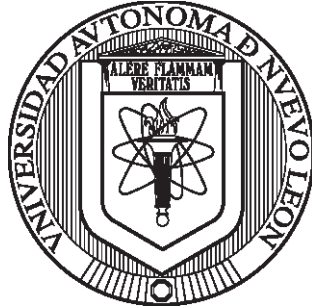


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



ESTUDIO TEÓRICO Y NUMÉRICO DE EXTRACCIÓN LATERAL DE LUZ EN GUÍAS
DE ONDA PARA APLICACIONES DE ILUMINACIÓN

Por

GUILLERMO EZEQUIEL SÁNCHEZ GUERRERO

Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTORADO EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL

Junio, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis **Estudio Teórico y Numérico de Extracción Lateral de Luz en Guías de Onda para Aplicaciones de Iluminación**, realizada por el alumno Guillermo Ezequiel Sánchez Guerrero, con número de matrícula 1260664, sea aceptada para su defensa como requisito al grado de Doctorado en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis

Dr. Edgar Martínez Guerra
Director

Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
Co-Director

Dr. Guillermo Salceda Delgado
Vocal

Dr. Daniel Toral Acosta
Vocal

Dr. Francisco Javier Almaguer Martínez
Vocal

Vo.Bo

Dr. Álvaro Eduardo Cordero Franco
Subdirección de Estudios de Posgrado

Este trabajo ha sido parte del esfuerzo, dedicación y aprecio a la búsqueda del nuevo conocimiento, pero no pudo ser posible sin el esfuerzo y dedicación de muchas personas; mis padres que siempre alentaron mi curiosidad y me dieron oportunidades para estudiar, me animaron a continuar y no tirar la toalla nunca, muchas gracias por todas esas oportunidades que me dieron.

También quiero dedicar este trabajo a mi futura esposa Perla Viera; gracias por apoyarme y guiarme, gracias por recorrer este camino del doctorado conmigo, no tengo palabras para agradecer toda tu paciencia y esfuerzo.

Índice general

Agradecimientos	IX
Resumen	X
1. Fundamentos teóricos y estado del arte	1
1.1. Conceptos básicos	2
1.1.1. Teoría de rayos	2
1.1.2. Tubo guiador de luz (TGL)	3
1.1.3. Radiometría y Fotometría	6
1.1.4. Características de la propagación	8
1.1.5. Étendue	8
1.2. Geometrías de tubos de luz	11
1.2.1. Geometría transversal	12
1.2.2. Geometría longitudinal	14
1.3. Clasificación de tubos de luz	15
1.4. Aplicaciones	16
1.4.1. Terapia fotodinámica	16
1.4.2. Retroiluminación	17
1.4.3. Luminarias <i>Light Emitting Diode</i> (LED)	20
1.4.4. Sistemas de iluminación solar y concentradores	21
1.5. Motivación y objetivos	21
2. Formalismo teórico propuesto para el diseño de ranuras en TGL's	23
2.1. Propuesta	23
2.2. Análisis de ranuras	24
2.2.1. Extracción desde un solo punto	25
2.2.2. Extracción de una ranura	27
2.2.2.1. Hendidura recta	27
2.2.2.2. Hendidura elíptica	28
3. Cálculo analítico y numérico de luz extraída por ranuras en TGL's	30
3.1. Análisis numérico y resultados	30
3.2. Discusión	36

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	V
4. Aplicaciones del formalismo teórico propuesto	40
4.1. Múltiples ranuras	40
4.2. Diseño híbrido	45
5. Conclusiones Generales	47
5.1. Conclusiones	47
Bibliografía	49
Acrónimos	71

Índice de figuras

1.1. Ley de Snell	2
1.2. Ángulos directores	3
1.3. Cono de aceptación	4
1.4. RTI en Tubo Guiador de Luz (TGL)	5
1.5. Rayos en un TGL	5
1.6. Función de respuesta luminosa fotópica y escotópica.	7
1.7. Representación gráfica de las unidades fotométricas.	8
1.8. Transformación de coordenadas en el espacio real (a) al espacio fase (b).	9
1.9. Transformación de coordenadas en el espacio real (a) al espacio fase (b).	9
1.10. Transformación de coordenadas en el espacio real (a) al espacio fase (b).	10
1.11. Étendue en una lente convergente	10
1.12. El étendue no disminuye	11
1.13. Luminancia de salida.	13
1.14. Ensanchamiento de un TGL en forma de CPC.	14
1.15. Pérdida de flujo debido a curvatura de tubo de luz.	15
1.16. TGL usado en Terapia Foto-Dinámica (TFD)	17
1.17. TGL en forma de lámina	18
1.18. Patentes de paneles de retroiluminación	19
1.19. Ejemplo de luminaria	20
2.1. Rayos dentro de un TGL	24
2.2. Esquema de rayos en un TGL	25
2.3. Análisis de rayos marginales	26
2.4. Análisis de un TGL con perfil lineal	27
2.5. Perfil elíptico	28
3.1. Dimensiones del TGL para simulación	30
3.2. Comparación de perfiles	31
3.3. Comparativa de Extracción	31
3.4. Resultados de simulación	33
3.5. Resultados de Irradiancia	34
3.6. Resultado de la columna central	35
3.7. Medición de irradiancia	36
3.8. Radiación polar de un LED	36
3.9. RMS de irradiancia	38

4.1. Distancia entre ranuras	41
4.2. Dimensiones de la ranura propuesta.	42
4.3. Ejemplo de las dimensiones del tubo de luz con múltiples ranuras.	42
4.4. Propuesta de ejemplo con múltiples ranuras en D1	43
4.5. Propuesta de ejemplo con múltiples ranuras en D2	44
4.6. Concepto de luminaria híbrida.	46

Índice de tablas

1.1. Unidades radiométricas y fotométricas	7
1.2. Proporción longitud/radio.	14
1.3. Clasificación de TGL.	16
3.1. Parámetros del LED usados en simulación numérica.	32
4.1. Cada pico se encuentra a una distancia media de 29 mm medidos de pico a pico. Esta distancia es la suma de l y h	44

Agradecimientos

Gracias a todos aquellos que formaron parte de este trabajo. Gracias al Dr. Daniel Ceballos, quien siempre fue claro expresando sus ideas, haciendo planeación del próximo trabajo, siendo acertado en los próximos pasos que se debían dar, y también gracias por todo por todo el apoyo moral que me ha dado, gracias por sus palabras en momentos difíciles que me ayudaron a continuar.

Gracias al Dr. Edgar Guerra, quien se aventuró a este trabajo e invirtió muchas horas hilando las ideas que presentaba y haciendo preguntas tan acertadas que me ayudaron a converger mis ideas. Gracias por continuar conmigo en todo el proceso.

Quiero agradecer a la International Society for Optics and Photonics, SPIE, que ha sido como un segundo hogar y me ha dado oportunidades de conocer a gente asombrosa. Gracias a Dirk Fabian, a quien conocí desde que era estudiante de maestría y he visto año con año en diversas ocasiones, gracias por todo el ánimo, por todas las oportunidades que nos has dado, los consejos y sobretodo por ser tan acertado en tus recomendaciones.

También gracias a todos aquellos amigos con los que he hecho divulgación, me han inspirado tanto y a veces con sus ocurrencias me han dado la creatividad que necesitaba. Muchas veces era lo que me hacía falta para tomar un respiro y continuar, gracias Isma, Renee, Max, Fab, Borjas y todos aquellos con los que hicimos divulgación juntos. Espero que la divulgación les sirva como me ha servido a mi.

Resumen

Se presenta un análisis analítico y numérico en la extracción de luz en tubos de luz utilizando ranuras de reflexión total interna con perfiles lineales y elípticos. Este trabajo muestra el estudio considerando fuentes de luz con diferentes ángulos de apertura, como la luz solar suministrada por fibras ópticas y LEDs. Con este análisis, proponemos un modelo analítico basado en el concepto de rayo marginal que permite seleccionar el perfil, tamaño y orientación más convenientes de la ranura para extraer la luz con el área de iluminación deseada según el ángulo de apertura de la fuente empleado en el sistema de tubería de luz. El diseño de una luminaria está sostenida en la resolución numérica para cada sistema específico. Este trabajo hace muy arduo la optimización de la extracción de luz que puede conseguirse. En este trabajo proponemos un modelo analítico-numérico que contiene los motivos en la luminaria, y las características de la guía de onda y las fuentes que pueden utilizarse para optimizar el trabajo de diseño. También hemos encontrado numéricamente que para las fuentes con ángulos de apertura altos, la luz extraída por las ranuras lineales y elípticas produce una irradiancia y distribuciones angulares similares, mientras que para las fuentes con ángulos de apertura bajos, la ranura elíptica enfoca la luz extraída y produce una distribución angular más alta en comparación con esta obtenida por la ranura lineal. Los modelos analíticos son evaluados a través de simulaciones de rayos usando el software Zemax que proporciona un ambiente de trabajo ideal para importar figuras sólidas de programas CAD. El perfil obtenido de las figuras sólidas fueron modelados a través del software AutoCAD y después extruídas usando el software SolidWorks. Estos resultados son escalables a diferentes dimensiones de tubos de luz y proporcionan una manera sistemática de obtener diseños preliminares de ranuras para sistemas de iluminación que emplean fuentes ópticas con diferentes ángulos de apertura.

Contar con una teoría general de Tubo Guiador de Luz (TGL), nos daría todas las soluciones para nuestras aplicaciones, por lo que veremos, existen muchas dependencias, como pueden ser, la fuente, el índice de refracción del material, el índice de refracción del medio en el que está inmerso el TGL, el método o métodos de extracción. Esta cantidad de variables produce un problema complejo.

CAPÍTULO 1

Fundamentos teóricos y estado del arte

Esta tesis es el resultado del trabajo realizado para un proyecto de iluminación a partir de dos fuentes distintas de iluminación. Tiene el propósito de diseñar y modelar un tubo guía de luz que cumpla con ciertas especificaciones, entre ellas, el uso de más de una fuente de iluminación, una LED y otra con luz solar a través de fibra óptica. Este trabajo muestra las ventajas y limitaciones del diseño propuesto.

Para la descripción de algunos conceptos, hubo la necesidad de acuñar términos del idioma inglés, o de otras fuentes en español que fueron las primeras en usarlos, debido a que no existen en nuestra lengua. El primero de ellos aparece en este capítulo, Tubos Guías de Luz (TGL) se ha adoptado del inglés *lightpipe* a veces utilizado como *light-pipe* o *light pipe*. Este término se refiere a cilindros sólidos, para lo cual en este trabajo se hará referencia a un *tubo* o *tubo guía de luz*. Hay que tomar en cuenta otro término, *hollow lightpipe*, que hace referencia a tubos guías de luz huecos, los cuales haremos referencia como *ducto* o *ductos guías de luz*. Otro concepto acuñado, base de este trabajo, es *óptica anidólica* (del inglés *nonimaging optics*) o de *óptica sin imagen*, pero se prefiere el uso de anidólico por ser más preciso, (proviene del griego que significa “sin imagen”) [1, 2].

Los TGL son guías de onda que, a diferencia de la fibra óptica, son de gran tamaño, son deformables, pero no flexibles ya que generalmente son fabricados de acrílico. Este trabajo utilizará la palabra acrílico para hacer referencia al Polimetilmetacrilato (PMMA) o conocido en inglés como *Poly(methyl methacrylate)* o simplemente como PMMA. Los TGL han tenido muchas aplicaciones, como en medicina en la terapia fotodinámica [3] donde usan TGL de vidrio, en la industria como en la retroiluminación [4, 5] de componentes como pantallas, luminarias LED y en sistemas de iluminación solar [6].

Diseñar un tubo de luz, requiere del uso de muchas variables, por lo que define el presente diseño es la aplicación, de esta manera se define el tamaño de la fuente, el índice de refracción en el que estará inmerso, el tamaño del TGL y el área a iluminar, el TGL se tiene que construir partiendo de esas limitaciones.

Nuestra aportación está en el diseño del TGL, a partir de condiciones dadas, como el tamaño del TGL, la fuente y el área que se desea iluminar, presentamos un mapeo el cual otorga información acerca del diseño óptimo de la TGL, presentamos, además, un ejemplo de uso el cual atiende una necesidad específica. Los resultados son de gran importancia en el diseño de TGL, ya que aportan la información necesaria para la construcción. Además, se muestra una ecuación que toma en cuenta el índice de refracción del medio en el que está

inmerso la TGL, en este trabajo se tomará en cuenta que está inmersa en aire a temperatura ambiente, es decir, $n = 1$. Como se verá más adelante, el índice de refracción del medio toma un papel muy importante en el área a iluminar, ya que cambia las condiciones, es decir, si el TGL se usará en otro medio como el agua (por ejemplo, en una pecera) o en aire que no está a temperatura ambiente (por ejemplo, en un refrigerador).

