarnizo, 2013]



Fig. 1.3: Concentrador solar.³

Los Sistemas de Iluminación mediante fibra óptica que se pueden obtener en el mercado, utilizan como concentrador un sistema montado en base a lentes de Fresnel, ya que tienen mayor rendimiento y se adaptan mejor a la fibra óptica. Estos concentradores aumentan la potencia de los rayos de luz solar sin utilizar elementos electrónicos, además son de bajo peso y tienen dimensiones pequeñas en comparación a los concentradores de forma parabólica construidos de metal y que requieren de una extensa superficie de incidencia de luz.[Leuarnizo, 2013]

1.3.1.1. Características básicas de los lentes de Fresnel

Un concentrador de luz solar se caracteriza por la capacidad de recolección de la luz, por la relación de concentración y por la distancia focal.

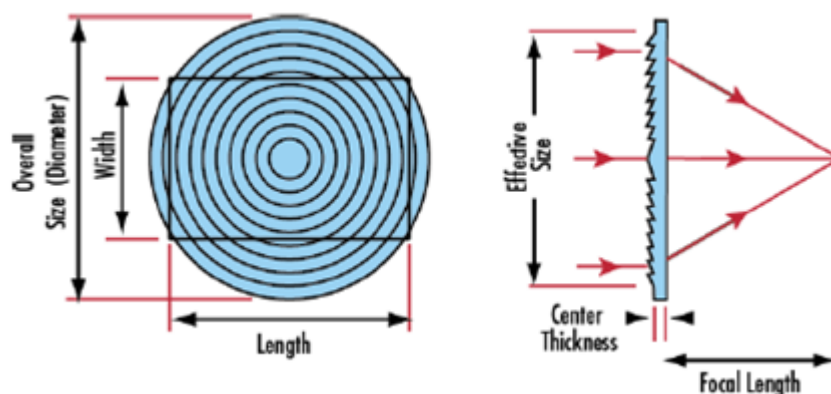


Fig. 1.4: Lente de Fresnel.⁴

³Fuente Propia - Inkscape

⁴www.edmundoptics.com

Capacidad de Recolección de luz solar El área de la superficie de un concentrador tiene relación con la cantidad de luz recolectada, también se relaciona la radiación solar sobre la superficie que en términos de luminotecnía, se nombra iluminancia, y que en el sistema internacional de unidades, es medida en luxes. [Leuarnizo, 2013]

Relación de Concentración de luz solar “La relación de concentración de la luz solar se establece como la relación de la cantidad de energía captada por unidad de superficie en un concentrado, y la cantidad de energía captada por unidad de superficie en el punto focal.”[Leuarnizo, 2013]

Distancia Focal “La distancia focal corresponde a la longitud más corta entre el centro de la superficie del concentrador, y el punto en el que desembocan los rayos de luz solares recolectados.”[Leuarnizo, 2013]

1.3.2. Filtros o Lentes solares ultravioleta e infrarrojo (UV/NIR)

Estos filtros son principalmente los más utilizados para limitar la luz transmitida a ciertas longitudes de onda, no es deseable para este tipo de sistemas que acumulan calor, porque puede dañar la fibra, lo mas importante de los lentes es que reflejan los rayos UV/NIR, y transmite luz visible (VIS).

1.3.2.1. Filtro Infrarrojo (NIR)

Los Filtros infrarrojos son diseñados para bloquear la luz comprendida en el entorno de las longitudes de onda media del espectro IR, pero dejan pasar la luz visible. Son usados usualmente contra luces intensas e incandescentes para evitar que el calor traspase el dispositivo de iluminación.[TABERNEIRO,]

1.3.2.2. Filtro Ultravioleta (UV)

Los filtros ultravioletas bloquean la luz ultravioleta (UV) dejando pasar la luz visible. Son usados usualmente para la fotografía, pero también se utilizan en sistemas de iluminación natural ya que ayudan a proteger a la fibra óptica; además ayudara aumentar la vida útil de esta.[TABERNEIRO,]

1.3.3. Transportador de luz natural de fibra óptica

“El filamento de fibra óptica que se emplea en este sistema de iluminación, principalmente proviene de las telecomunicaciones, y su característica mas relevante es que posee un coeficiente de transmisión alto, una flexibilidad admisible, y su precio es bajo.”[Cristian Leuarnizo, 2012]

Es de importancia mencionar que la posibilidad de implementar filtros selectivos de diferentes longitudes de onda através del manejo de las propiedades geométricas y ópticas del filamento de fibra. Esta propiedad es atrayente desde el punto de vista de limitar el ancho de banda de la

luz del Sol, eliminando las longitudes de onda IR y UV.[Cristian Leuarnizo, 2012]

Las pérdidas por la difusión de la luz en el filamento de fibra óptica, son obtenidas de la absorción, dispersión, y de la radiación perdida en el exterior. La absorción se debe únicamente al material del que este hecho la fibra, mientras que la dispersión y la radiación perdida dependen del material y de los desperfectos estructurales que puedan haber en la fibra óptica. En términos generales, las pérdidas en un transportador de luz se establece al ser medida la potencia óptica, P_e , a la entrada de la fibra óptica, la potencia a la salida, P_s , tras haber recorrido la luz una cierta longitud L . [Cristian Leuarnizo, 2012]

1.3.4. Difusor de la luz natural

Todas las fibras ópticas de iluminación que se concentran en un solo punto, emiten luz solar en uno de sus extremos. El transportador óptico de fibra está construido por varios hilos de fibra, cubiertos por una chaqueta protectora, opaca y flexible. Este tipo de fibras se combinan con accesorios ópticos como son los difusores para obtener la distribución deseada de luz en cierto lugar. Los lentes de Fresnel divergentes son los más usados para la difusión de luz, en este tipo de aplicaciones. [Pro, 2011]

La difusión de la luz a elegir, depende mucho del lugar que se quiera iluminar con luz natural. La iluminación de lugares de trabajo o mostradores requiere de haces de luz concentrados y paralelos; mientras que la iluminación de una habitación, podría emplear luz difusa y no tan concentrada. [Pro, 2011]

1.4. Instrumentos de medición de laboratorio

1.4.1. Esfera de Ulbricht o Integración

El flujo luminoso de una lámpara bajo prueba se determina mediante sustitución con ayuda de una lámpara de referencia dentro de una esfera de integración. Cuando una lámpara es colocada dentro de una esfera cerrada, cuya pared interna está cubierta por un material difusor y de alta reflectancia (por ejemplo, Sulfato de Bario), la energía luminosa proveniente de la lámpara se distribuye en toda la superficie interna de la esfera como consecuencia de las múltiples reflexiones que sufre la luz; de esta manera la iluminancia E_v generada en cualquier punto de la superficie de la esfera es proporcional al flujo luminoso de la fuente de radiación F_v , independientemente de su distribución o direccionalidad; y por tanto es posible conocer el flujo luminoso total mediante: [Oidor et al., 2003]

$$\Phi_v = \frac{4\pi r^2(1 - \rho)E_v}{\rho} \quad (1.3)$$

donde ρ es la reflectancia de la pared interna de la esfera y r su radio.

⁵www.lisungroup.com



Fig. 1.5: Esfera de Ulbricht o de integración.⁵

1.4.2. Goniophotometer

“El Goniophotometer es un montaje de laboratorio en el cual se realizan pruebas normalizadas a todo tipo de luminarias como las utilizadas en alumbrado público, de interiores, ornamentales, etc.”[Arias Cuéllar et al., 2011]

El objetivo de las pruebas, llamadas fotometrías, es conocer la forma de la distribución lumínica y la medida de las intensidades luminosas alrededor de la fuente bajo prueba. Con esta información es posible obtener diagramas como el isocandela e isolux, así como también la matriz de distribución de intensidades luminosas y en general, diagramas polares de intensidad en diferentes planos. Posteriormente, es posible determinar la calidad del reflector y refractores utilizados en la luminaria, las pérdidas con respecto a la potencia de la fuente utilizada, como también estimar la calidad de la iluminación sobre un área especificada al utilizar una luminaria determinada. Cabe anotar que la matriz de intensidades es el elemento de caracterización más importante que puede tener una fuente luminosa hoy en día. Además, permite obtener cualquier tipo de cálculo lumínico: bien sea punto a punto o bien sea de promedios; tanto de luminancia como de iluminancia y permite igualmente calcular deslumbramiento y uniformidades como elementos evaluadores de la calidad de la iluminación en el alumbrado público. En la lumino-tecnia moderna, es llamada la huella digital de las luminarias.[Arias Cuéllar et al., 2011]

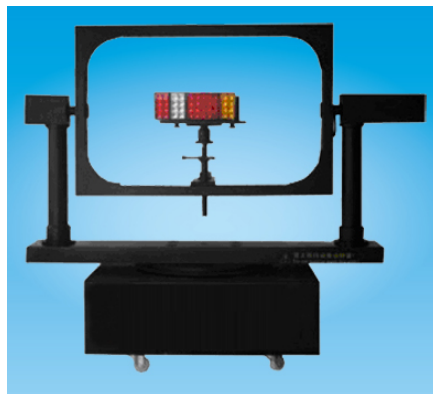


Fig. 1.6: Goniophotometer.⁶

1.4.3. Luxómetro

El Luxómetro es un instrumento utilizado para la medición del nivel de iluminación en cierto lugar como puestos de trabajo, su unidad de medida es el lux (lx). El Luxómetro tiene una celda fotoeléctrica que absorbe la luz y la convierte en emisiones eléctricas, los cuales son interpretados y visualizados en un display en su escala correspondiente de luxes.



Fig. 1.7: Luxómetro.⁷

⁶www.lisungroup.com

⁷www.sobreconceptos.com

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE RESPECTO A LA DIFUSIÓN DE LA LUZ

2.1. Introducción

Los difusores ópticos se ocupan ampliamente en diversos dispositivos ópticos como las luminarias led, ya que tienen una gran capacidad de dispersión de luz, esta se obtiene cuando la luz atraviesa una superficie escabrosa, se pueden fabricar de diferentes materiales que tengan partículas transparentes, la dispersión de la luz también se la puede modificar cambiando el espesor del material que será utilizado.