Los TGL no son nuevos, pero se han estado aplicando a tecnologías actuales, los primeros registros digitales que se han encontrado acerca del uso de TGL datan de 1963 [7]. Los TGL tienen distintas formas geométricas, y diferentes aplicaciones, además de distintos métodos para extracción. Durante este capítulo, se hablará acerca de los métodos de extracción, se presentarán algunas aplicaciones y se introducirá el concepto de óptica anidólica.

1.1. Conceptos básicos

1.1.1. Teoría de rayos

En la Figura 1.1, se puede ver el comportamiento de un rayo que pasa de un medio de índice de refracción n_1 a uno de mayor índice n_2 . A partir de ahora usaremos indistintamente el término rayo haciendo referencia a un rayo de luz.

La Reflexión Total Interna (RTI) está basada en la ley de Snell, Ec. (1.1a). Cuando $n_1 < n_2$ y $\theta_1 = 90^\circ$; el ángulo θ_2 se convierte en un ángulo crítico θ_c , despejando de la Ec. (1.1a), obtenemos la Ec. (1.1b), cuando esta situación se cumple, el rayo que incide sobre la superficie de interfaces viajará paralelo a la misma. La RTI se cumple para cualquier rayo que viaje con un ángulo mayor que θ_c y será reflejado por la superficie.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1a)$$

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (1.1b)$$

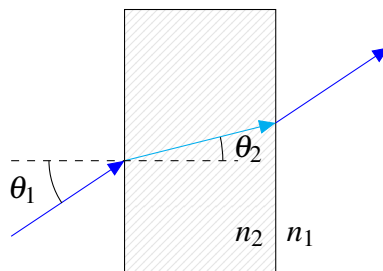


Figura 1.1: La ley de Snell establece que si un rayo de luz que viaja en un medio de índice de refracción n_1 e incide en un medio de índice de refracción n_2 , es desviado de acuerdo con la Ec. (1.1a).

Una herramienta matemática muy útil para describir la dirección de los rayos son los cosenos directores de un vector \vec{v} , que describen la dirección del vector en un punto utilizando cada ángulo medido desde un respectivo eje, ver Figura 1.2. Sea:

$$\vec{v} = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k} \quad (1.2)$$

donde:

$$\alpha = \cos a = \frac{\vec{v} \cdot \hat{i}}{|\vec{v}|}$$

$$\beta = \cos b = \frac{\vec{v} \cdot \hat{j}}{|\vec{v}|}$$

$$\gamma = \cos c = \frac{\vec{v} \cdot \hat{k}}{|\vec{v}|}$$

El momento óptico \vec{p} para un rayo de luz que pasa a través de un sistema óptico se define como el producto triple de un vector desde un origen arbitrario en el eje óptico hasta un punto en el rayo, un vector tangente al rayo en ese punto cuya longitud es igual al índice de refracción, y un vector unitario a lo largo del eje óptico. Se puede relacionar con la Ec. (1.2) si hacemos que $|\vec{p}| = n$ y sabemos que $\vec{p} = (p_1, p_2, p_3) = n(\cos a, \cos b, \cos c) = n(\alpha, \beta, \gamma)$.

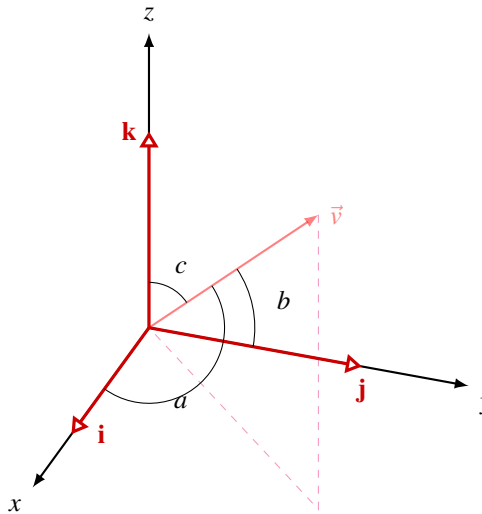


Figura 1.2: Una de las utilidades de este concepto es que al hacer un ángulo director constante, el vector describe una trayectoria cónica. Esto será de utilidad para poder determinar los rayos que son guiados a través del TGL.

1.1.2. Tubo guiador de luz (TGL)

Un TGL es un tubo de material dieléctrico transparente cuya función principal es conducir la luz a través de él como si se tratase de una “tubería” para la luz. Los TGL se han construido de acrílico [8] aunque también se construyen de vidrio BK7 [3]. El principio de guía de onda se basa en la RTI, la luz incide, usualmente desde un medio de índice de refracción menor como el aire (de acuerdo con la literatura, se aproxima a $n = 1$) al TGL.

Cuando los rayos se encuentran dentro de un TGL, solo los que cumplan con la condición de extracción, pueden salir del material como podemos ver en la Figura 1.3; el cono trazado

por el ángulo $c = \theta_c$ puede ser identificado como un *cono de aceptación*, es decir, cualquier rayo que llegue a la interfaz fuera del cono será reflejado por RTI. Al contrario, cualquier rayo que incida con un ángulo dentro del cono de aceptación será refractado de acuerdo con la ley de Snell, a esta refracción le llamaremos extracción, ya que sale del material.

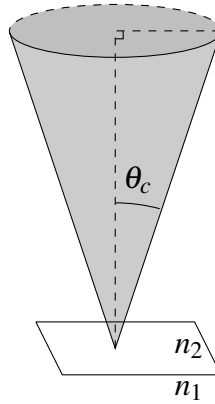


Figura 1.3: Cualquier rayo que incida en la superficie de interfaz dentro del cono de aceptación será refractado de acuerdo con la ley de Snell. En este caso $n_1 < n_2$

Este cono puede ser trazado sobre cualquier interfaz, por ejemplo, en el caso de que el rayo pase de una interfaz de aire a otra de acrílico ($n_1 > n_2$), el cono de aceptación será de $c = 90^\circ$ lo que significa que cualquier rayo menor de 90° puede incidir sobre la superficie. Como ya se mencionó si el rayo incide con un ángulo igual a la apertura del cono significa que viajará por la superficie, lo cual es consistente con la ley de Snell.

El rayo que incide al TGL, será reflejado siempre que el ángulo director del rayo dentro del TGL sea mayor que el ángulo crítico. Si extendemos la longitud del TGL el rayo será reflejado por la cara inferior debido a que cumple con la ley de reflexión en la cara superior. Este principio se cumple para todos los rayos, y debido a que $b > \theta_c$ siempre, cualquier rayo incidente será conducido por RTI. Vea la Figura 1.4

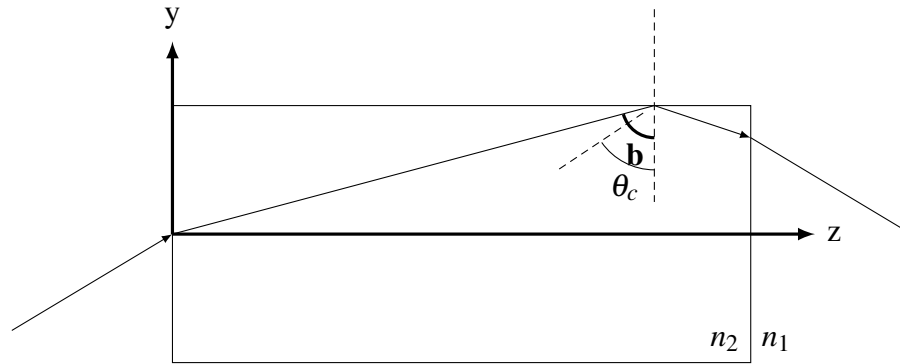


Figura 1.4: El rayo en el interior del TGL debe tener un ángulo director $b > \theta_c$ para que el rayo sea reflejado, y por la ley de reflexión, en la siguiente superficie también será reflejado. Al llegar a la cara de salida, es evidente que el rayo saldrá con el mismo ángulo con respecto a la normal de la cara con el que incidió.

De esta manera, cuando un rayo incide desde el aire con un ángulo director de $0^\circ < b < 90^\circ$ y, después de la refracción, en el interior su ángulo director es de $\theta_c < b < 90^\circ$, el rayo que incide por una cara del TGL sale por la cara opuesta o cara de salida, siempre y cuando sea plana, esta es la relación del principio básico de los TGL.

De acuerdo con la definición anterior, dentro de los TGL, los rayos pueden ser de 3 tipos de acuerdo con su manera de propagación, lo podemos ver en la Figura 1.5:

- Acoplado: cuando el rayo sale por la cara de salida.
- Extraído o filtrado: cuando el rayo, refleja en una superficie lateral y escapa.
- Atrapado: cuando el rayo no sale por la cara de salida.

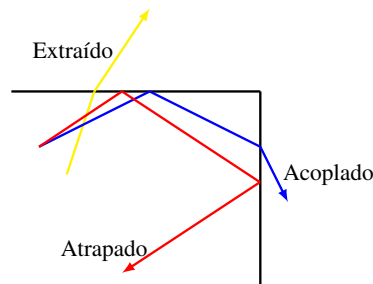


Figura 1.5: En un TGL solo pueden existir tres tipos de rayos. Los rayos acoplados (azul), viajan por todo el TGL hasta la cara de salida. Los rayos extraídos o filtrados (amarillo), viajan a través del TGL pero no llegan a la cara de salida, parte de la energía del rayo aún puede viajar dentro del TGL. Los rayos atrapados (rojo) son aquellos rayos que viajan a través del TGL pero al llegar a la cara de salida, son reflejados.

En la siguiente sección hablaremos acerca de la física del rayo, ya que hasta ahora lo hemos considerado cómo líneas rectas que cumplen la ley de Snell, pero el rayo debe seguir leyes de la física como la conservación de energía, ya que el rayo o conjunto de rayos no pueden reflejarse infinitamente dentro del TGL.

1.1.3. Radiometría y Fotometría

La radiometría es la encargada de estudiar la radiación del espectro electromagnético completo, por otro lado, la fotometría esta encargada de estudiar la parte del espectro electromagnético que es percibida por el ojo humano, esta última la podemos considerar como un subconjunto de la radiometría. El concepto central de la radiometría es el flujo radiante y es medido en Watts, como veremos más adelante en fotometría hay una definición similar. El flujo radiante es la cantidad de energía que es emitida, transmitida o recibida por unidad de tiempo:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1.4)$$

Donde Q es la energía y t es el tiempo.

Por otro lado, el concepto central de la fotometría es el flujo luminoso, que mide la potencia de luz percibida por el ojo humano y su unidad de medida es el lumen. Para poder establecer las unidades fotométricas, la Comisión Internacional de la Iluminación (Internationale de l'Eclairage (CIE)) definió un observador estándar ya que la sensibilidad del ojo varía de persona en persona; estableció que la visión se encuentra entre 380 nm y 780 nm. Por último, de acuerdo con el tipo de fotorreceptor del ojo, la visión puede dividirse en fotópica (conos) y escotópica (bastones) [9].

Para la visión fotópica y escotópica la CIE estableció la curva de respuesta espectral; para la visión fotópica ($V(\lambda)$) existe un máximo de 683 lm/W en 555 nm y para la visión escotópica ($V'(\lambda)$) es de 1700 lm/W en 505 nm. La Figura 1.6 muestra las funciones de respuesta espectral normalizadas, estas funciones también están estandarizadas y son ampliamente utilizadas [10].

La Tabla 1.1 muestra un resumen de las cantidades radiométricas y fotométricas y la Figura 1.7 de las cuales abordaremos brevemente:

- Flujo radiante y luminoso

En radiometría es la energía radiante emitida, reflejada o transmitida de una fuente en todas las longitudes de onda. En fotometría es la medida de toda esa energía que es percibida por el ojo humano y se restringe a las longitudes de onda que el ojo humano puede detectar. Es usualmente usada como una medida de la luz útil de una fuente. El factor 683 aparece debido a que la función de respuesta espectral está normalizada, si se desea usar la visión escotópica se reemplaza $V(\lambda)$ por $V'(\lambda)$ y 683 por 1700

- Emitancia radiante y luminosa

Es la cantidad de radiación que llega a una superficie. En fotometría, es la cantidad de flujo luminoso que llega a una superficie. Es usualmente correlacionada con la percepción de brillo de un área iluminada.

- Intensidad radiante y luminosa

Es una medida del brillo de una fuente, por ejemplo, tenemos una fuente que tiene un flujo luminoso de 1 lm en 1 sr, su intensidad luminosa es de 1 cd; si la misma fuente emite luz en 0.5 sr su flujo luminoso se conserva pero su intensidad luminosa es de 2 cd, será un haz de luz más pequeño pero más brillante.

■ Radiancia y luminancia

En radiometría es la cantidad de radiación que recibirá un sistema óptico desde un ángulo característico. En fotometría es la radiación detectada por el ojo que observa a una superficie desde un ángulo. Es una medida de que tan brillante parecerá una superficie desde una posición particular.

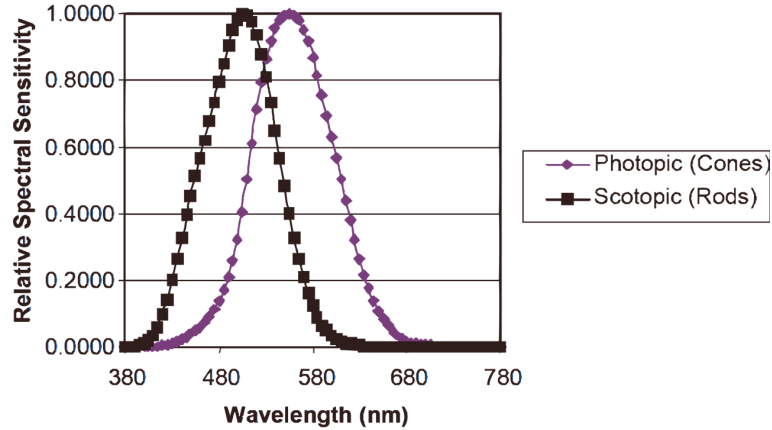


Figura 1.6: Funciones de respuestas fotópica y escotópica normalizadas. La CIE obtuvo datos experimentales y definió un observador estándar y de las cuales se pueden definir las unidades fotométricas [10].

Cantidad	Símbolo	Ecuación	Definición	Unidad
Flujo radiante (R)	Φ	$\Phi = \frac{dQ}{dt}$	Potencia en watts por unidad de longitud de onda	W
Flujo luminoso (F)	Φ_V	$683 \int_0^\infty \Phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda$	Potencia en lumen	lm
Emitancia (R)	M	$d\Phi/dt$	Flujo de radiación emitido por unidad de área	W/m ²
Irradiancia (R)	E	$d\Phi/dt$	Flujo de radiación sobre una superficie	W/m ²
Emitancia luminosa (F)	E_v	$d\Phi_v/dt$	Unidad de irradiancia correspondiente	lx = 1 ^{lm} /m ²
Intensidad radiante (R)	I	$d\Phi/d\Omega$	Flujo de radiación por unidad de ángulo sólido	W/sr
Intensidad luminosa (F)	I_v	$d\Phi_v/d\Omega$	Flujo de radiación luminosa por estereorradián	lm/sr = 1 cd
Radiancia (R)	L	$d\Phi/dA \cos \theta d\Omega$	El flujo radiante por unidad proyectada de área por unidad de ángulo sólido	W/m ² /sr
Luminancia (F)	L_v	$d\Phi_v/dA \cos \theta d\Omega$	El flujo luminoso por unidad proyectada de área por unidad de ángulo sólido	lm/m ² /sr = nt

Tabla 1.1: Las unidades radiométricas y su comparación con las unidades fotométricas.

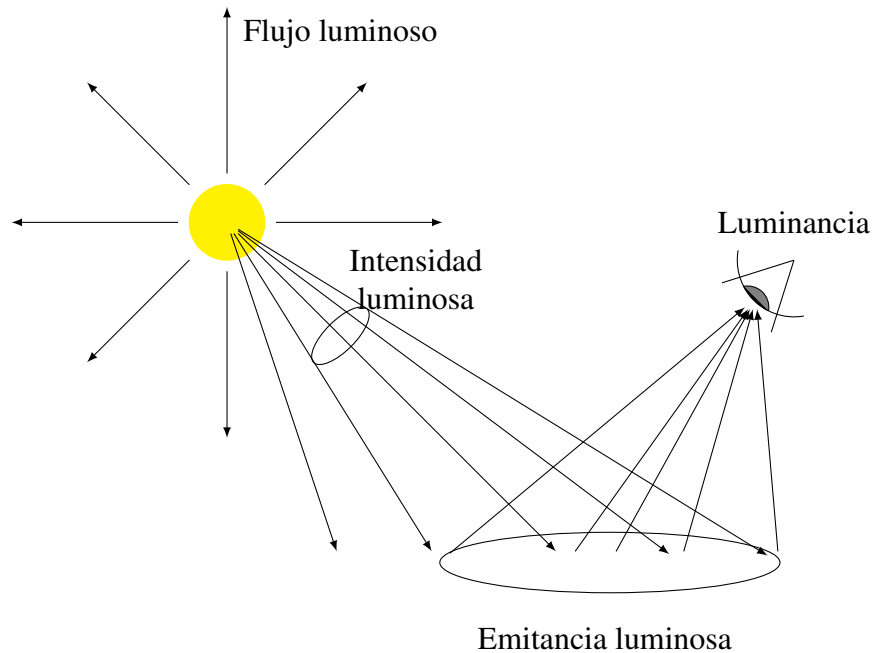


Figura 1.7: Representación gráfica de las unidades fotométricas. Las unidades radiométricas tienen el mismo significado gráfico, su cambio radica en el cambio de observador, que es el ojo humano.

1.1.4. Características de la propagación

Al colocar un detector que mida los rayos que llegan a una superficie necesitamos conocer no solamente el flujo que llega al detector, también necesitamos conocer los ángulos directores del rayo como vimos en la sección anterior. Por lo que para poder determinar completamente la propagación de un conjunto de rayos necesitamos información espacial, es decir, la posición en la que llegan los rayos y angular de los mismos. La irradiancia (o emitancia luminosa) para la información espacial y la intensidad radiante (o luminosa) para la angular.

Al vernos en la necesidad de describir la salida de un sistema, necesitamos conocer la irradiancia y la intensidad radiante, sin embargo, no todas las configuraciones de salida son aceptadas. El principio que rige la salida permitida es la conservación de la energía, en términos de iluminación, el étendue, como veremos a continuación.

1.1.5. Étendue

El étendue es una palabra francesa cuyo significado literal es “extendido”. Aunque es un concepto relativamente sencillo de comprender, es un principio fundamental de lo que es posible (o no es posible) hacer en un sistema óptico. Comprender su significado es fundamental para cualquier sistema óptico y no solamente en aplicaciones anidólicas.

Supongamos que un rayo cruza por el eje x_1 en la dirección positiva x_2 en una coordenada $(x, 0)$ como se muestra en la Figura 1.8a, su dirección está definida por el momento óptico

p. Las componentes del momento óptico (p_1, p_2) se pueden definir en 2D de acuerdo a la Ec. (1.2) y como $|\vec{p}| = n$, entonces las componentes deben de cumplir $p_1^2 + p_2^2 = n^2$ con $p_2 > 0$, es decir la componente p_2 del momento óptico puede obtenerse como función de la coordenada p_1 de la siguiente manera, $p_2 = \sqrt{n^2 - p_1^2}$.

Por lo anterior, si conocemos el índice de refracción, solamente la componente p_1 del vector \vec{p} es suficiente para definir la dirección de propagación del rayo en el punto $(x, 0)$. Si definimos la coordenada $R = (x, p_1)$ en el espacio (x_1, p) , donde p representa el primer componente del vector \vec{p} , podemos definir completamente la dirección y posición del rayo. A este espacio lo llamamos espacio fase.

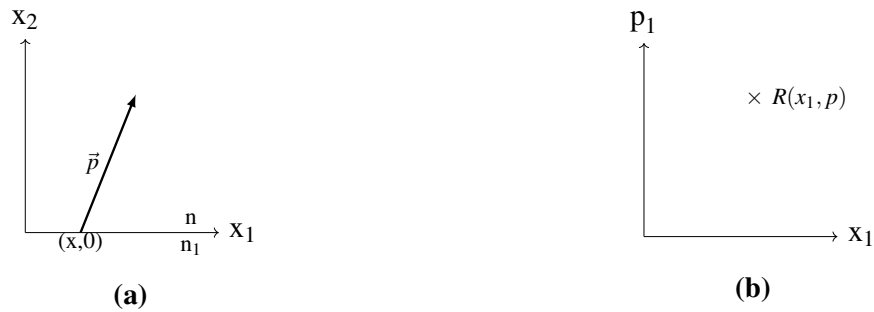


Figura 1.8: Transformación de coordenadas en el espacio real (a) al espacio fase (b).

Ahora usemos un conjunto de rayos como en la Figura 1.9a, como podemos ver, si por el punto $(x, 0)$ atraviesa un conjunto de rayos, podemos traducirlo al espacio fase como una línea recta como podemos ver en la Figura 1.9b.

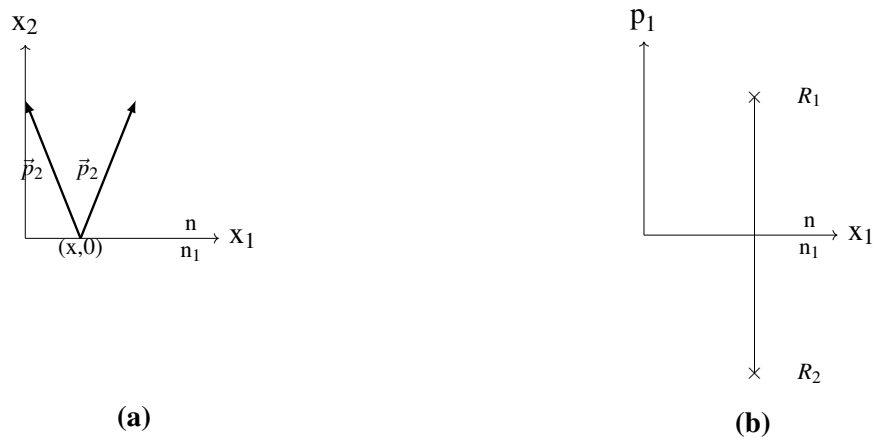


Figura 1.9: Transformación de coordenadas en el espacio real (a) al espacio fase (b).

Tomando la Figura 1.10a, si analizamos un conjunto más amplio de rayos que cruzan por la línea horizontal $x_2 = 0$, podemos construir áreas en el espacio fase como se muestra en la Figura 1.10b.



Figura 1.10: Transformación de coordenadas en el espacio real (a) al espacio fase (b).

Las líneas que siguen el trayecto $R_1R_2R_3R_4$ de la Figura 1.10b representan los rayos marginales de cada punto en el espacio real. El área R representa el conjunto de rayos que pasan por la sección que va desde $-x$ hasta x en el espacio real a esto se le conoce como **étendue** y es la extensión que utiliza una fuente al entrar a un sistema óptico. El étendue de forma rectangular solo sucede cuando la apertura de cada conjunto de rayos es simétrica y aquí podemos ver fácilmente que el étendue es el producto del espacio total ocupado por los rayos (x) y el ángulo formado por los mismos (α). Si hacemos un análisis similar en 3D, el étendue sería el producto del área ocupada por los rayos y el ángulo sólido que emite el conjunto de rayos.

Ahora, consideremos, una sección sencilla con una lente convergente como en la Figura 1.11. Al cruzar por el sistema óptico, el ángulo de propagación de cada rayo disminuye, es decir la componente p del momento óptico disminuye, sin embargo, ahora la fuente aparenta provenir de la línea detrás de la fuente original. El étendue se conserva en este sistema, es decir, el producto del área inicial por el ángulo sólido es igual al producto del área final aparente por el ángulo sólido final. Esta compensación entre ángulo sólido y área se conoce como conservación del étendue.