Los difusores ópticos son también utilizados al momento de querer dispersar la luz proveniente del sol, para así iluminar cuartos oscuros con luz de una manera natural, teniendo así un ahorro económico, además de salud.

Para llegar a tener una alta eficiencia en el difusor instaurado, así mismo como en la dispersión de la luz, se debe analizar diferentes medios de estudio que se han empleado a los difusores ópticos, ya sean estos medios locales o internacionales.

2.2. Métodos Teóricos y Experimentales locales

Respecto a los métodos teóricos, no existe investigación alguna en nuestro país, en cambio existe un Método experimental aplicado a los sistemas de iluminación natural, se nombrará el método que se ha investigado en nuestro país, así como los que se han empleado en investigaciones internacionales donde existe más información respecto a la difusión de la luz en el siguiente tema.

2.2.1. Métodos Experimentales

En nuestro país existe una investigación de manera experimental, donde se analizan algunos prototipos creados de difusores, utilizados para dispersar la luz natural, estos difusores han sido construidos de manera básica ya que los materiales manipulados no son aptos para la difusión de la luz.[Leuarnizo, 2013]

Los prototipos creados y analizados fueron los siguientes:

2.2.1.1. Detalles prototipo -A- instaurado

“El prototipo lo han construido mediante un tubo de vidrio transparente, sellado en uno de sus extremos mecánicamente. Para que la luz se se disperse se ha utilizado agua clorada, y como medio para la transmisión de la luz han utilizado fibra óptica multimodo.”[Leuarnizo, 2013]

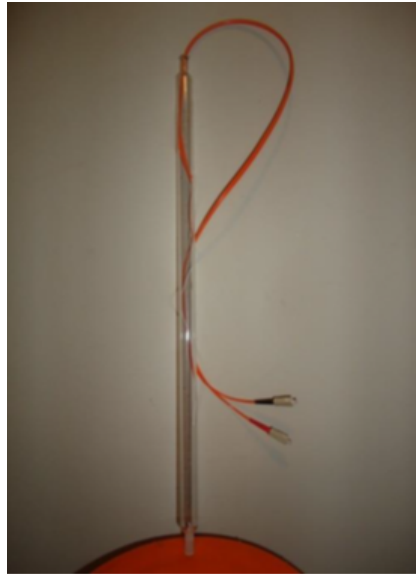


Fig. 2.1: Difusor de vidrio transparente, con agua clorada.¹

2.2.1.2. Detalles prototipo -B- instaurado

“El prototipo lo han construido con un tubo de ensayo quedando de forma tubular, relleno con silicona transparente y alimentado con fibra óptica empleada para la iluminación natural.”[Leuarnizo, 2013]

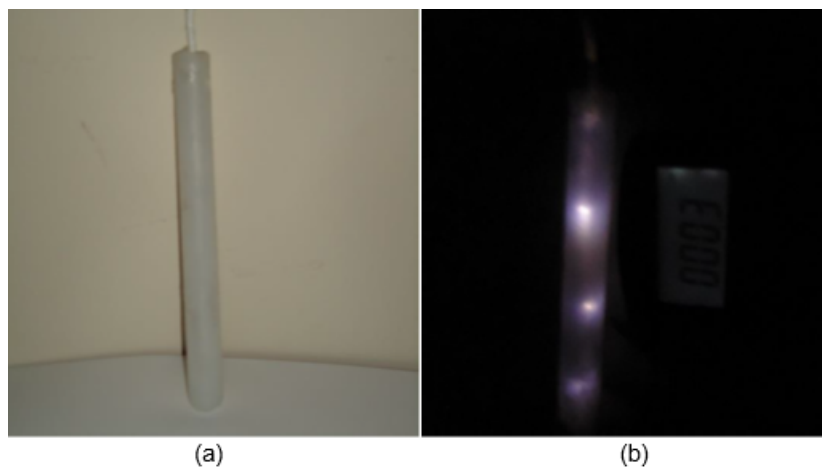


Fig. 2.2: (a) Difusor de tubo de ensayo, relleno de silicón, (b) Prueba del difusor tubular.²

¹www.dspace.utpl.edu.ec(León Guarnizo Cristian Electrónica.pdf)

²www.dspace.utpl.edu.ec(León Guarnizo Cristian Electrónica.pdf)

2.2.1.3. Detalles prototipo -C- instaurado

“El prototipo fue construido con un recipiente de plástico transparente, este fue relleno con aire, y la alimentación se la hizo con varios hilos de fibra óptica.”[Leuarnizo, 2013]

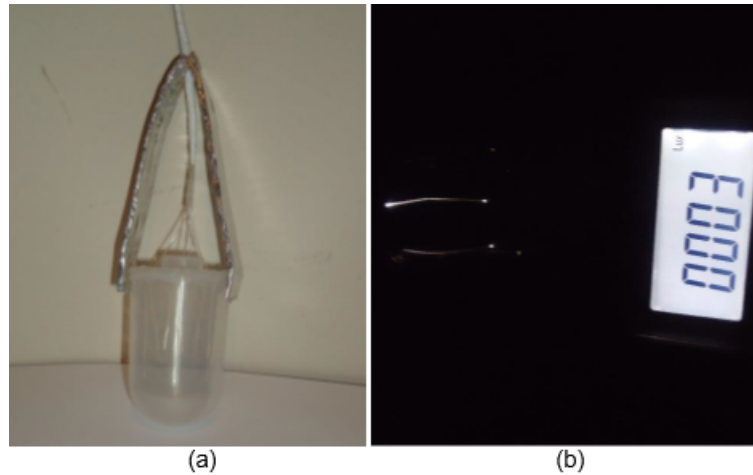


Fig. 2.3: (a) Difusor de plástico, relleno de aire, (b) Prueba del difusor plástico.³

2.2.1.4. Detalles prototipo -D- instaurado

“El prototipo se construyó con un tubo de cristal, este fue relleno de agua clorada y fue conectado su final con fibra óptica dentro del tubo de cristal.”[Leuarnizo, 2013]

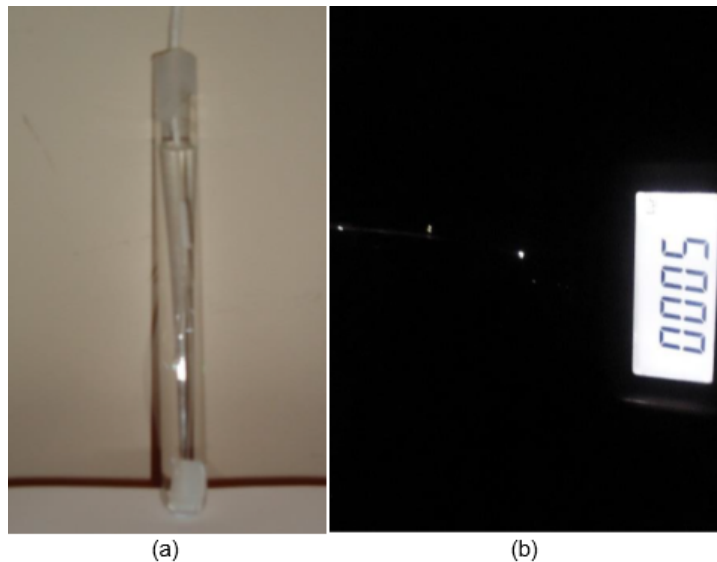


Fig. 2.4: (a) Difusor de cristal, relleno de agua clorada, (b) Prueba del difusor de cristal.⁴

³www.dspace.utpl.edu.ec(León Guarnizo Cristian Electrónica.pdf)

⁴www.dspace.utpl.edu.ec(León Guarnizo Cristian Electrónica.pdf)

TABLA I: Tabla comparativa de prototipos.⁵

PROTOTIPOS	DISPERSIÓN	LUXES
A	1	1
B	2	2
C	2	2
D	3	3

2.2.1.5. Análisis de los prototipos

Todos los prototipos fueron evaluados aplicándolos a dos tipos de mediciones, estas dieron datos sobre su dispersión y sobre su nivel de iluminación (luxes) de cada uno de los prototipos, los datos obtenidos fueron tabulados y se muestran en la siguiente tabla, con su respectivo rango de aceptación:

1 – malo, 2 – regular, 3 – bueno, 4 – muy bueno

Tomando en cuenta los datos tabulados nos damos en cuenta que el prototipo tipo D es el más funcional de todos los prototipos, pero así mismo llega a niveles de iluminación muy baja.

Los investigadores llegan a crear un nuevo difusor, llamándolo “Prototipo Optimizado”, este supera ampliamente al difusor tipo D, ya que llegaron a obtener datos con rangos mas altos, obtuvo 54 luxes (Fig. 2.5), siendo este difusor el mas eficiente.