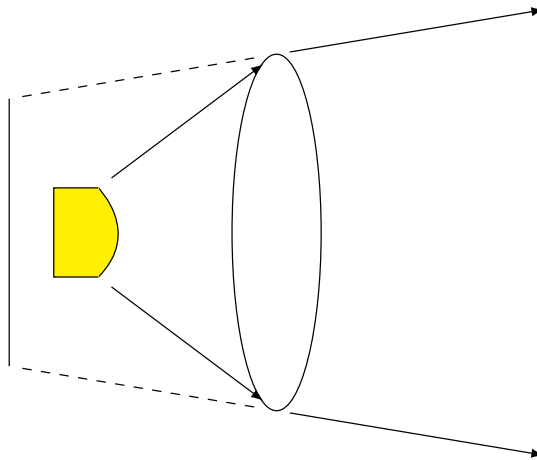


Figura 1.11: Supongamos que tenemos una fuente como la mostrada. Si analizamos la imagen, es fácil ver que el étendue (producto del área de la fuente por el ángulo sólido) se conserva, debido a que, al pasar por la lente convergente, el momento óptico disminuye, pero el área aumenta, debido a que aparenta una fuente de mayor tamaño, como si la fuente proviniera de la línea detrás de la fuente.

Podemos hacer un ejercicio similar para una lente divergente si usamos una fuente de área "grande" y apertura "pequeña" aparentará una fuente de área "pequeña" con apertura "grande". Sin embargo, cabe notar que una situación inversa no puede pasar.

Por un lado, el étendue puede incrementarse usando un difusor, pero una vez incrementado, no puede reducirse. No existe un "antidifusor" para deshacer lo que el difusor ha hecho. Para ejemplo de ello, veamos la Figura 1.12. En la figura, vemos como una fuente de área A emite rayos con una apertura "grande", al pasar por un sistema óptico, los rayos se coliman; esto forma una fuente aparente de área a con rayos de apertura "pequeña". Este sistema óptico no es posible debido a que el étendue disminuiría, es decir, el área R de la Figura 1.10b disminuiría sin pérdida de rayos.

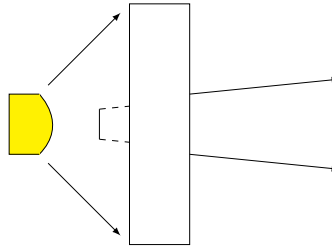


Figura 1.12: Observe que el étendue no puede reducirse sin una pérdida de flujo debido a que, para un flujo constante, un menor étendue significaría una radiancia básica más alta y esto no es posible.

1.2. Geometrías de tubos de luz

Los TGL se pueden clasificar dependiendo de factores geométricos y el método por cual dirige la luz. Iniciamos distinguiendo su geometría a través de su forma longitudinal y transversal. Ambas presentan sus ventajas y desventajas, además de que pueden combinarse de acuerdo con la aplicación. Podría pensarse que ambas geometrías son indistinguibles, sin embargo, la forma transversal define la forma de propagación de la luz y la cara longitudinal ayuda con la distribución de la luz.

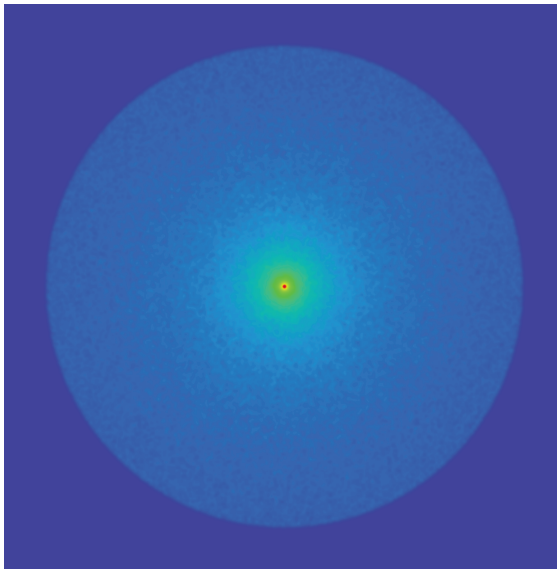
Continuamos con los tipos de clasificación de acuerdo con el método por el cual dirige la luz. Básicamente existen 2 métodos, el de reflexión, y el de dispersión. En principio, podemos combinar la geometría con los métodos para dirigir y controlar la iluminación de acuerdo con la aplicación.

Se abordará la descripción teórica que tienen los TGL desde el punto de vista de la óptica anidólica, las características de los métodos de iluminación y los distintos usos que tienen los TGL en medicina e industria, mostrando los trabajos más recientes a la escritura de esta tesis, abordaremos un panorama del futuro de las TGL y la importancia de este trabajo en los usos de TGL de refracción.

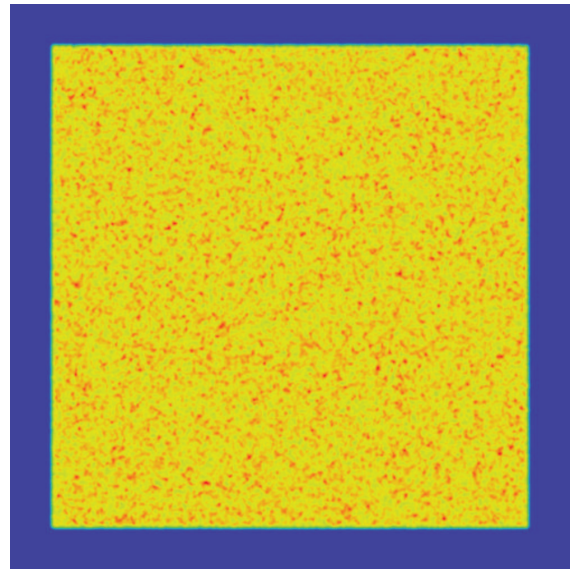
1.2.1. Geometría transversal

Los TGL se pueden clasificar por la geometría transversal tomando el número de lados y solamente trabajaremos con geometrías conocidas, es decir, las geometrías asimétricas no son consideradas. Consideramos que la longitud del TGL es suficientemente grande y uniforme, por lo que solamente la geometría transversal afecta la propagación de la luz. También consideramos que el índice de refracción es uniforme en todo el TGL.

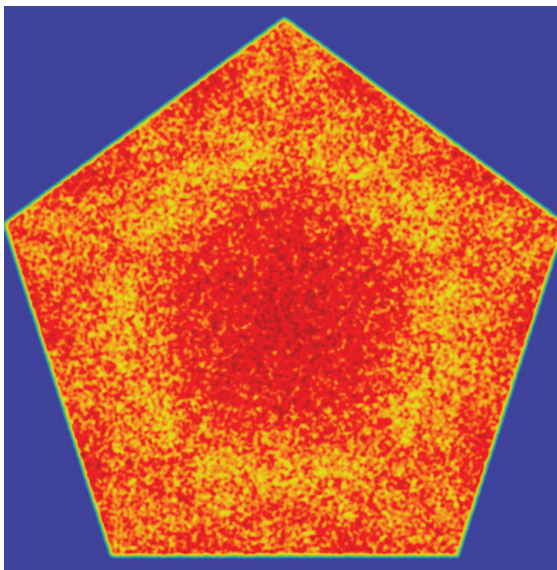
Los TGL de geometría transversal poligonal regular han sido utilizados para homogeneizar la luz [11, 12]. Puede resultar sorprendente que los TGL cilíndricos no provean de una uniformidad alta, en su lugar, proveen anillos concéntricos. Los TGL con geometrías poligonales regulares presentan una mayor uniformidad en la cara de salida como se muestra en la Figura 1.13, en donde se introducen una fuente gaussiana en la cara de entrada. En la Figura 1.13a se muestra la luminancia de un TGL cilíndrico, como se puede observar, la mayor concentración de luminancia se encuentra en el centro. Para una geometría transversal cuadrada como el de la Figura 1.13b, se observa como la luminancia es uniforme en toda la cara, es una de las geometrías más utilizada por ser sencilla. En la Figura 1.13c y Figura 1.13d se muestra la luminancia en la cara de salida de TGL pentagonal y hexagonal respectivamente, como se puede observar, la luz se distribuye por toda la cara. Por último, el perfil cuadrado, que es el que muestra una luminancia uniforme y una geometría sencilla es el perfil que se utiliza en este trabajo.



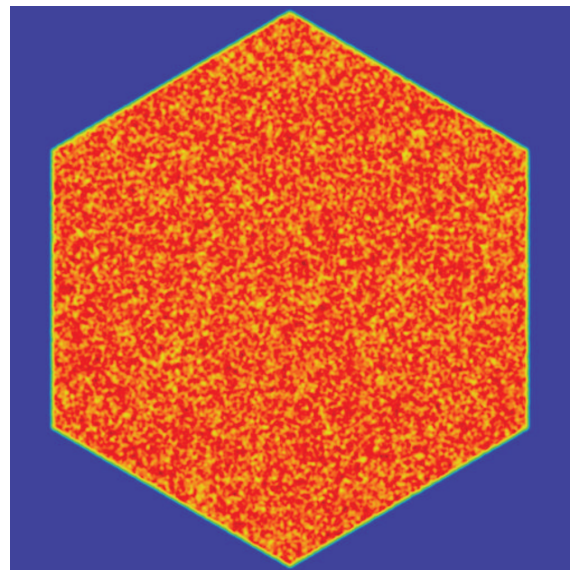
(a) Luminancia para un TGL de forma cilíndrica.



(b) Luminancia para un TGL de sección transversal cuadrada.



(c) Luminancia para un TGL de sección transversal pentagonal.



(d) Luminancia para un TGL de sección transversal hexagonal.

Figura 1.13: La luminancia en la cara de salida de TGL de geometrías cilíndricas, cuadradas, pentagonal y hexagonal respectivamente. Es fácil ver que la luminancia nos ofrece información parcial acerca de la luz en ese punto, también es necesario obtener la intensidad lumínica (o radiante) para obtener toda la información del sistema y cumplir con la conservación del étendue.

En este trabajo se utilizan las geometrías rectangulares debido a que son comerciales por lo que no hay necesidad de fabricar un componente adicional, sin embargo, solamente se presenta el formalismo matemático y un análisis numérico, pero un trabajo experimental se

puede realizar fácilmente en un trabajo a futuro.

1.2.2. Geometría longitudinal

La longitud también es de importancia en el proceso de transmisión, ya que la luz se homogeneiza debido a la RTI con las paredes del TGL y se debe de asegurar una cantidad de reflejos suficiente para lograrlo. Se han realizado estudios para lograr obtener la longitud mínima para que esto suceda, [13] muestra una aproximación para la longitud mínima que proporciona uniformidad como muestra la Tabla 1.2:

Lados de TGL	Proporción Longitud/Radio
3	3
4	3
5	19
6	3

Tabla 1.2: La proporción del radio de la sección transversal de un TGL y su longitud necesaria para obtener uniformidad en irradiancia (luminancia).

Este tipo de configuraciones de ensanchamiento también se han utilizado para acoplar luz como el trabajo de Arnaoutakis et al., en el que usa TGL ensanchado para acoplar luz concentrada proveniente de una lente hacia fibra óptica [14].

Por otro lado, un TGL también puede ser ensanchado o adelgazado conservando su geometría transversal. Fournier et al. utilizan un ensanchamiento con forma de Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) para homogeneizar la salida en la cara frontal. Se muestra en la Figura 1.14.

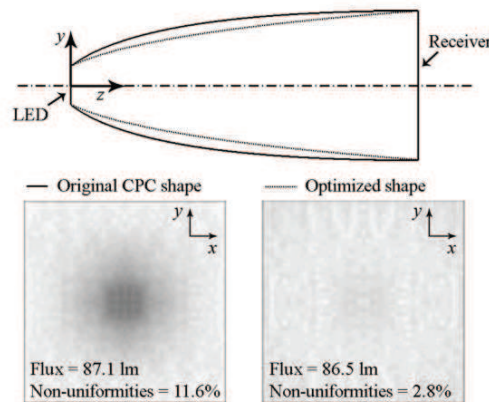


Figura 1.14: Ensanchamiento de un TGL para proporcionar una irradiancia uniforme [8].

Por último, la curvatura del TGL afecta a su propagación, por ejemplo Hough realizó un trabajo de un TGL con curvatura para medir el flujo que se pierde con respecto a la curvatura.

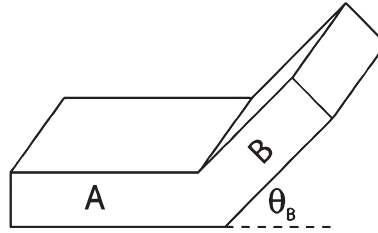


Figura 1.15: Hough presenta este modelo para medir la pérdida de flujo debido a la curvatura.

Por lo anterior, estudiar las 3 variables simultáneamente, longitud, geometría transversal y curvatura se vuelve un problema complicado, ya que la irradiancia en la cara de salida tiene estas tres dependencias, además de las conocidas que son el índice de refracción del medio y el TGL y apertura de la fuente, por lo que sería un problema complejo que en general se fijan una o dos propiedades para simplificar el problema. En este trabajo se fijarán algunas variables como son la longitud (sin ensanchamiento o adelgazamiento) y la curvatura.