Fig. 2.5: Difusor Optimizado de plafón.⁶

⁵www.dspace.utpl.edu.ec(León Guarnizo Cristian Electrónica.pdf)

⁶www.dspace.utpl.edu.ec(León Guarnizo Cristian Electrónica.pdf)

2.3. Métodos Teóricos y Experimentales no locales

En este tipo de estudios han profundizado más en la investigación respecto a la difusión utilizando tecnología led de luz blanca (WLLEDs). Los WLLEDs se fabrican mediante el empleo tecnologías de led basados en GaN (nitruro de galio), porque a base de GaN los leds presentan numerosas ventajas, tales como una alta eficiencia cuántica, baja caída de eficiencia y la extracción de luz efectiva.[Ma et al., 2015]

Para evitar el deslumbramiento en este tipo de tecnología se ha determinado el uso un volumen difusor de dispersión (VSD), así se amplía el ángulo de haz de una lámpara. Por lo que, la integración de los VSD con WLLEDs, a proporcionado iluminación de alta eficiencia convirtiéndose cada vez en una tecnología popular para aplicaciones en la iluminación.[Ma et al., 2015]

Para la construcción del prototipo difusor han tomado como material principal el pegamento (epoxi), en el proceso de preparación, la solución resultante se movió durante 30 minutos. Posteriormente, la muestra fue colocada en un horno al vacío durante 20 minutos para que se eliminen las burbujas. La muestra por ultimo se vertió en un molde de plástico dejándola que se solidifique, quedando como se muestra en la figura (Fig.2.5).[Ma et al., 2015]

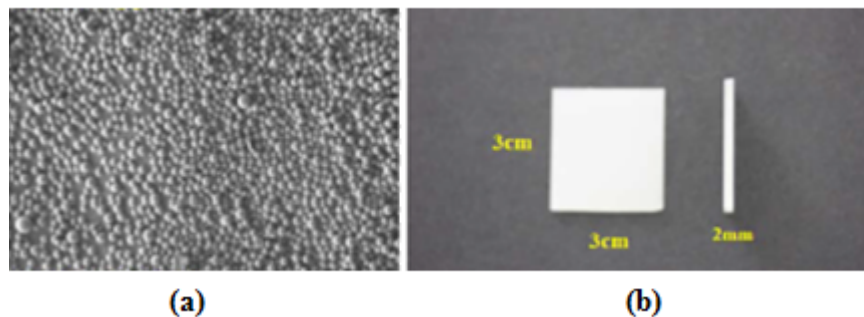


Fig. 2.6: (a)Partículas de dispersión, y el tamaño medio de las partículas de dispersión es 2 μ m, (b)Tamaño del VSDs son los 3 cm,3 cm, 2 mm.⁸

El difusor resultante antes de ser evaluado con la luz Led, deberá pasar por varias pruebas, para confirmar la uniformidad de la distribución de la dispersión de partículas en su VSD y también para medir su eficiencia en la transmisión de luz en su VSD.[Ma et al., 2015]

Una vez realizadas las pruebas al difusor, este pasa a ser evaluado por un aparato experimental y se procede a realizar sus mediciones, donde utilizan una esfera de integración para determinar la variación de componentes de color de la luz blanca, además se utilizó una caja de color negra de 27cm³, la cual elimina el ruido, es decir absorbe los rayos de luz de fondo de dispersión protegiendo así los resultados. Para que esta prueba sea mas estable se disminuyo la influencia del calor sobre el WLLED, mediante un disipador de calor (ventilador).[Ma et al., 2015]

⁸Effects of Volume Scattering Diffusers on the Color Variation of White Light LEDs

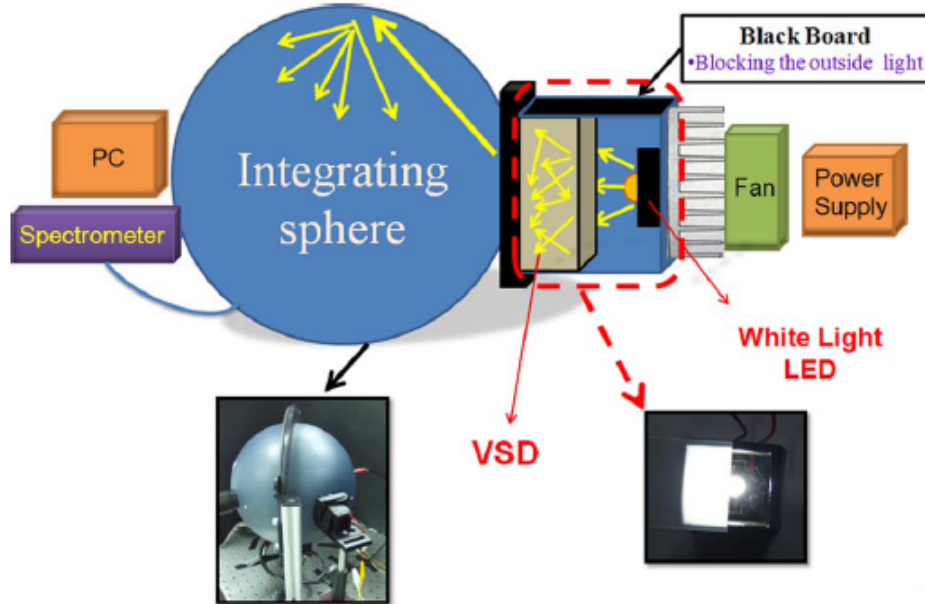


Fig. 2.7: Aparato experimental, para mediciones de la variación de la luz blanca.⁹

En este estudio han logrado determinar algunas fórmulas para aplicarlas en el estudio, las principales son:

El flujo luminoso total original de un difusor

$$\mathcal{L}_{original} = K_m \int_{780}^{380} V(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

El flujo luminoso total dispersado por un difusor

$$\mathcal{L}_{dispersado} = K_m \int_{780}^{380} V(\lambda) \cdot \phi'(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

La constante K_m depende del día o de la noche y $V(\lambda)$ indica la respuesta espectral relativa de un ojo. Los términos $\phi'(\lambda)$ y $\phi(\lambda)$ son los flujos de radiación para cada longitud de onda con y sin pasar a través del difusor, respectivamente.[Ma et al., 2015]

“Los índices de refracción del aire, pegamento y las partículas de dispersión son η_0 , η_1 , y η_2 , respectivamente.”[Ma et al., 2015]

La pérdida de energía de la luz asociada con la luz que pasa a través de un difusor se expresa por $Loss(\lambda)$.

$$Loss(\lambda) = 2\pi \int_0^{\pi/2} r(D, \phi_r, \lambda) d\phi_r \quad (2.3)$$

⁹Effects of Volume Scattering Diffusers on the Color Variation of White Light LEDs

donde r es el factor de reflectancia relativa a la posición del observador. El término D es el radio de las partículas de dispersión y ϕ_r es el ángulo entre la normal de la superficie de un difusor y la línea desde el punto incidente a la posición del observador.[Ma et al., 2015]

Capítulo 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN NATURAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DIFUSIÓN DE LA LUZ

3.1. Introducción

El diseño del prototipo principalmente se lo realizó en el software Solid Works, teniendo así más precisión sobre todo en las medidas para que se ajusten cada componente al prototipo.

La construcción se la realizó mediante impresión 3D y su ensamblado fue a mano, además el prototipo contiene elementos electrónicos para el seguidor solar, el cual fue integrado al prototipo para una mayor eficiencia al momento de captar la luz solar, a continuación se indica en detalle el diseño de cada elemento del prototipo.

3.2. Diseño y construcción de los elementos del prototipo

3.2.1. Diseño y construcción de un concentrador solar

En el diseño del concentrador solar, se obtuvieron las medidas de cada componente los cuales son la matriz de lentes de fresnel, servo motores, conectores de fibra óptica y los sensores (fotoresistencias), se obtuvo de la tabla de características un dato adicional importante que es la distancia focal de los lentes de fresnel.

Con las medidas, se procedió con el diseño del concentrador en el software solid works, la forma del concentrador se la hizo rectangular siguiendo la forma de los lentes de fresnel, se diseñó un riel para poder asentar los lentes de fresnel, el mismo también sirve para poder colocar con facilidad los lentes, para los sensores se diseñó soportes a cada lado de la parte superior del concentrador, con sus respectivas protecciones, las cuales ayudan a repartir de forma equitativa la luz a cada sensor.

Para poder definir la altura desde los lentes de fresnel hasta los conectores se tomó en cuenta la distancia focal de los lentes, esta distancia se determinó de las características de los lentes la misma que es 12cm, en base a esta distancia se determinó la altura del concentrador.

¹Fuente propia - Solid Works

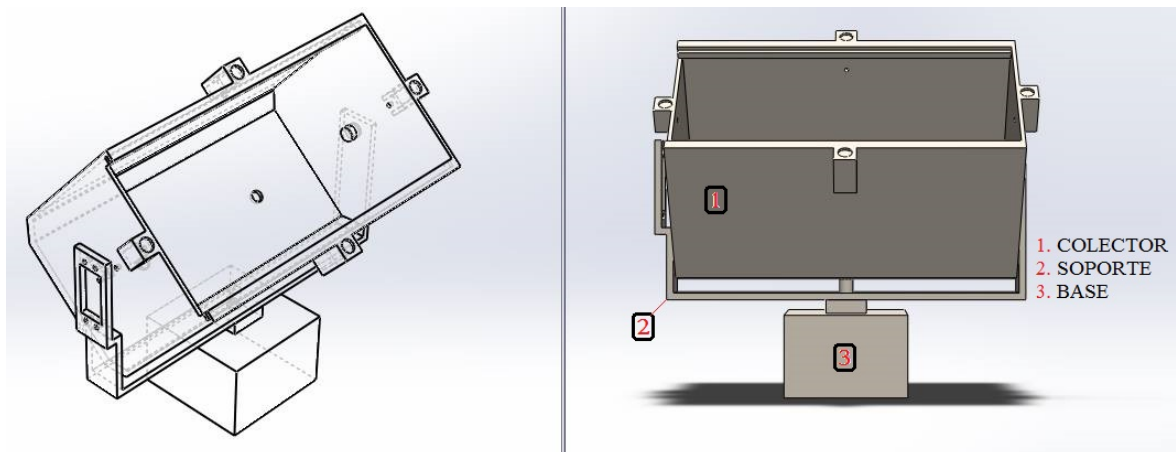


Fig. 3.1: Diseño del concentrador solar.¹

El concentrador tiene movimiento vertical como horizontal, por lo que se diseñó un soporte de tal manera que al colocar los motores produzcan dichos movimientos de manera simple, para lo cual se calculó los centros de gravedad del concentrador para tener los puntos medios exactos donde se colocarán los ejes de los motores para que no se esfuercen demasiado.

Por último se diseñó la base del equipo la cual se la realizó de forma cuadrada para que sirva como equilibrio del soporte y el concentrador, esta es hueca para poder ocultar la parte electrónica quedando visualmente mejor.

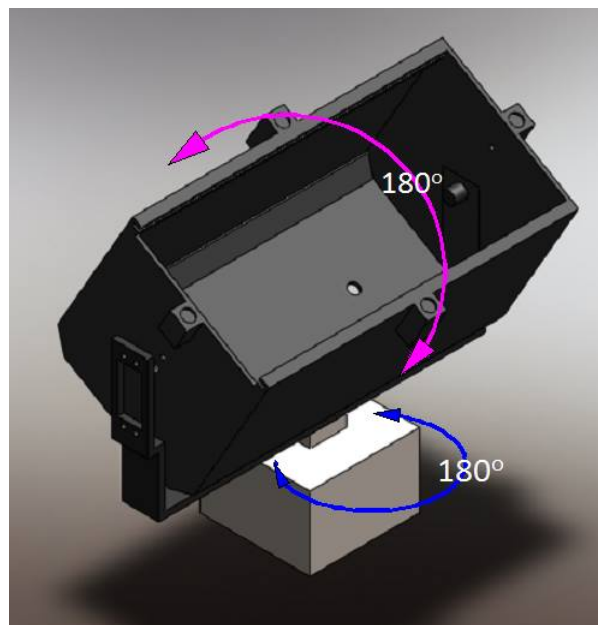


Fig. 3.2: Tipos de movimiento del concentrador solar.²

El material elegido para la estructura del concentrador en general principalmente fue el aluminio por su dureza y por ser uno de los metales más livianos, pero al momento de realizar una

²Fuente propia - Solid Works

prueba de movimiento, tuvimos una serie de inconvenientes por su peso, por lo que el motor encargado de mover el concentrador en el eje y no pudo ejercer movimiento.

Para poder superar la dificultad solo se cambio de material, en vez del aluminio se utilizó un tipo de plástico llamado “acrilonitrilo butadieno estireno”, conocido más por sus siglas ABS, ya que es mucho mas liviano, soporta altas temperaturas y es muy usado para las impresiones 3D; solicitando la impresión directamente desde el software Solid Works a una impresora 3D, reduciendo trabajo del ensamblaje a mano, diseñándolo de esta manera calzó correctamente cada componente del concentrador.

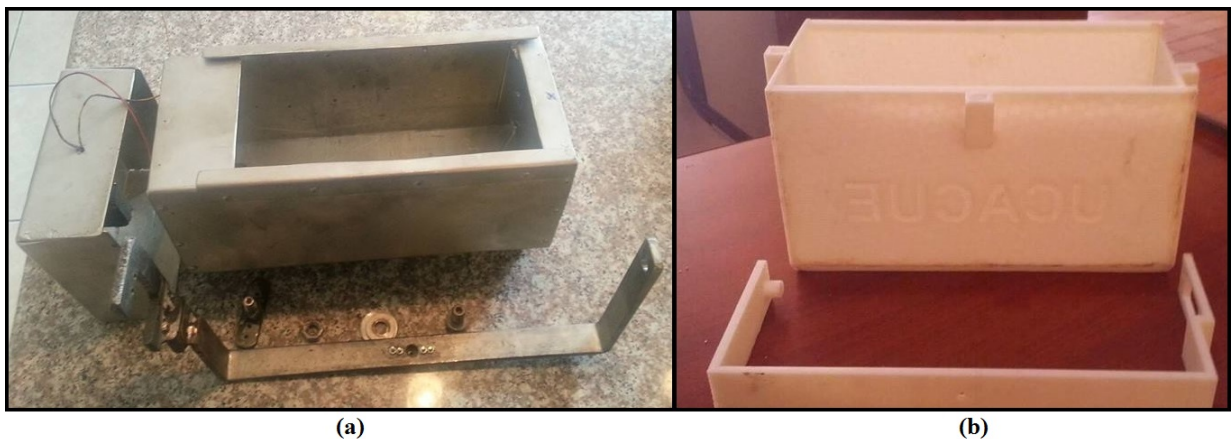


Fig. 3.3: (a)Prototipo de aluminio, (b)Prototipo de plástico ABS.³

3.2.2. Diseño y construcción de un seguidor solar

El seguidor solar consiste en el concentrador solar, mas el circuito electrónico de control.

Para el circuito de control se utilizo un diseño ya instaurado al cual se le aumento más líneas de programación como se indica en el Anexo A, para mayor desempeño del seguidor, se le incorporó su propia fuente de poder independiente la cual es una batería.

El seguidor solar diseñado es un seguidor solar activo por que contiene un control electrónico que se integra en la tarjeta electrónica arduino uno[McRoberts, 2011].

Este tipo de seguidor activo realiza movimientos en los ejes x y y , el método que se utiliza para el seguimiento del sol, es mediante sensores de fotoresistencias, son dos para cada eje, los cuales nos ayudan a buscar el ángulo correcto del colector, para que disponga de un mejor rendimiento en todo el año, es decir siempre el lente debe estar a 90 grados respecto a los rayos del sol, al momento de captación de luz natural.

Los elementos electrónicos del seguidor solar se encuentra en la base del concentrador ocultos por el espacio existente, suficiente para colocar cada elemento, los sensores son la única parte electrónica que se encuentran en la parte superior del colector, uno a cada lado, todo el cableado

³Fuente propia

⁴Fuente propia - Fritzing

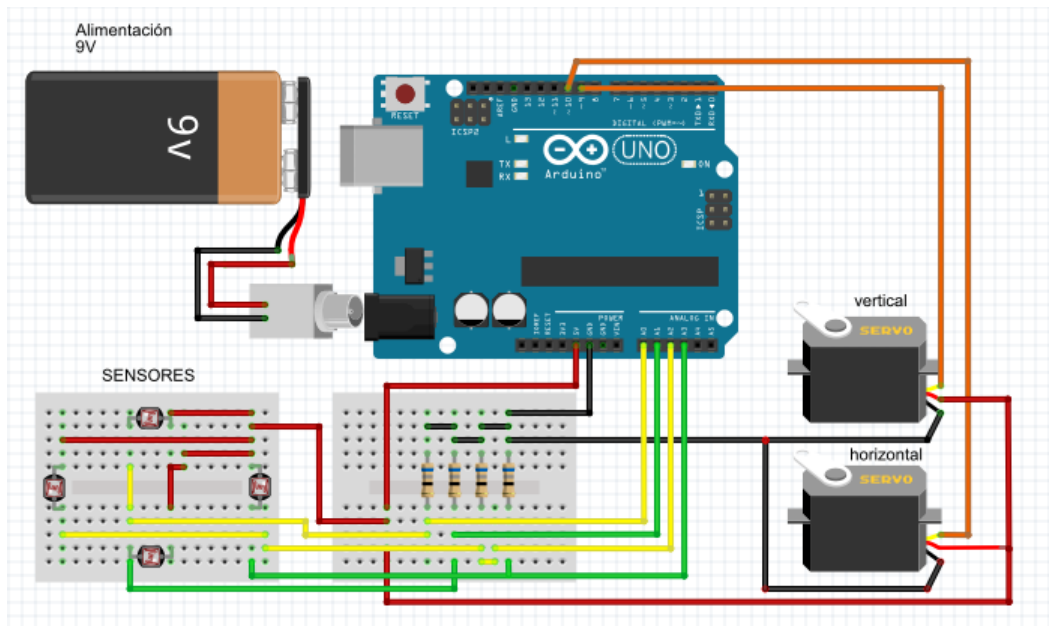


Fig. 3.4: Circuito esquemático del seguidor solar.⁴

esta hecho de forma estructurada, de tal manera que se pueda detectar errores al momento del funcionamiento.

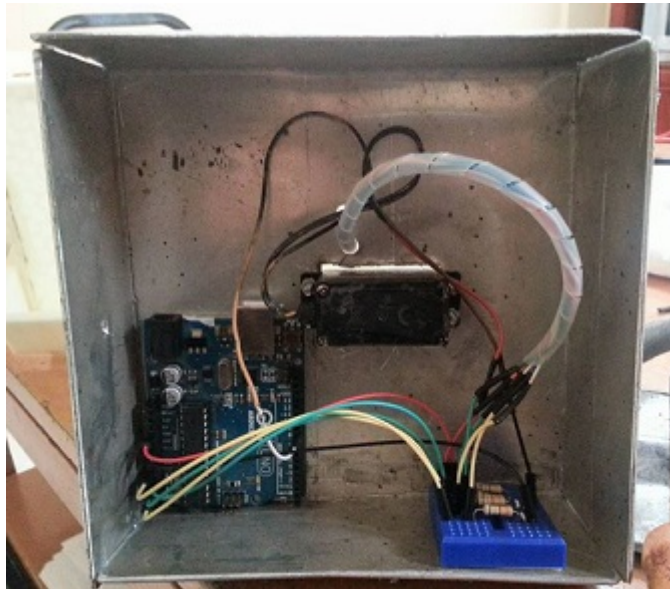


Fig. 3.5: Circuito electrónico del concentrador solar.⁵

⁵Fuente propia

3.2.3. Tablas de las características de los elementos del prototipo de un concentrador solar

A continuación se muestran las tablas características de cada elemento utilizado en el sistema de iluminación de una forma mas detallada.

TABLA I: Características del lente de fresnel.⁶

	Nombre	Conjunto de lentes de Fresnel
	Modelo	BHPA120-3-S
	Material	Acrílico (PMMA)
	Tamaño total	244*122mm
	Tamaño por lente	122*122mm
	Espesor	3mm
	Distancia Focal	120mm
	Transmisión (%)	92 (from 400-1100nm)
	Índice de refracción	1.491
	Temperatura de funcionamiento(C)	80(máximo)
	Aplicación	Colector solar

TABLA II: Características del difusor - Lente de Vidrio.⁷

	Nombre	Lente de Vidrio
	Material	Borosilicato de vidrio
	Transmitancia	99 %
	Tolerancia	+/- 0,2 mm
	Transmisión de luz	96 %
	Dimensiones	41*20*36mm
	Temperatura de resistencia(C)	821 (Máximo))
	Aplicación	Difusión de luz natural

⁶Fuente propia

⁷Fuente propia

⁸Fuente propia

⁹Fuente propia

¹⁰Fuente propia

¹¹Fuente propia

TABLA III: Características de la fibra óptica con chaqueta.⁸


	Nombre	Fibra Óptica con núcleo sólido
	Material	polimetacrilato (PMMA)
	Diámetro núcleo	2mm
	Diámetro total	3.5mm
	Transmisión de luz	85 % - 92 %
	Largo	30ft
	Temperatura de funcionamiento (C)	-15 a 120
	Aplicación	Transmisión de luz natural