1.3. Clasificación de tubos de luz

Presentadas las geometrías de los TGL individualmente, el siguiente paso natural es su combinación para evaluar los distintos métodos para extraer luz.

Evidentemente se pueden combinar los métodos de extracción de luz para obtener distintos resultados de acuerdo a la aplicación deseada, por lo anterior, se puede realizar un estudio muy extenso de las distintas geometrías (tanto longitudinal y transversal) de distintos tamaños o ángulos de fuente, con distintos índices de refracción, pero eso necesitaría un estudio extenso y hasta ahora, no se ha encontrado en la literatura una teoría que combine todas las variables geométricas con las técnicas de extracción, sin embargo, si existen estudios específicos.

Contar con una teoría general de TGL, nos daría todas las soluciones para nuestras aplicaciones, por lo que hasta ahora vemos que existen muchas dependencias, como pueden ser, la fuente, el índice de refracción del material, el índice de refracción del medio en el que está inmerso el TGL, el método o métodos de extracción. Esta cantidad de variables produce un problema complejo.

Hasta ahora, esta tesis presenta con una aplicación en específico, por lo que se acotan la cantidad de variables, e intenta dejar una variable (el índice de refracción) general para poder obtener más soluciones.

Tipo	Definición	Ejemplos
De superficie	Se colocan partículas en la superficie, utiliza comúnmente pintura blanca para romper la RTI. [16]	
De volumen	Dopa el TGL con partículas [17] rompiendo la RTI.	
Reflectivo	Coloca sobre la superficie un material reflectivo como películas de metales [18]	
Refractivo	Solo usa RTI para extraer la luz lateralmente [18]	

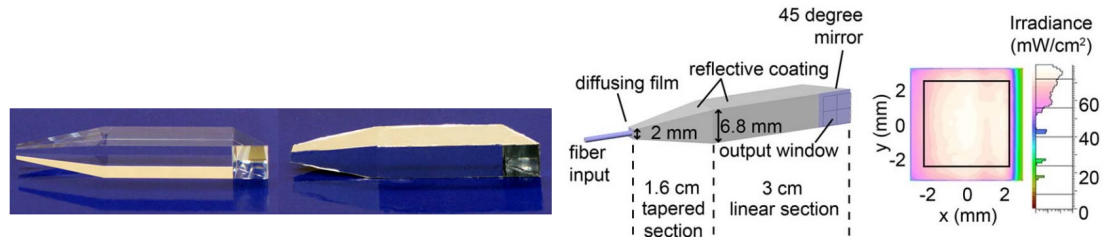
Tabla 1.3: Los TGL se clasifican también por dopaje en el material. Este puede ser colocado en la superficie en forma de pintura o películas de aluminio, se puede dopar en su fabricación con partículas grandes y aprovechar la dispersión de Mie o simplemente colocar ranuras.

1.4. Aplicaciones

1.4.1. Terapia fotodinámica

La TFD es un tratamiento contra el cáncer que combina drogas foto-sensitivas y luz en la presencia de oxígeno para iniciar reacciones químicas que resultan en una acción citotóxica que causa daño irreversible al tejido de tumor. Para el tratamiento, típicamente se distribuye la droga sistemáticamente y se utiliza fibra óptica difusora o con terminaciones tipo lente. Para evitar dañar tejido sano, se coloca un blindaje al paciente, pero en ocasiones la luz de la fibra se dispersa y llega a zonas no protegidas por el blindaje, dañando tejido sano. La propuesta de Canavesi et al. es utilizar un TGL de sección transversal cuadrada y ensanchado en su longitud inicial, conectado a la fibra óptica que provee la luz para el tratamiento. La cara de

salida no es recta, es un espejo rotado 45° para iluminar lateralmente la zona. Esta solución provee un método de contacto, con una distribución cuasi uniforme, Canavesi et al. reporta una zona de mayor intensidad, lo que puede producir poca uniformidad en el tratamiento [3]. El TGL propuesto y resultados de Canavesi et al. se muestran en la Figura 1.16.



(a) El diseño de Canavesi et al. usó vidrio BK7.

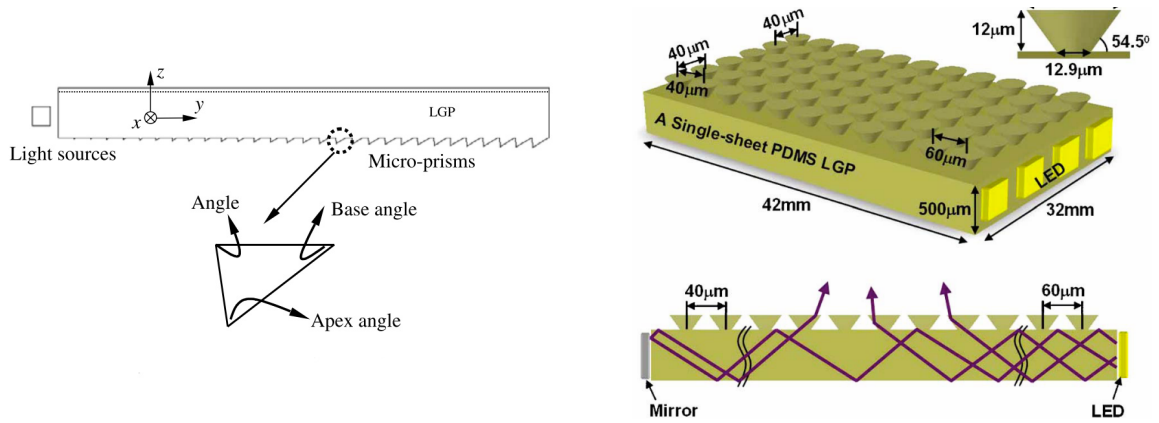
(b) Los detalles del diseño muestran la cara de salida y el resultado de la irradiancia de una simulación.

Figura 1.16: El TGL propuesto por Canavesi et al. es una solución para la TFD. Uno de los problemas encontrados es que la irradiancia no es uniforme en toda el área de salida, esto produce una zona caliente al aplicar el tratamiento.

1.4.2. Retroiluminación

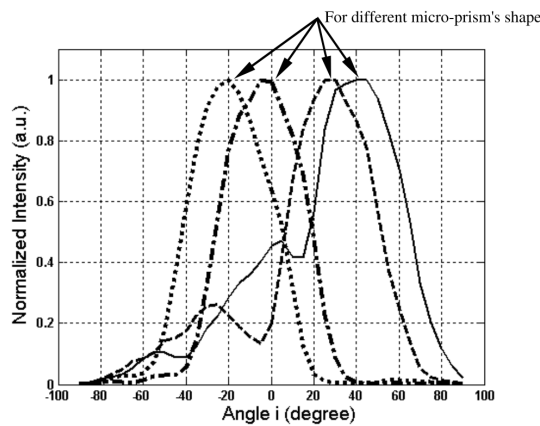
Los dispositivos de retroiluminación son ampliamente utilizados en los dispositivos con pantallas de cristal líquido o en inglés *Liquid Crystal Display* (LCD), están compuestos de fuentes LED y una variación del TGL que es evidente, la lámina guidora de luz, que es simplemente un TGL con un rectángulo ancho y angosto como sección transversal, este ensanchamiento permite utilizar una matriz de fuentes en la cara de entrada.

Un par de propuestas de esta aplicación son las presentadas por Feng et al. o J.-H. Lee et al. en 2005 y 2007 respectivamente, aunque existen otras [19]. Los diseños de sus propuestas muestran TGL en forma de lámina con elementos rectos o cónicos, respectivamente, que son grabados encima de la superficie de una cara lateral. Feng et al. usan micro grabado en forma de prisma en línea recta que corre a lo largo del lado ancho de la lámina. Reportan un resultado de uniformidad de 86% y un pico de iluminación de $+40^\circ$ a -20° con “tres distintos LED” como fuente. Por otro lado, J.-H. Lee et al. reporta el uso de una malla, también micro grabada en una lámina, de conos truncados con una inclinación de 54.5° . En este trabajo reportan la luminancia angular desde un punto central de la lámina, que también muestra una zona de mayor intensidad, que es consistente con los resultados obtenidos en sistemas similares. Los resultados de ambos trabajos se muestran en la Figura 1.17. Ambos diseños fueron pensados para tener una iluminación uniforme a lo largo de una superficie como se espera en los display

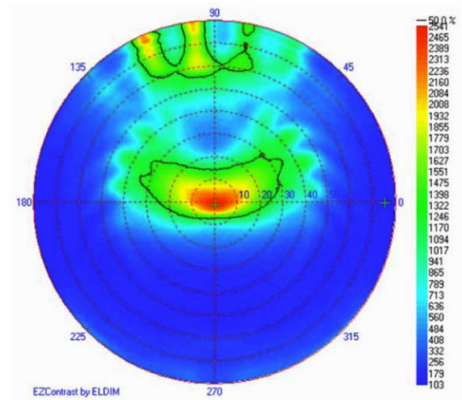


(a) Diseño propuesto de Feng et al.

(b) Diseño propuesto de J.-H. Lee et al.



(c) Este resultado muestra la intensidad normalizada respecto al ángulo director c de Feng et al.

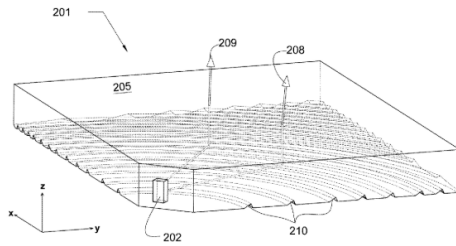


(d) Este resultado muestra la distribución angular de luminancia respecto al centro del TGL de J.-H. Lee et al.

Figura 1.17: Diseños de TGL en forma de lámina o en inglés *Light Guide Plates*. Ambos diseños muestran un patrón en toda la superficie. El primero muestra un diseño tipo zanja y el segundo muestra un diseño de matriz. La diferencia con un TGL es que en estos diseños la luz refleja por RTI en la cara superior e inferior y los rayos que se propagan con un ángulo director recto respecto a la normal de la superficie salen directamente por la cara opuesta a la entrada.

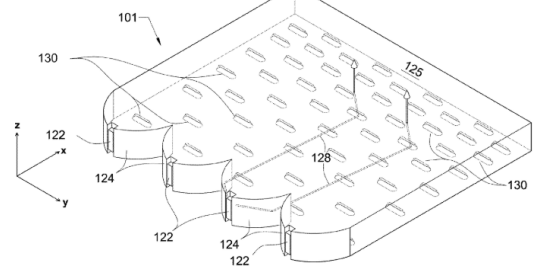
Esta aplicación tiene diversas propuestas de diseño, con tan solo ver los diseños de algunas de las patentes otorgadas por la Oficina de Patentes de Estados Unidos en inglés *United States Patent and Trademark Office (USPTO)*, algunas de ellas recientes [20-23] se puede ver en la Figura 1.18 diseños similares a los mencionados.

Fig. 2

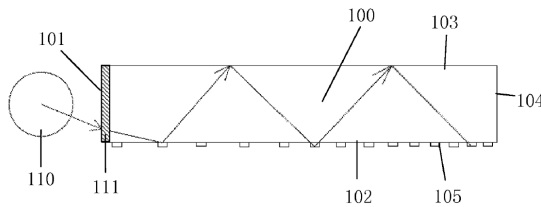


(a) Propuesta de Cho et al. 2014

Fig. 1



(b) Propuesta de Kim y Gandhi en 2012



(c) Propuesta de Ren et al. en 2014

Fig. 1 (Prior Art)

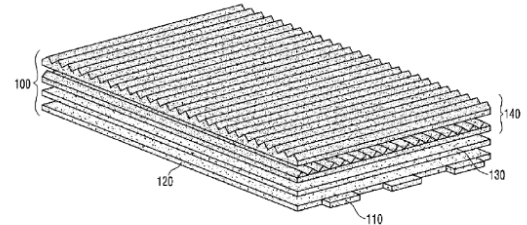


Fig. 2 (Prior Art)

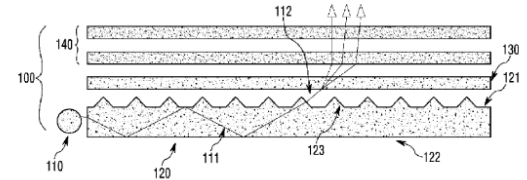
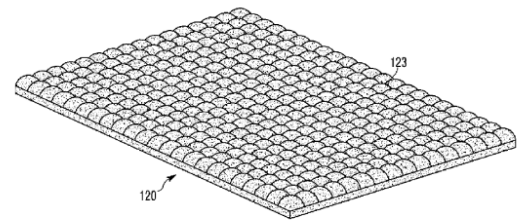


Fig. 3 (Prior Art)



(d) Propuesta de Yoon et al. en 2015

Figura 1.18: Algunas de las patentes otorgadas por la USPTO en paneles de retroiluminación. Los diseños se presentan en forma de “zanjas” como en (a), forma de TGL unidos por una cara como en (b), elementos unidos a la cara de salida como en (c) o en forma de malla como en (d.)