TABLA IV: Características del filamento de fibra óptica.⁹


	Nombre	Filamento de fibra óptica de iluminación
	Material	polimetacrilato (PMMA)
	Diámetro total	2mm
	Transmisión de luz	85 % - 92 %
	Largo	100ft
	Temperatura de fusión (C)	160
	Aplicación	Transmisión de luz natural

TABLA V: Características arduino uno.¹⁰

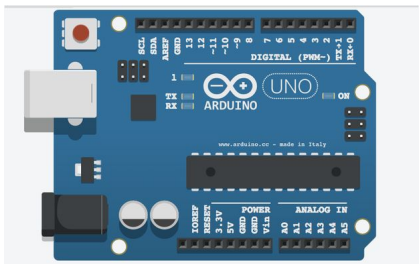

	Nombre	Arduino UNO
	Microcontrolador	ATmega328P)
	Tensión de funcionamiento	5V
	Pines Digitales	6
	Pines Analógicos	6
	Corriente DC por pin I/O	20mA
	Dimensiones	68.6 * 53.4mm
	Aplicación	Control Electrónico - Seguidor Solar

TABLA VI: Características servo motor.¹¹

	Nombre	Servo motor
	Modelo	MS - 311
	Voltaje de operación	4,8V - 6V
	Velocidad	0,22seg / 60
	Torque	4.1kg / cm
	Dimensiones	41*20*36mm
	Temperatura de funcionamiento (C)	-30 a 60
	Aplicación	movimiento ejes x, y

3.3. Diseño y construcción de un difusor instaurado

3.3.1. Diseño de un difusor en Solid Works

El diseño del difusor al igual que el concentrador solar, se lo realizo en el software Solid Works.

Para su diseño se tomo en cuenta el diámetro del filamento de fibra óptica que vamos a utilizar, en este caso el diámetro es de 2mm por lo que se diseño un difusor pequeño, el modelo es de forma redonda.

Para que el difusor sea mas eficiente se modificó la forma en la parte inferior, dándole una curvatura, la luz natural choca en esta curva reflectándose de mejor manera alrededor del mismo, en la parte superior se realizo un orificio para que la fibra óptica se adapte de manera fácil al difusor.

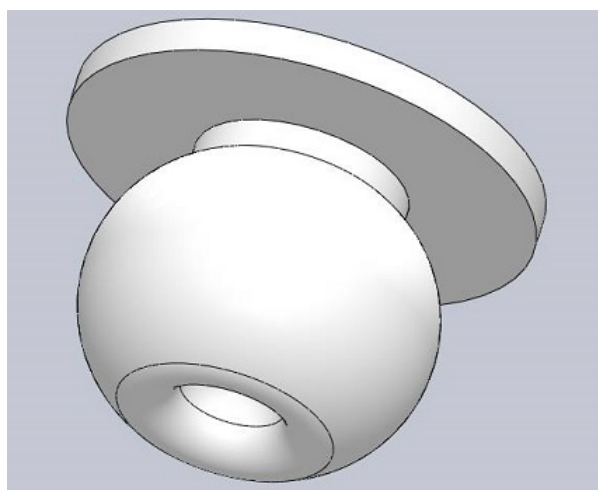


Fig. 3.6: Diseño difusor de luz natural.¹²

¹²Fuente propia - Solid works

3.3.2. Construcción de un difusor

Para su construcción, el diseño del difusor fue impreso en 3D en plástico ABS [Fig.3.7], cuando se tuvo en físico el difusor se procedió a construir el molde que fue hecho de caucho blanco [Fig.3.8], y dentro de este molde se vació la resina transparente con su respectivo secante, la cual se demoró en secarse aproximadamente 10 días [Fig.3.9].

Para que el difusor emita mas la luz natural se construyo de un material transparente, en este caso se ocupo resina la cual es muy transparente y permite el paso de la luz natural.



Fig. 3.7: Diseño difusor de luz natural.¹³



Fig. 3.8: Molde del difusor de luz natural.¹⁴



Fig. 3.9: Difusor de luz natural terminado.¹⁵

¹³Fuente propia

¹⁴Fuente propia

¹⁵Fuente propia

Capítulo 4

PRUEBAS DE LABORATORIO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN MEDIANTE FIBRA ÓPTICA CON ORIENTACIÓN A LA DIFUSIÓN DE LA LUZ

4.1. Introducción

Las pruebas de los difusores de luz natural, se lo realiza para tener el conocimiento sobre el desempeño y rendimiento lumínico de los difusores y se los determinan mediante la realización de algunas pruebas de laboratorio como la obtención de curvas de distribución, intensidad luminosa emitida por los difusores, obtención de la eficiencia, flujo luminoso total, etc.

En la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Católica de Cuenca se encuentra implementado el laboratorio de alumbrado público para ayudar en la investigación del mismo, con la ayuda de éste se realizarán las pruebas fotométricas de laboratorio para los difusores (una por cada difusor) y al final se realizará la comparación de los difusores y se identificara cual es más eficiente en el prototipo a desarrollar.

Los equipos que posee la facultad en el laboratorio para realizar las pruebas son: el luxómetro, la esfera de Ulbricht y el Goniophotometer; los cuales cumplen con su respectiva certificación, a continuación se detalla cada prueba.

4.2. Análisis de la Irradiación solar y la humedad relativa en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

El análisis de la irradiación al igual que la humedad relativa se la realiza en la facultad, ya que en la misma se encuentra el laboratorio de alumbrado donde realizaremos todas las pruebas de luminotecnía. Los datos de irradiación solar y humedad se los tomo de la estación meteorológica online de la NASA (Surface meteorology and Solar Energy)[NASA, 2016].

Para obtener la irradiación y humedad relativa justo en la facultad de ingeniería, se obtuvieron las coordenadas geográficas, con la ayuda de google maps, se obtuvo su latitud y longitud que están remarcadas de rojo en la figura 4.1.

¹Fuente propia - Google Maps

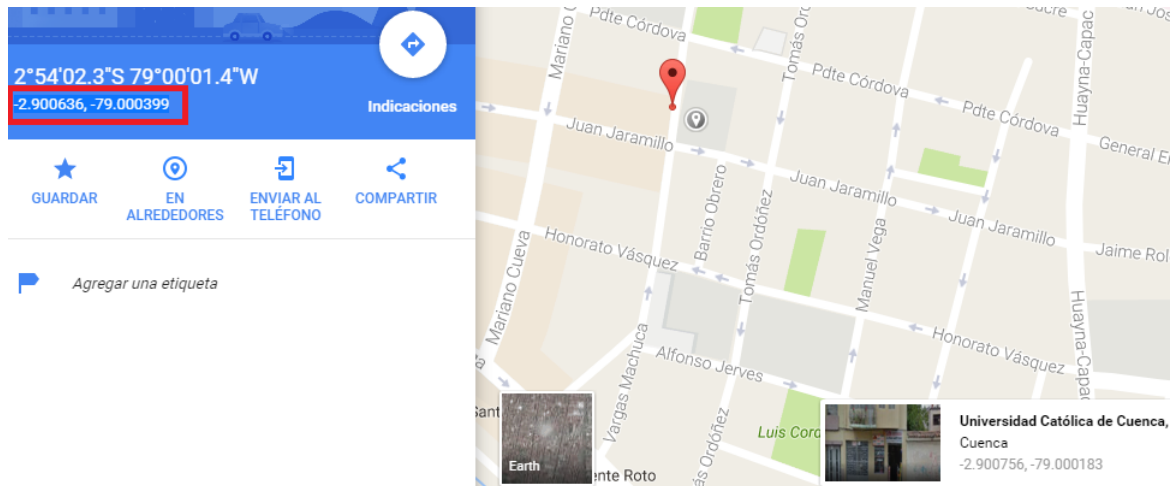


Fig. 4.1: Ubicación de la facultad de Ingeniería Eléctrica, latitud - longitud.¹

Las coordenadas geográficas se las ingresa directamente en el recuadro de la página de la estación meteorológica de la Nasa, la cual nos muestra las siguientes tablas de la irradiación solar y la humedad relativa que existe sobre la facultad de Ingeniería Eléctrica:

TABLA I: Irradiación solar sobre la facultad de Ingeniería Eléctrica²

Lat-2.901 Lon-79	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom. Anual
Difusa	2.22	2.31	2.35	2.19	2.00	1.88	1.93	2,08	2.26	2.31	2.22	2.17	2.16
Directa	3.22	2.78	2.96	3.09	3.32	3.54	3.49	3,54	3.24	3.16	3.68	3.61	3.30
Inclina 0	4.33	4.19	4.39	4.28	4.14	4.10	4.14	4,43	4.49	4.48	4.66	4.50	4.34
Inclina 2	4.35	4.20	4.39	4.29	4.18	4.15	4.18	4,46	4.50	4.49	4.69	4.53	4.37
Inclina 17	4.42	4.18	4.27	4.32	4.34	4.39	4.40	4,56	4.43	4.44	4.75	4.64	4.43
Inclina 90	2.26	1.93	1.61	2.09	2.51	2.76	2.66	2,36	1.80	1.89	2.33	2.44	2.22
OPI	4.42	4.22	4.39	4.33	4.35	4.44	4.43	4,56	4.50	4.49	4.75	4.64	4.46

TABLA II: Humedad relativa en la facultad de Ingeniería Eléctrica³

Lat-2.901 Lon-79	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
Prom. 22 años	76.6	79.4	77.9	77.3	72.3	66.5	57.3	51.2	51.2	54.8	64.3	74.4	66.8

En la tabla I, se observa los datos de irradiación solar de todos los meses del año, las pruebas realizadas fue en el mes de Agosto, según la tabla obtenemos que en este mes existen unas de las mejores irradiaciones solares, por lo que nos ayudara a obtener mejores resultados al momento de realizar las pruebas en el laboratorio.

²Fuente propia - Estación meteorológica de la NASA

³Fuente propia - Estación meteorológica de la NASA

En la Tabla II, tenemos los datos de la humedad relativa pero esta hace un promedio dentro de 22 años, y nos enfocamos en el mes de agosto que tiene una humedad relativa de 51,2 %, este dato es muy importante para poder ingresarlo al momento de realizar las pruebas de laboratorio.