1.4.3. Luminarias LED

Una de las aplicaciones que contiene un sistema óptico de mayor número de elementos mencionados hasta ahora son las luminarias. Una luminaria tiene un componente óptico, como un espejo, que refleja la luz de una fuente a un receptor, de tal manera que el receptor obtenga una iluminación prescrita. En general una luminaria es el problema inverso a la concentración, de una fuente.

El objetivo de las luminarias es iluminar, de manera uniforme, evitando reflejos, deslumbramiento, y debe ser controlada para iluminar puntos (spot) o grandes áreas. Debido a que la tecnología LED ha tenido gran crecimiento, también ha sido así para las luminarias propuestas. En las luminarias, el deslumbramiento y el control son problemas muy documentados que han sido disminuidos con el uso de paneles difusores, reflectores, rejillas a lo largo de distintas tecnologías, desde fluorescentes hasta LED.

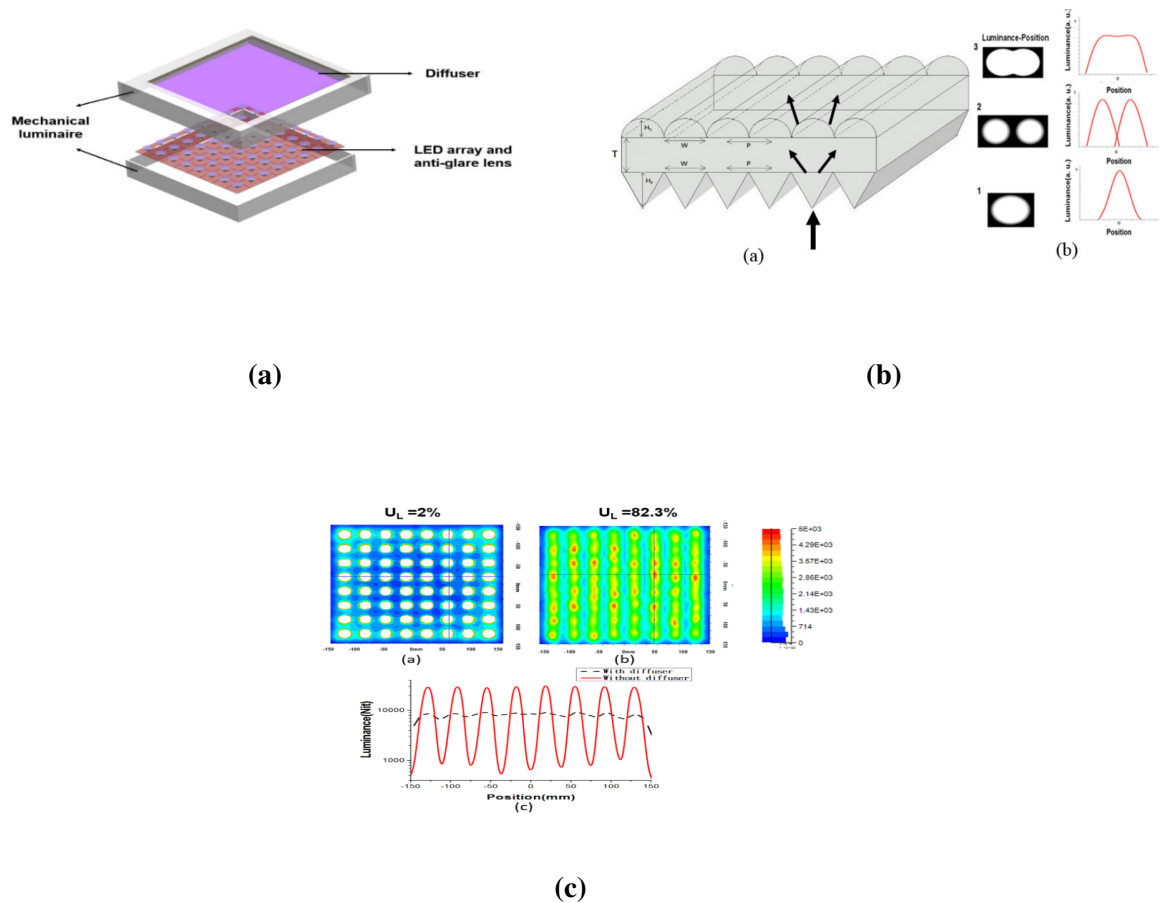


Figura 1.19: La propuesta de Chiang et al. muestra el esquema general de su luminaria compuesta de un arreglo de LED y un panel difusor en (a). En (b) muestra con detalle el panel difusor y la luminancia en tres puntos principales. Finalmente, los resultados de la luminancia de la luminaria con y sin difusor son mostrados en (c)

Los LED pueden ser usados para reemplazar las lámparas fluorescentes actuales, sin embargo, tienen una distribución distinta. Las lámparas fluorescentes son tubos largos con emisión lateral, y el LED su emisión no es distribuida como en la fluorescente. Para resolver este problema, se pueden utilizar un arreglo de LED, pero también se pueden utilizar TGL iluminados por LED

Aunque solamente se presenta un trabajo, hay diversos en el área cuyo objetivo es similar, buscan reducir el deslumbramiento y aumentar la uniformidad de manera eficiente, evitar pérdidas de luz, en algunos casos (luminarias para calles) reducir la contaminación lumínica [25]

1.4.4. Sistemas de iluminación solar y concentradores

Los sistemas de iluminación solar tienen muchas variaciones dependiendo del sistema óptico de colección, transporte o distribución de la luz. Algunos autores han hecho revisiones extensas acerca del tema, colectando mucha información de las publicaciones y productos que hay en el mercado. Los clasifican por ensombrecimiento que usan principalmente luz difusa, ensombrecimiento que usan principalmente luz directa, sistemas de guiado de luz difusa, sistemas de guiado de luz directa, sistemas de dispersión, sistemas de transporte de luz cerrados con reflexión especular múltiple o RTI o convergencia, sistemas que usan colectores de luz por métodos pasivos o activos por mencionar algunos. [26, 27]. Solamente los sistemas de iluminación solar que utilizan transporte son los que se pretende abordar en esta tesis. Debido a que necesitan un sistema de distribución que es el que determina la naturaleza y calidad de la salida de la luz [26].

Los ejemplos de aplicación abordados son sistemas de distribución y como se puede notar que no abordan con profundidad la naturaleza de la fuente, aunque el LED es popular en su diseño, debido a que el diseño se basa en las características de la fuente inherentes a cualquier fuente, pudiendo ser solar, LED, incandescente, fluorescente, u otras con o sin sistemas ópticos de concentración o transporte como fibra óptica. Un ejemplo de ello es el sistema de Aiming. Ge et al. que presentó en el 2012 que utiliza luz solar guiada a través de fibra óptica [28].

En el siguiente capítulo abordaremos a detalle los TGL como elementos de distribución y transporte. Como abordamos en este capítulo, los diseños de distribución de luz son, en general prismáticos, sin incluir elementos de óptica anidólica para distribución lateral.

1.5. Motivación y objetivos

Recientemente, se han hecho muchos esfuerzos para implementar sistemas de iluminación eficientes en aplicaciones de iluminación diurna,[29, 30] en tableros de automóviles,[31-33] en unidades de retroiluminación LCD,[34, 35], así como en aplicaciones de terapia fotodinámica. [3, 36] En general, la luminaria empleada en estos sistemas de iluminación se basa en un esquema de iluminación lateral que consiste en utilizar un tubo de luz para guiar la luz procedente de una fuente óptica y extrae gradualmente la luz guiada a través de una de las caras de la tubería de luz utilizando una o varias ranuras para iluminar un área específica. Algunos de los principales desafíos para extraer luz lateralmente de tubos de luz utilizando

ranuras son el control de la eficiencia de extracción de luz, la distribución de irradiación y el área de iluminación.[3, 31-37] Estas características de iluminación dependen directamente del perfil de la ranura en combinación con el ángulo de apertura de la fuente y la geometría del tubo de luz. En particular, se debe prestar especial atención al ángulo de apertura de la fuente debido a la diversidad de fuentes ópticas empleadas en los sistemas de tubos de luz. Por ejemplo, podemos mencionar punteros láser, fuentes de punto como fuentes lambertianas, luz solar suministrada a través de fibras ópticas, LED, entre otros.[37-39] Las herramientas de simulación de trazado de rayos actuales permiten el diseño de estas ranuras en el sistema de tubos de luz. Sin embargo, todavía existe la necesidad de un modelo analítico que describa la relación entre el ángulo de apertura de la fuente, la geometría de la tubería de luz y el perfil de ranura para simplificar el proceso de diseño de la luminaria y, en consecuencia, reducir los tiempos de cálculo. Estos problemas deben considerarse relevantes debido al gran número de rayos requeridos en las simulaciones y a los múltiples parámetros físicos implicados en el sistema de tuberías de luz. En este sentido, todos los sistemas de iluminación reportados en trabajos anteriores no proporcionan un punto de partida para diseñar adecuadamente estas ranuras de acuerdo con el ángulo de apertura de la fuente. Por lo tanto, estamos interesados en proponer un modelo analítico para seleccionar de una manera más sistemática el perfil de ranura más conveniente, tamaño e inclinación de la ranura para extraer luz lateralmente de una manera personalizada de tubos de luz que utilizan fuentes ópticas con diferentes ángulos de apertura y proporcionar de esta manera un formalismo que se puede utilizar como una herramienta de diseño de primer orden para los sistemas de iluminación lateral. En este contexto, en esta contribución, se presenta de un análisis teórico de la extracción de luz de tubos de luz utilizando ranuras lineales y elípticas con el objetivo de proponer un modelo analítico para seleccionar en primera instancia las dimensiones y la inclinación de estas ranuras para obtener características específicas de la iluminación. Con este modelo analítico, se realiza una caracterización de la luz extraída utilizando ranuras lineales y elípticas y considerando fuentes de luz con diferentes ángulos de apertura. Hemos considerado perfiles lineales y elípticos para analizar el impacto del perfil de ranura en las características de iluminación lateral y, además, mostrar cómo se puede utilizar el formalismo propuesto para diseñar ranuras con diferentes perfiles geométricos. El área de iluminación obtenida con ambos perfiles de ranura se calcula con este formalismo analítico que relaciona el ángulo de apertura de la fuente de luz, las dimensiones de la tubería de luz, y el perfil y la inclinación de la ranura. De esta manera, podemos escalar el diseño de ranura a otras dimensiones de tubos de luz. Además, se realiza un análisis numérico para verificar los resultados analíticos, calculando además la distribución de irradiancia para ranuras lineales y elípticas. Por último, analizamos el papel del ángulo de apertura de la fuente en el diseño geométrico del perfil de ranura. Esta información es relevante para explotar completamente los mecanismos de extracción de luz de los tubos de luz de iluminación lateral para aplicaciones de iluminación múltiple.

CAPÍTULO 2

Formalismo teórico propuesto para el diseño de ranuras en TGL's

En esta sección definiremos algunas de las aplicaciones del TGL que se propondrá. Se pretende realizar un TGL de emisión lateral como las propuestas por Canavesi et al., Ren et al. en la que la luz se extrae lateralmente. Como es evidente, debemos disminuir la complejidad del problema, por lo que el TGL no tendrá ensanchamiento o adelgazamiento, su índice de refracción será uniforme y se prefiere el PMMA ya que es un material barato y accesible. Además, a diferencia de la propuesta de Canavesi et al., no se contará con una película reflejante en la superficie.

Aunque se han reportado estructuras como la de Cho et al. en donde las ranuras se realizan sobre la superficie que extrae los rayos, y aplicaciones con estructuras anidólicas como las de Fournier et al. en donde la cara de salida es la cara lateral de un TGL, hasta el conocimiento del autor, no se han reportado estructuras que combinen ambas propuestas, una estructura anidólica para extracción de luz por la cara lateral de un TGL.