4.3. Pruebas de Laboratorio

4.4. Pruebas de los difusores con el Luxómetro

Las pruebas con el luxómetro se las efectuó en un día despejado y soleado, para poder obtener los datos más altos de iluminancia en luxes de cada difusor D1 y D2.

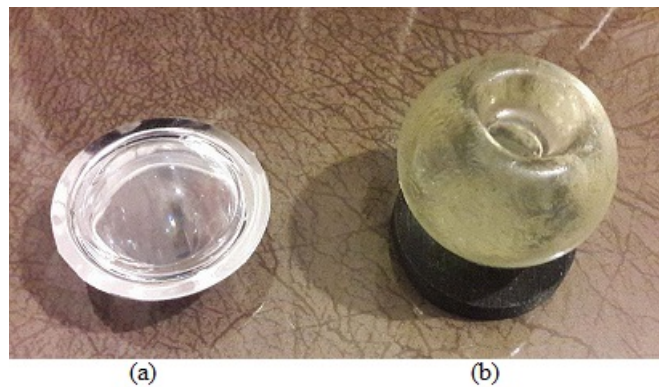


Fig. 4.2: (a)Difusor 1 - D1, (b)Difusor 2 - D2.⁴

Para realizar las mediciones se utilizó el luxómetro Extech-HD450, con el cual obtuvimos diferentes datos de iluminancia en luxes. A cada difusor D1 y D2, se les tomo 4 mediciones a una distancia de 6cm entre el sensor de luz y el difusor como se muestra en la figura 4.3.

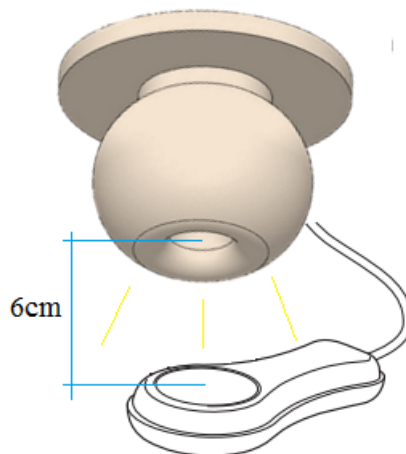


Fig. 4.3: Distancia entre el difusor y el sensor de luz.⁵

⁴Fuente propia

⁵Fuente propia



Fig. 4.4: Medición con luxómetro.⁶

Cada medición se la tabulo tomando como referencia el Anexo B, para poder posteriormente sacar un promedio de la luminancia de cada difusor en luxes, y así tener un dato mas preciso para posteriormente poder hacer una comparación entre los difusores D1 y D2, se muestra a continuación la tabla:

TABLA III: Promedio luxes D1, D2⁷

Mediciones	Luxes D1	Luxes D2
1	783	499
2	818	517
3	956	519
4	1004	597
Promedio	890	533

4.5. Pruebas de los difusores con el Esfera de Ulbricht

En la esfera de ulbrich se efectuaron mediciones de cada difusor, obteniendo así los siguientes parámetros:

- ▷ Flujo luminoso.
- ▷ Iluminancia.
- ▷ Flujo radiante.

⁶Fuente propia

⁷Fuente propia

▷ Temperatura del color CCT.

▷ Reproducción cromática.

Antes de comenzar hacer las pruebas hay que ingresar en el software de la esfera algunos parámetros, entre los mas relevantes está la humedad relativa que existe en la facultad la cual es de 51.2 % como se muestra en la Tabla II anteriormente descrita, una vez ingresados los datos se inicia la prueba.

Estas mediciones se las ejecutó igualmente en dos días diferentes ya que estos estén despejados y soleados, el horario fue en la tarde aproximadamente de 14:00 a 16:00 antes de que el sol se oculte, fue en este horario ya que a esa hora se permite el acceso a la facultad , cada prueba duró un tiempo de 5 minutos.

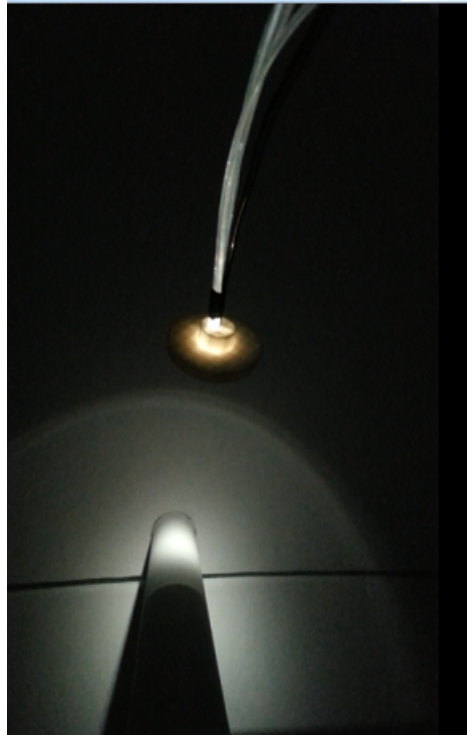


Fig. 4.5: Difusor emitiendo luz natural.⁸

Hay que mencionar que antes de ejecutar las pruebas el sistema de iluminación natural se encontraba instalado en el techo del laboratorio y se realizó la acometida con las fibras ópticas por el estuco hasta llegar con una bajante hasta el interior de la esfera de ulbrich.

⁸Fuente propia

⁹Fuente propia



Fig. 4.6: Difusor en la esfera de ulbrich.⁹

4.6. Pruebas de los difusores con el fotogoniómetro

Las pruebas fotométricas se las realizó en el fotogoniómetro LGS-1600B que se encuentra dentro del laboratorio en un cuarto llamado cuarto oscuro, el que internamente esta dividido en tres secciones, en la sección 1 se encuentra nuestro equipo, en la sección 2 esta vacía y en la sección 3 se encuentra un láser y un sensor con los cuales se calibra para que este se alinee con el centro de los difusores y también los mismos gráficán el espectro de la luz proveniente de los difusores, el software del fotogoniómetro nos presenta un reporte en su mayoría mediante tablas y curvas, las mas apreciables son las siguientes:

- ▷ Curva de distribución de intensidad luminosa (cd/Klm).
- ▷ Curvas de isocandela en forma rectangular.
- ▷ Curvas de isocandela en forma esférica.
- ▷ Temperatura del color CCT.
- ▷ Gráfica de isolux.
- ▷ Curva de limitación de lúmenes
- ▷ Distancias de iluminación.
- ▷ Gráfica de Isolux vertical.
- ▷ Tabla de área de flujo.

- ▷ Tabla de Distribución de flujo basado en sistemas de clasificación lumínica (LCS).
- ▷ Gráfica LCS.
- ▷ Tabla de factor de utilización(cavidad del piso).
- ▷ Tabla de Factor de utilización (pared).
- ▷ Tabla de Factor de utilización (cavidad de techo).
- ▷ Tabla de Candela (Matriz de intensidades).

Respecto al software, igual que en la esfera se deben llenar algunos parámetros como son los datos personales y la más importante la humedad relativa, el equipo por cuenta propia gracias a sus sensores llena la mayoría de parámetros como es la temperatura.

Para sujetar los difusores en el centro del fotogoniómetro, se utilizaron accesorios adicionales como son los brazos de sujeción, donde se colocaron los difusores, una vez hecho esto se encera la máquina, es decir vuelve hasta cero grados y comienza a realizar la prueba, aproximadamente tarda dos horas en realizarse cada prueba.

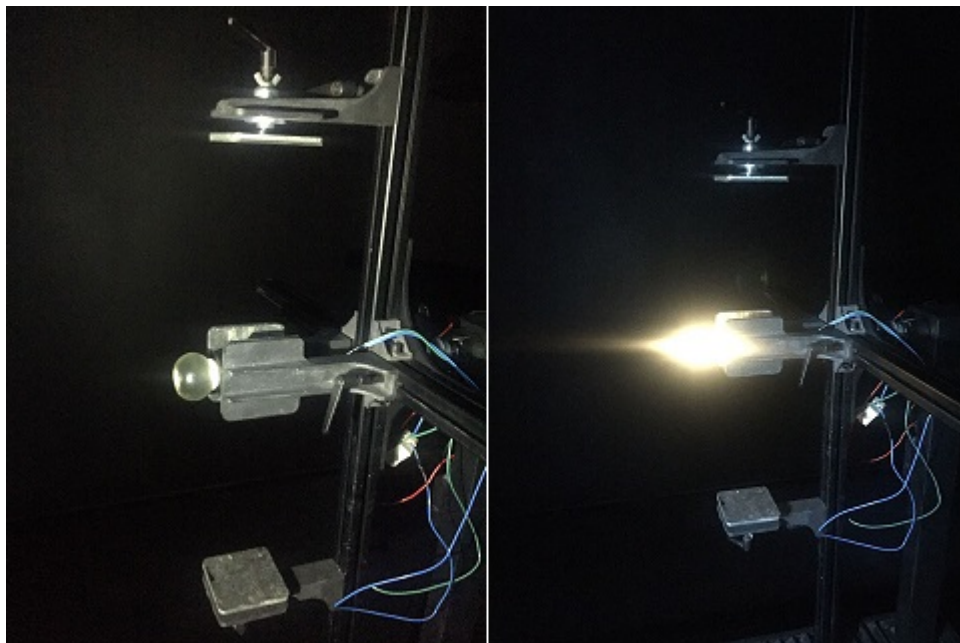


Fig. 4.7: Difusor fijo y centrado en el fotogoniómetro.¹⁰

Algo muy importante que se hizo en esta prueba, es que se tuvo que poner una fuente de luz constante artificial, la cual cuenta de un diodo incandescente y un dimmer para poder alcanzar los niveles promedio que obtuvimos con el luxómetro, de esa manera logramos simular la luz

¹⁰Fuente propia

proveniente del sol, aquí uno de los puntos que nos interesa es saber como se distribuye la luz en el espacio de cada difusor, para subsiguientemente efectuar la comparación entre los difusores D1 y D2.