La estructura propuesta está inspirada en el Concentrador Elíptico Compuesto (CEC) que es un colector de mayor eficiencia para fuentes cercanas. La estructura propuesta no tiene propósitos de formar imágenes, sino coleccionar rayos para extraerlos lateralmente.

2.1. Propuesta

Este trabajo es una continuación de la tesis de maestría Sánchez-Guerrero en la que se describe el uso de una ranura elíptica para la extracción de luz. En la tesis «Análisis de cortes elípticos en tubos de luz para su extracción» se describe el método de diseño de la ranura, pero se utiliza una fuente de un sistema óptico que colecta luz y la transporta a través de una fibra óptica. A diferencia del trabajo anterior, en este trabajo se presenta un formalismo matemático del diseño, además de mostrar un método que permite predecir el área de salida de una familia de ranuras dependientes de la apertura de la fuente. En este trabajo, se demuestra la utilidad de la ranura propuesta comparada con una ranura recta, y se muestra un ejemplo de uso en el que se seleccionó un LED y utilizando el formalismo matemático se pudo predecir el área de salida. Se muestra el control del área de salida (irradiación) porque, como vimos en el capítulo anterior, eso nos da parcialmente información acerca de la fuente en el espacio fase, a partir

de ahí se puede intuir que la intensidad radiante debe de conservarse para 2 áreas de igual tamaño, sin embargo, se presenta que la estructura propuesta modifica la intensidad radiante de un modo benéfico para las aplicaciones como en la de «Lightpipe device for delivery of uniform illumination for photodynamic therapy of the oral cavity.» Canavesi et al. así como también se presenta una configuración en que la ranura propuesta obtiene un mayor flujo.

A continuación se muestra el análisis matemático de ranuras para determinar el área de salida. Se realizó de manera independiente al modelo del análisis numérico para que sea dependiente de la apertura de la fuente, un índice de refracción del medio y del material, es decir, en principio, podemos cambiar los parámetros de la simulación y predecir los resultados.

2.2. Análisis de ranuras

En nuestro estudio, hemos utilizado un TGL de sección transversal cuadrada hecho de PMMA para obtener una irradiancia uniforme en la sección transversal del mismo [19, 40]. Se puede observar una representación bidimensional de este TGL en la Figura 2.1, donde se ha introducido una ranura lineal en la cara de salida.

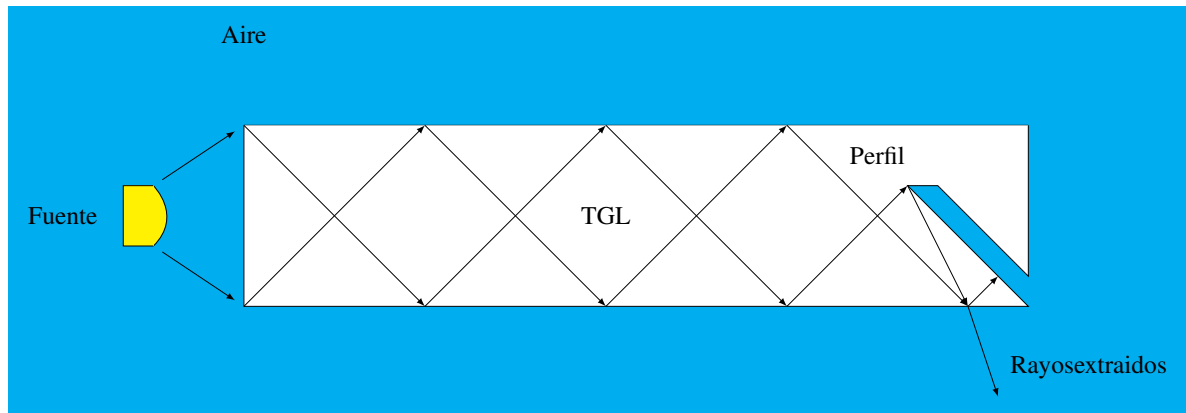


Figura 2.1: La ley de Snell establece que si un rayo de luz que viaja en un medio de índice de refracción n_1 e incide en un medio de índice de refracción n_2 es desviado de acuerdo a la Ecuación Ec. (1.1a).

De acuerdo con la Figura 2.1, los rayos guiados se extraen del TGL después de una reflexión en la ranura causada por RTI. Sin embargo, solo algunos rayos que llegan a la interfaz pueden obedecer esta condición, mientras que el resto de ellos continúan su propagación a lo largo del TGL. Para analizar en detalle cuántos rayos se pueden extraer con este mecanismo, procederemos a identificar los rayos marginales que obedecen a la condición RTI en un punto de la interfaz como se muestra en la Figura 2.2.

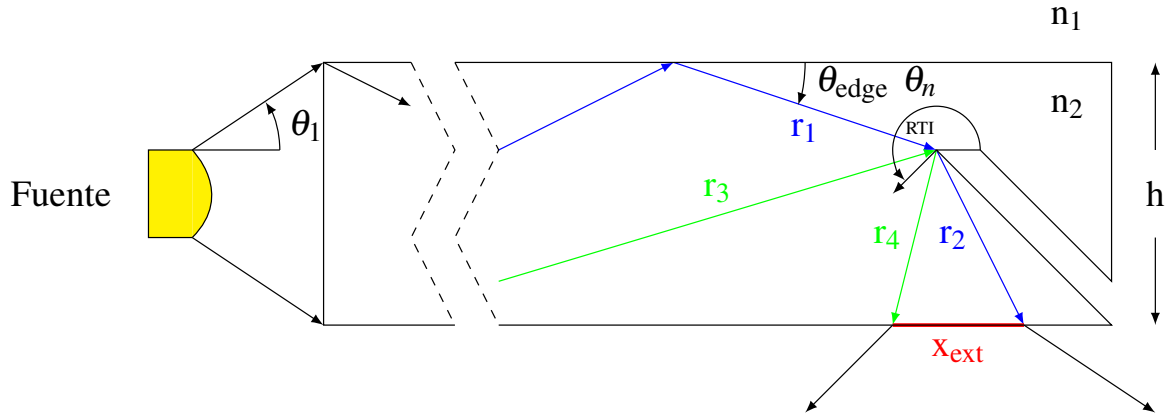


Figura 2.2: Esquema para describir los rayos marginales que obedecen a la condición RTI en la interfaz.

Para comenzar con el análisis, consideramos una fuente con un semi-ángulo de apertura θ_1 que ilumina el TGL como se muestra en la 2.2. Un rayo marginal que proviene de la fuente que se muestra en color azul se guía hacia el TGL y, después de algunos reflejos, llega a la interfaz como un rayo r_1 con una dirección angular θ_{edge} . Este ángulo se puede calcular utilizando la Ec. (1.1a) de la siguiente manera: $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_{edge})$. El rayo r_1 se refleja por la condición RTI en la interfaz y se convierte en un rayo reflejado r_2 . Un grupo de rayos también puede reflejarse por la condición RTI en el mismo punto de la interfaz si estos están entre el rayo r_1 (azul) y el rayo r_3 (verde) respectivamente. La dirección de r_3 se puede determinar utilizando la condición de ángulo crítico en la sección de salida y la dirección del vector normal a la ranura dada por θ_n . El rayo r_3 se refleja por RTI en la ranura y se convierte en un rayo reflejado r_4 . El grupo de rayos reflejados entre r_2 y r_4 puede salir del TGL a lo largo de una sección lateral del TGL indicado por x_{ext} , y estos se convierten en rayos extraídos o de iluminación lateral. El valor de x_{ext} es de gran importancia porque define, el área de rayos extraídos cuando el objetivo a iluminar está cerca del TGL [3]. En la siguiente sección, obtenemos de un modelo una expresión analítica del parámetro x_{ext} , que será válida para diferentes valores de la altura del TGL h , el índice de refracción del TGL n_2 , el índice de refracción del medio n_1 , y la apertura angular de la fuente θ_1 , respectivamente.

2.2.1. Extracción desde un solo punto

Como se mencionó, el rayo r_1 se refleja en la ranura por la condición RTI para formar el rayo r_2 . En particular, el rayo reflejado r_2 puede salir del TGL si su ángulo director es menor que el ángulo crítico θ_c como se indica en la Figura 2.3a. Para calcular x_{ext} , primero establecemos las coordenadas (x', y') que se muestra en la 2.3b e introducimos la línea f con un ángulo θ_s para conectar el punto inicial de r_1 colocado en $(0, h)$ con el final de r_2 colocado en $(a', 0)$. Después, calculamos la intersección de los rayos r_1 y r_2 considerando las ecuaciones de línea recta para r_1 y r_2 , que se definen usando el punto $(0, h)$ y el ángulo θ_{edge} para el rayo r_1 , y el punto $(a', 0)$ y el ángulo θ_c para el rayo 2, y considerando además la relación $\tan \theta_s = a'/h$. Por lo tanto, esta intersección se puede expresar de la siguiente manera:

$$x_{\text{int}} = \frac{-h + h \cot \theta_c \tan \theta_s}{\cot \theta_c - \tan \theta_{\text{edge}}} \quad (2.1a)$$

$$y_{\text{int}} = \frac{h \cot \theta_c - h \cot \theta_c \tan \theta_{\text{edge}} \tan \theta_s}{\cot \theta_c - \tan \theta_{\text{edge}}} \quad (2.1b)$$

Por otro lado, en la Figura 2.3c, el rayo r_3 se refleja bajo la condición RTI en el punto de intersección $(x_{\text{int}}, y_{\text{int}})$ para formar el rayo r_4 . En este caso, la dirección angular ρ del rayo r_4 debe cumplir la condición $\rho > \pi/2 - \theta_c$ para poder extraerlo del TGL. Finalmente, en la Figura 2.3d se muestran todos los rayos involucrados en el presente análisis, los rayos dentro del ángulo θ_p formado por r_1 y r_3 podrán ser extraídos del TGL.

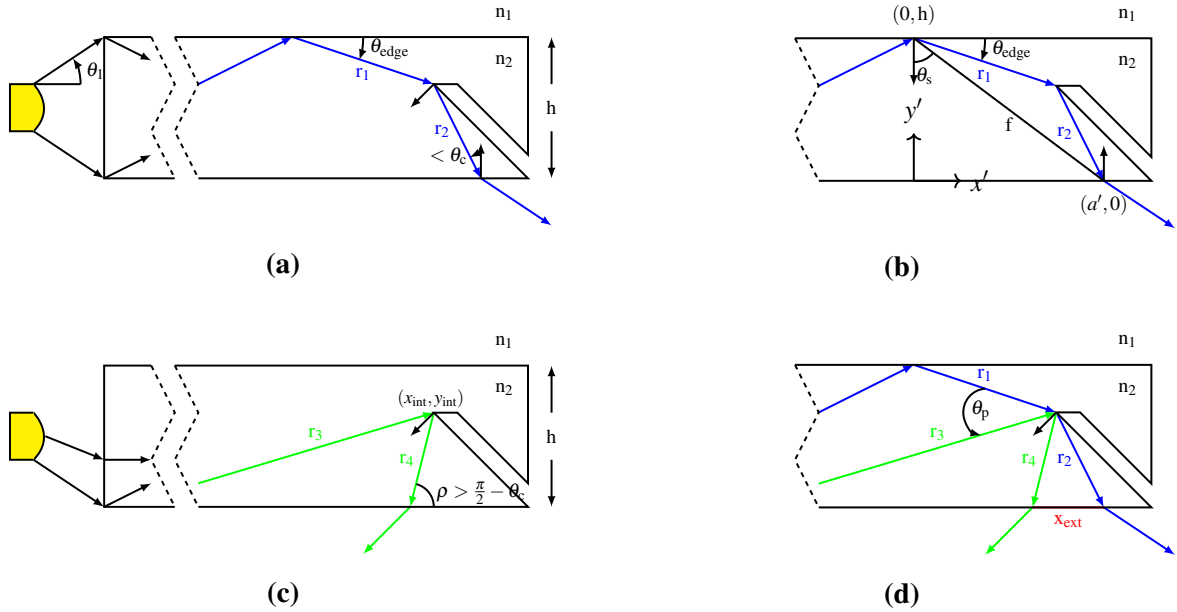


Figura 2.3: Los rayos de reflexión en $(x_{\text{int}}, y_{\text{int}})$, a) r_1 se refleja en la interfaz de para formar r_2 , b) la línea f conecta los rayos marginales r_1 y r_2 en $(0, h)$ y $(a', 0)$, c) r_3 se refleja en la interfaz para formar r_4 , d) los rayos dentro del ángulo θ_p formado por r_1 y r_3 podrán salir en x_{ext} .