Capítulo 5

ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Comparación de los resultados obtenidos en el laboratorio de los difusores D1, D2

La Tabla III del capítulo 4 nos muestra un promedio total de iluminancia medidos en luxes, donde observamos que el difusor 1 tiene mas luxes por la transparencia ya que es hecho de vidrio, en cambio el difusor 2 tiene una mayor absorción por el material que es un poco opaco, por lo que es hecho de resina, podemos decir que el difusor uno es mejor que el difusor 2 por la transparencia del material que deja pasar mucha mas luz natural.

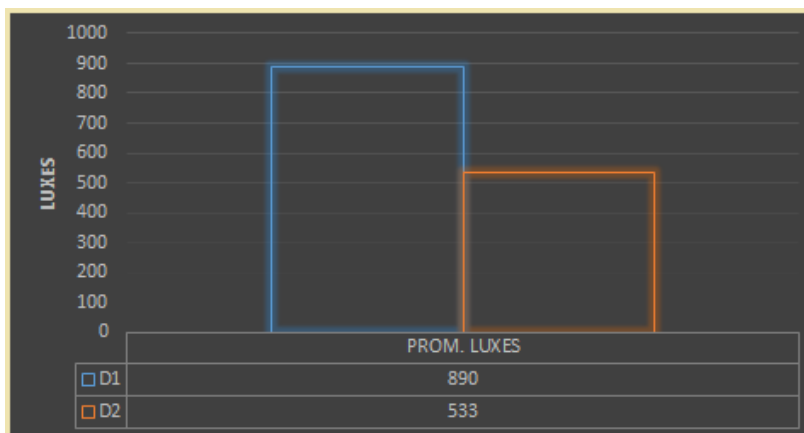


Fig. 5.1: Comparación luminancia D1 con D2.¹

De las pruebas realizadas en la esfera de ulbrich el software emitió un informe en formato pdf (Anexo C), en el cual podremos observar diferentes parámetros los cuales los hemos tabulado para poder realizar un análisis y comparación de los difusores D1 y D2.

De todos los parámetros que tenemos en la tabla I (Capitulo V) podemos observar que el difusor D1 es mejor que el difusor D2 en un 10,5 %, ya que tiene mayor intensidad de luz, respecto a la temperatura de color CCT ambos difusores emiten una luz entre una luz de vela y una luz incandescente, en otras palabras emiten una luz amarilla que se puede ver dentro de la gráfica del espectro luminoso, en cambio en el índice de reproducción cromática también el

¹Fuente propia

difusor D1 tiene un índice del 70,7 % lo que se puede tener una mejor percepción del color de los objetos.

TABLA I: Parámetros esfera de ulbrich²

Parámetros	Unidad	Difusor 1	Difusor 2
Flujo luminoso	Lumen	4.08	3.65
Flujo radiante	Vatio	-17.2	-13.9
CCT	Kelvin	2477	2085
Reproducción cromática	%	70.7	63.6

Gráficas generadas por el software de la esfera de integración de los difusores D1 y D2 dentro del espectro visible.

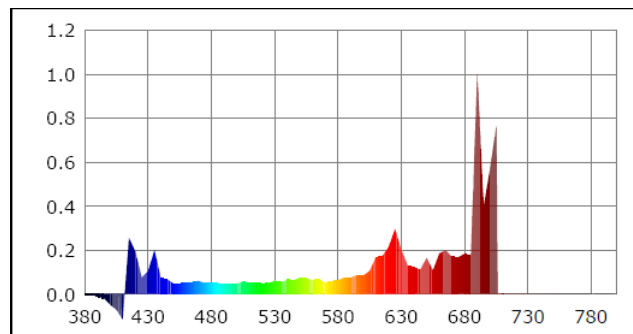


Fig. 5.2: Gráfica dentro del espectro visible D1.³

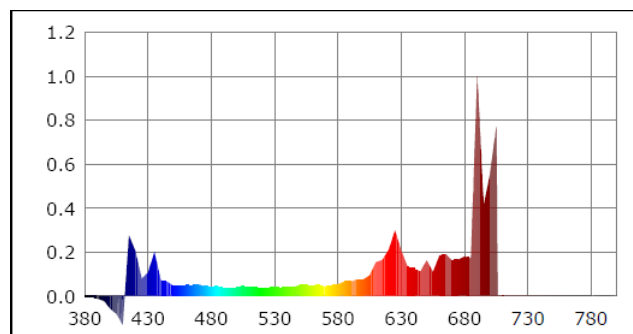


Fig. 5.3: Gráfica dentro del espectro visible D2.⁴

Las gráficas del espectro visible se aprecia que son iguales ya que la esfera realiza la gráfica basándose en la fuente de luz mas no en los difusores.

²Fuente propia

³Fuente propia

⁴Fuente propia

Las ultimas pruebas realizadas fueron en el fotogoniómetro donde tenemos tabulados los datos más importantes para la comparación entre los difusores, a continuación se muestra la tabla:

TABLA II: Parámetros fotométricos difusores D1, D2.⁵

Parámetros fotométricos	Difusor 1	Difusor 2
Eficiencia	0.99 %	4.14 %
Porcentaje perdido	0.12 %	0.29 %
Porcentaje ganado	0.86 %	3.85 %
Intensidad máxima	56.71cd	77.38cd
Flujo medido	8.8lm	36.90lm

Se observa en la tabla II los datos de cada difusor, estos pueden ser comparados pero no se puede saber cual es mejor, ya que depende de la necesidad o del espacio donde pueda ser instalado.

En las gráficas de isolux podemos verificar la forma de la luz emitida por los difusores en tres dimensiones los 360° en ambos ejes.

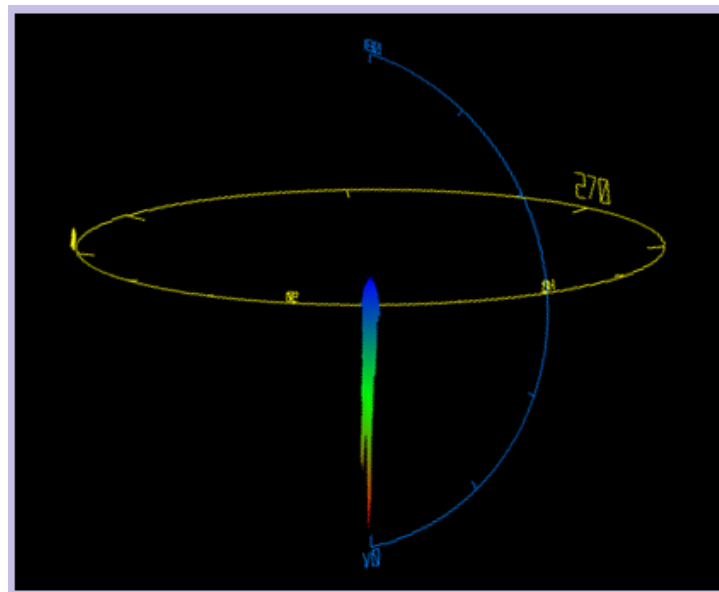


Fig. 5.4: Gráfica 3D isolux difusor D1.⁶

La gráfica del difusor D2 se expande más que la gráfica del difusor D1, pero ambas son luces puntuales, parecidas a la luz que emiten los dióicos utilizados en el medio, por ejemplo aprovechando la forma de la gráfica 3d del difusor D2 se podría iluminar un cuarto utilizando menor cantidad de ellos, mientras que al iluminar el mismo cuarto con los difusores D1 se

⁵Fuente propia

⁶Fuente propia - Lisun

⁷Fuente propia - Lisun

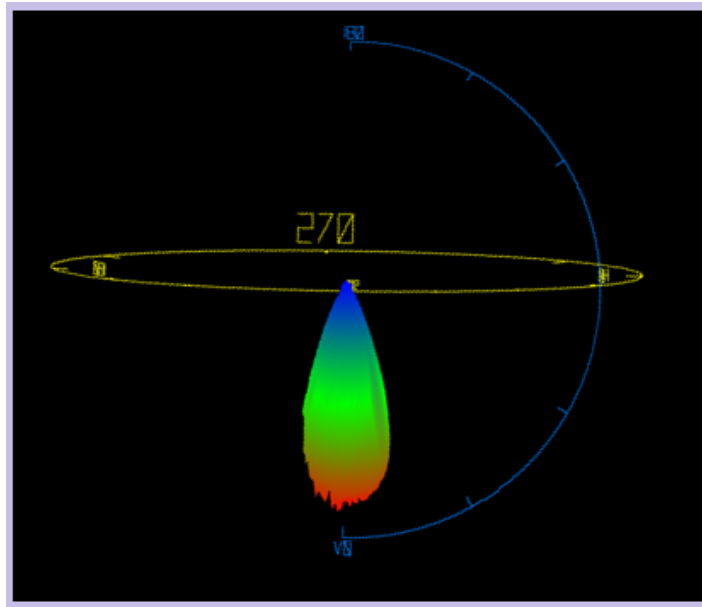


Fig. 5.5: Gráfica 3D isolux difusor D2.⁷

tendría que instalar mayor cantidad.

A continuación se tabulan todos los parámetros de las pruebas al que fueron expuestos los difusores para poder dar un puntaje a cada parámetro de 0 y 1, siendo 0 como regular y 1 como bueno. De esta manera podremos elegir el difusor que tenga el mayor puntaje y decir que es el mejor.

TABLA III: Determinación el difusor mas eficiente.⁸

Parámetros Generales	Difusor D1	Difusor D2
Iluminancia	1	0
CCT	1	0
Índice de reproducción cromática	1	0
Flujo luminoso medido	0	1
Eficiencia	0	1
Intensidad máxima	0	1
Distribución de la luz en el espacio	1	1
Total de puntaje	4	4

Hecho este análisis general vemos que el difusor D1 y el difusor D2 tienen el mismo puntaje, por lo que ambos difusores son buenos para el sistema de iluminación natural, entonces como se dijo anteriormente, depende del espacio que se quiera iluminar.

⁸Fuente propia

5.2. Comparación de la distribución de la luz en el espacio de los difusores D1 y D2 con una lámpara fluorescente compacta

La comparación se la realizada entre los difusores D1, D2 con la lámpara fluorescente (foco ahorrador) para observar como se distribuye la luz en el espacio, todo esto se observara en las siguientes gráficas.

La gráfica (c) es la distribución de la luz de una lámpara fluorescente compacta de 15W, marca BEGA, para mas detalles revisar Anexo E.

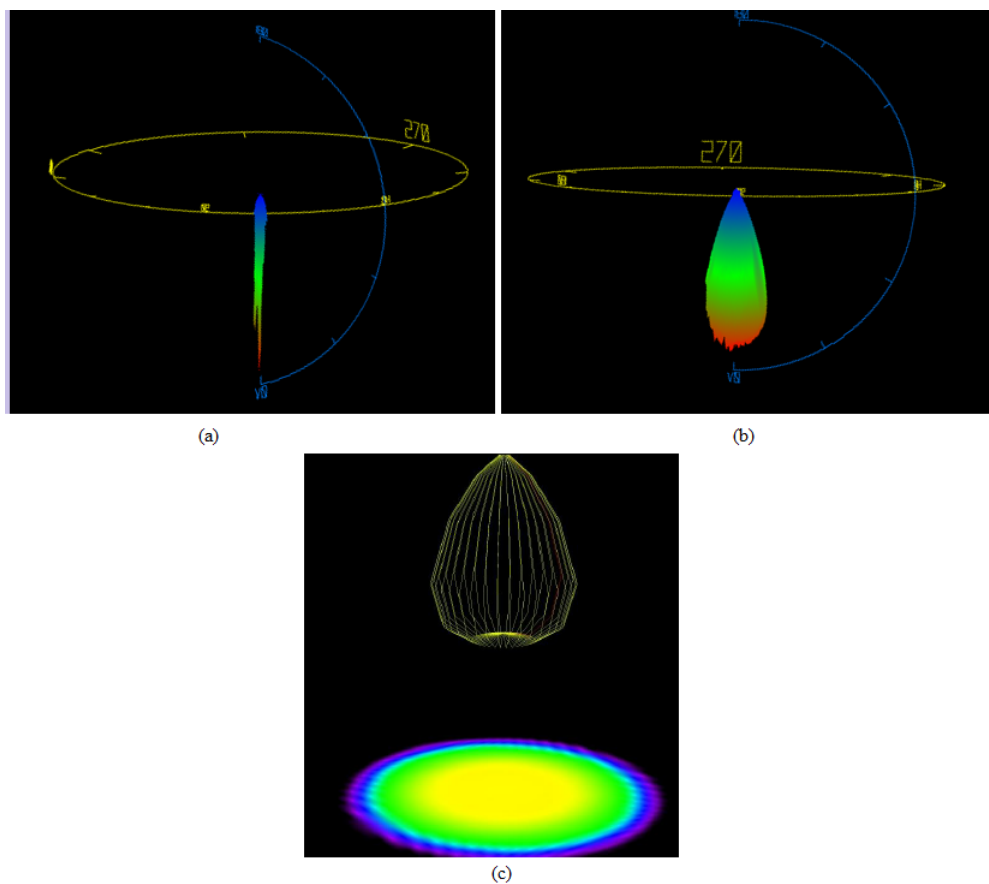


Fig. 5.6: (a)Distribución de la luz D1, (b)Distribución de la luz D2, (c)Distribución de la luz lámpara fluorescente (foco ahorrador).¹⁰

Observamos que la gráfica de distribución de la luz de la lámpara fluorescente se expande más que los difusores en el espacio, por lo que con este tipo de lámparas iluminaremos de mejor manera cualquier ambiente.

¹⁰Fuente propia - (c)Dialux

5.3. Análisis adversos de las pruebas de los difusores D1 y D2

Al momento de realizar las mediciones con el luxómetro de cada difusor no se tuvo ninguna dificultad técnica.

Cuando se utilizó la esfera de ulbrich para las pruebas de los difusores, el software del mismo nos dio un informe donde observamos que existe un parámetro negativo que es el flujo radiante y la física nos dice que cuando un cuerpo tiene un flujo radiante negativo es debido a que por su superficie entra mas energía que la que sale, de otra manera nos dice que el cuerpo está absorbiendo mas energía que la que radia, pero a simple vista si se ve que existe una cantidad considerable de luz en ambos difusores lo que llegamos a una conclusión y puede deberse este problema a que el equipo no esta calibrado con ningún tipo de luminaria patrón de luz natural, para que pueda ser comparada y posteriormente pueda corregir el rango de error, se puede observa el informe en el Anexo C.

En las pruebas de fotometría en el fotogoniómetro, la dificultad fue tener una fuente de luz natural constante, por lo que se tuvo que instalar una fuente de luz artificial la cual puede ser regulada mediante un dimmer, lo que se hizo es poner el difusor en la fuente de luz artificial y se colocó el luxómetro al frente del difusor y se dimerizo hasta que la luz emitida llegara a los valores en lux que se muestran en la tabla III del capítulo 4, una vez hecho esto se procedió a realizar las pruebas, todos los resultados se detallan en el Anexo D.



Fig. 5.7: Dimerizado de fuente artificial con difusor D2.¹¹

El mayor problema en la investigación fue el medio ambiente, ya que algunos días del mes de agosto en el que realizamos las pruebas pasaban nublados, esta situación nos hizo perder mucho tiempo, pero al final pudimos aprovechar los pocos días despejados. El horario también fue otro problema ya que las pruebas se realizaron en la tarde y lo mas óptimo era hacerlas en la mañana cuando exista mayor irradiación solar de 9:00 a 12:00 aproximadamente.

¹¹Fuente propia

CONCLUSIONES

La implementación del sistema de iluminación mediante fibra óptica funcionó correctamente, ya que logramos captar, transportar y dispersar la luz proveniente del sol de una manera eficiente, con esto también ganamos experiencia en el manejo técnico de cada elemento del sistema, así como también en el manejo de los equipos que integran el laboratorio de luminotecnia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Católica de Cuenca.

La parte electrónica de nuestro sistema de iluminación natural como es el seguidor solar, fue indispensable, ya que nos ayudo a captar los rayos del sol con mayor eficiencia en los días con cielo despejado, además nos brindo más confianza para poder realizar las pruebas de laboratorio por la presencia de alta cantidad de luz en los difusores.

Al concluir todas las pruebas de laboratorio, se concluye que el difusor D1 comercial al compararlo con el difusor D2 instaurado, observamos que ambos difusores tienen parámetros que sobresalen el uno del otro por lo que se procedió a realizar una tabla para darles un puntaje a cada difusor y el resultado final fue que ambos difusores obtuvieron igual puntaje, lo que nos da a entender que ambos difusores pueden ser utilizados para este tipo de sistema de iluminación natural.

El medio ambiente nos presentó una variedad de problemas, ya que el sistema de iluminación natural no funciona si no hay la presencia del sol y que el cielo este despejado, el inconveniente que tuvimos por no haber una luz constante proveniente sol fue en el fotogoniómetro por lo que se implemento una fuente de luz artificial, para así poder verificar como se comporta la luz al traspasar a los difusores, claro que la fuente de luz artificial fue calibrada al equivalente en iluminancia de luz natural.

El proyecto de investigación en general es una fuente de información muy importante referente a la captación de la luz natural, ya que existe muy poca investigación sobre el tema en el país, esta investigación servirá como base para futuras investigaciones relacionadas al tema.

En general se observo que todos los elementos del sistema de iluminación mediante fibra óptica, se complementaron de la mejor manera ya que llegaba muy buenos niveles de luz a los difusores.

RECOMENDACIONES

Se debe utilizar las tecnologías nuevas como las impresiones 3D, ya que ayudan a ganar tiempo en este tipo de proyectos teórico - práctico, ya que en nuestro proyecto perdimos tiempo por realizar el prototipo de nuestro sistema de iluminación de manera mecánica.

Para tener unas pruebas más efectivas, especialmente en la esfera de Ulbrich o de integración, la Universidad debe adquirir equipos o accesorios para poder calibrar el equipo a diferentes necesidades de iluminación, como es la luz natural ya que es una luz que no necesita de energía eléctrica y es amigable con el medio ambiente.

Realizando una apreciación general del sistema también podemos recomendar que para mejorar el sistema, se debe utilizar fibra óptica cubierta o con chaqueta ya que al cubrirla se observó que llegaba más luz al difusor.

Los difusores pueden estar hechos de cualquier material, opaco o transparente que se consigue de manera muy fácil en nuestro medio, también podemos darle a estos materiales diversas formas para que el haz de luz se disperse de una infinidad de maneras y así poder iluminar varios ambientes.

Bibliografía

- [Arias Cuéllar et al., 2011] Arias Cuéllar, A., Ealo Cuello, J. L., and Caicedo, E. (2011). Diseño, construcción y calibración de un fotogoniómetro para la empresa colombiana de luminarias roy alpha sa. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 9(1):45–56.
- [Cristian Leuarnizo, 2012] Cristian Leuarnizo, Juan Carlos Veintimilla, J. L. J. (2012). Estado actual de la tecnología empleada en sistemas de iluminación que aprovechan la luz solar.
- [Domínguez, 2004] Domínguez, F. M. (2004). *Instalaciones eléctricas de alumbrado e industriales*. Editorial Paraninfo.
- [Leuarnizo, 2013] Leuarnizo, Cristian Javier; Veintimilla Lude. C. (2013). Disimplementación de un sistema experimental de iluminación usando fibra óptica.
- [Ma et al., 2015] Ma, S.-H., Chen, L.-S., and Huang, W.-C. (2015). Effects of volume scattering diffusers on the color variation of white light leds. *Display Technology, Journal of*, 11(1):13–21.
- [McRoberts, 2011] McRoberts, M. (2011). Arduino básico. *Editora Novatec*, 344755160.
- [NASA, 2016] NASA (2016). Surface meteorology and Solar Energy - Location.
- [Oidor et al., 2003] Oidor, I., Cardoso, R., and Suárez, J. (2003). Implementación y caracterización del sistema de medición de flujo luminoso total del cenam. In *SOMI XVIII Congreso de instrumentación*.
- [Pro, 2011] Pro, S. (2011). Fibra óptica himawari para iluminación.
- [TABERNERO,] TABERNERO, V. Fotografía submarina.