A partir de un modelo como se muestra en la Figura 2.3d y considerando la ley de los senos en el triángulo formado por r_2 , r_4 y x_{ext} , podemos obtener una expresión para x_{ext} , que asocia la apertura angular de la fuente θ_1 (a través de θ_{edge}) y el punto de intersección $(x_{\text{int}}, y_{\text{int}})$ en la ranura:

$$x_{\text{ext}} = \frac{y_{\text{int}} \sin \theta_p}{\sin(\theta_n + \theta_c - \pi) \sin(\theta_{\text{edge}} + 2\theta_n)} \quad (2.2)$$

La Ec. (2.2) conecta las propiedades físicas del TGL con las características de la fuente y la ranura. En particular, esta ecuación es válida para cualquier punto de la ranura. Ahora, para considerar la contribución simultánea de todos los puntos de la ranura, se debe agregar un término adicional a x_{ext} , que dependerá del perfil de la ranura como se describe en la siguiente sección.

2.2.2. Extracción de una ranura

Consideramos los siguientes perfiles de ranura: un “perfil lineal” que representa el caso más simple, y un “perfil elíptico” que se basa en el CEC [40]. Para ambos perfiles, la longitud de la sección lateral donde los rayos salen del TGL no se puede determinar solo por x_{ext} . En su lugar, definimos la Longitud de Extracción:

$$L_{ext} = x_{ext} + l \quad (2.3)$$

Donde l es un término adicional que depende del perfil de ranura.

2.2.2.1. Hendidura recta

En la Figura 2.4, se muestra un esquema del perfil lineal con su parámetro correspondiente L_{ext} . Para calcular el término adicional l (resaltado en amarillo en la Figura 2.4), definimos la ecuación que describe el perfil lineal:

$$y = (x_{int} - x) \tan \left(\frac{\theta_{edge} - \theta_c + \pi/2}{2} \right) + y_{int} \quad (2.4)$$

Esta ecuación se obtuvo usando el origen de las coordenadas (x', y') , el punto de intersección (x_{int}, y_{int}) , y considerando además que la pendiente del perfil lineal es perpendicular a la normal como es mostrado en la Figura 2.4. En este sentido, el punto (x_{int}, y_{int}) y el ángulo θ_s definen la altura y la inclinación del perfil lineal. En este punto, es importante señalar que el ángulo de inclinación θ_s no es arbitrario debido a que depende directamente de la dirección de los rayos r_1, r_2 y estos a su vez deben obedecer la condición RTI en x_{ext} .

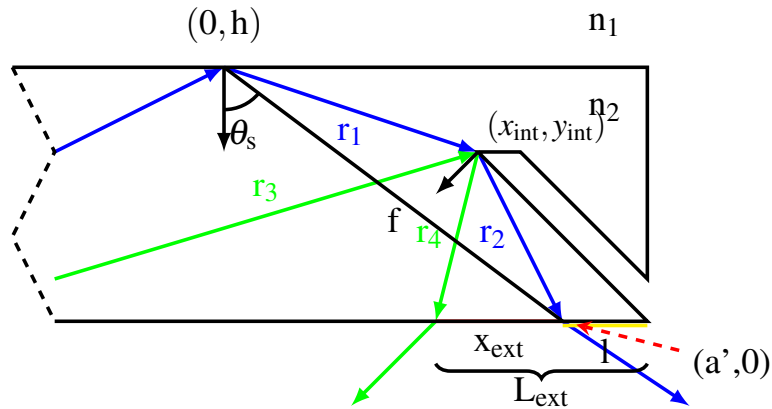


Figura 2.4: Esquema para describir los rayos marginales que obedecen a la condición RTI en la interfaz.

Por lo tanto, a través de la ecuación geométrica del perfil dado en la Ec. (2.4), podemos calcular la intersección del perfil con la cara lateral del TGL para encontrar el punto $(a' + l, 0)$, Figura 2.4. Si consideramos la distancia entre esta intersección y el punto $(a', 0)$, y además empleamos la relación $\tan \theta_s = a'/h$, podemos obtener una expresión para l como sigue:

$$l = x_{\text{int}} + y_{\text{int}} \cot \left(\frac{\theta_{\text{edge}} - \theta_c + \pi/2}{2} \right) - h \cot \theta_s \quad (2.5)$$

Por lo tanto, el parámetro L_{ext} se puede calcular mediante la adición de la Ec. (2.2) y la Ec. (2.5). Por lo tanto, a partir de estas ecuaciones, la longitud de extracción L_{ext} aumenta a medida que la altura de la ranura y_{int} crece hasta ocupar toda la cara de la sección transversal del TGL. Además, L_{ext} depende de la apertura angular de la fuente a través de θ_{edge} , la inclinación de la ranura θ_s , la normal del perfil θ_n , y el índice de refracción del TGL y el ambiente circundante a través del ángulo crítico θ_c como lo muestra la Ec. (2.6).

$$L_{\text{ext}} = \frac{y_{\text{int}} \sin \theta_p}{\sin(\theta_n + \theta_c - \pi) \sin(\theta_{\text{edge}} + 2\theta_n)} + x_{\text{int}} + y_{\text{int}} \cot \left(\frac{\theta_{\text{edge}} - \theta_c + \pi/2}{2} \right) - h \cot \theta_s \quad (2.6)$$

2.2.2.2. Hendidura elíptica

La Figura 2.5 muestra el perfil elíptico con su parámetro correspondiente L_{ext} . Establezcamos la ecuación de perfil elíptico que se definió considerando la línea f como la distancia entre los dos puntos focales con coordenadas $(0, h)$ y $(a', 0)$ respectivamente. Por lo tanto, establecemos que el centro de la elipse girada se encuentra en el centro de la línea f (o el centro del TGL) con las coordenadas $(x_{\text{cen}}, y_{\text{cen}})$.

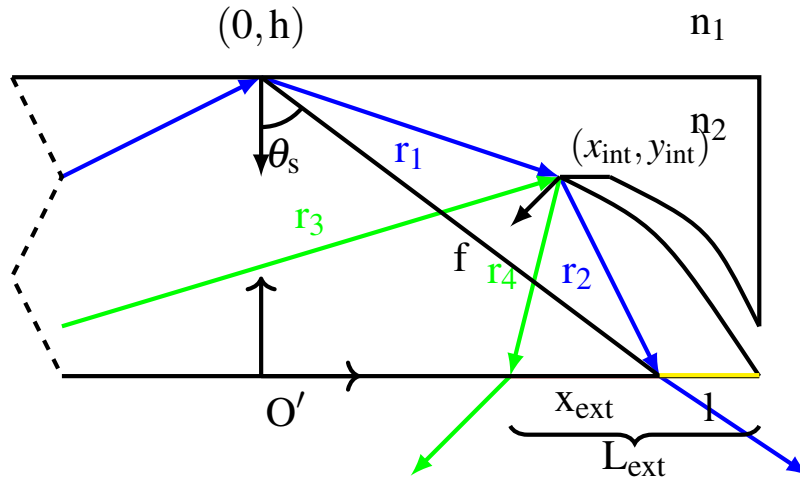


Figura 2.5: Perfil elíptico. En este esquema, la elipse se desplaza y gira alrededor de O' .

Al hacer el diseño de esta manera, aseguramos que un rayo r_1 proveniente de la fuente y reflejado en la ranura sea reflejado hacia el otro foco de la elipse. Más aún, un rayo cualquiera entre r_1 y r_2 también será reflejado por la ranura como se muestra en la Figura 2.5. Se propone el diseñamos el perfil elíptico de esta manera para tener control de su altura e inclinación a través del punto $(x_{\text{int}}, y_{\text{int}})$ y el ángulo θ_s . Como el perfil lineal, la inclinación θ_s no es arbitraria porque depende de las direcciones de los rayos r_1 y r_2 que se definen por los ángulos θ_1 y θ_n , respectivamente. El eje mayor a se puede obtener usando la relación $|r_1| + |r_2| = 2a$, y el eje menor b se puede obtener usando $b = \sqrt{a^2 + (f/2)^2}$. Al utilizar las

variables mencionadas la ecuación de la elipse girada y trasladada con respecto al origen de las coordenadas O' se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{[(x-x_{cen})\cos(\theta_s-\pi/2) - (y-y_{cen})\sin(\theta_s-\pi/2)]^2}{a^2} + \frac{[(x-x_{cen})\sin(\theta_s-\pi/2) + (y-y_{cen})\cos(\theta_s-\pi/2)]^2}{b^2} = 1 \quad (2.7)$$

$$a = \frac{\sqrt{x_{int}^2 + (h - y_{int})^2} + \sqrt{y_{int}^2 + (a' - x_{int})^2}}{2} \quad (2.8)$$

$$b = \sqrt{a^2 - (h/2 \cos \theta_s)^2} \quad (2.9)$$

Usamos la Ec. (2.7) para calcular la intersección del perfil elíptico con la cara lateral del TGL para encontrar el punto $(a', 0)$ y posteriormente el punto $(a' + l, 0)$. Al considerar la distancia entre esta intersección y el punto $(a', 0)$ obtenemos el segmento l resaltado en amarillo en la Figura 2.5. Luego, realizamos la suma de l con x_{ext} para obtener finalmente el parámetro L_{ext} , Ec. (2.3). El valor de x_{ext} es el mismo para los perfiles lineales y elípticos, y la Ec. (2.2) puede usarse en ambos casos. Por lo tanto, las diferencias observadas en L_{ext} para ambos perfiles geométricos se deben solo al parámetro l . Finalmente, como se puede observar, al usar el formalismo propuesto, podemos definir el tamaño y la inclinación de una ranura elíptica estableciendo el punto (x_{int}, y_{int}) y el ángulo θ_s y obtener un valor de L_{ext} considerando el ángulo de apertura de la fuente θ_1 y las dimensiones del TGL simultáneamente.

De la ecuación $x_{exteliptico}$ debido a que la coordenada $a' + l$ se obtiene solucionando la Ec. (2.7) para cuando $y = 0$, tomando una solución (la mas lejana al origen) restando el valor de a' y sumando la Ec. (2.2). Como se puede ver, la longitud de dicha ecuación es debido a que la Ec. (2.7) tiene dos soluciones cuando $y = 0$ y dependencias con Ec. (2.8) y la Ec. (2.9).

CAPÍTULO 3

Cálculo analítico y numérico de luz extraída por ranuras en TGL's

3.1. Análisis numérico y resultados

En la Figura 3.1, establecemos las dimensiones del TGL en 2-D. Establecemos el origen del sistema de coordenadas en el centro de la cara de entrada en la simulación numérica. Para considerar un TGL de forma cuadrada en 3-D, empleamos una sección transversal cuadrada con lados $h = 25.4$ mm, y consideramos que el perfil es constante a lo largo de la dirección del eje x .

Los perfiles lineal y elíptico se muestran en la Figura 3.1 se diseñaron utilizando las curvas definidas en la Figura 3.3 para obtener en ambos casos una longitud de extracción de $L_{\text{ext}} = 23.82$ mm. Los perfiles que se muestran en la Figura 3.1 representan un caso específico. En este sentido, se consideraron más perfiles con diferentes valores de L_{ext} en la simulación numérica.

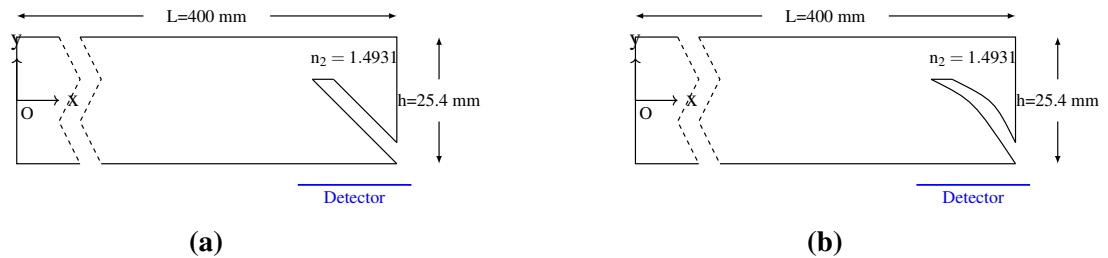


Figura 3.1: Las dimensiones del TGL que se utilizan en la simulación numérica para a) un perfil lineal y b) un perfil elíptico. La altura y la inclinación de los perfiles lineal y elíptico están diseñados para obtener en ambos casos un $L_{\text{ext}} = 23.82$ mm cuando $(\theta_1 = 75^\circ, \theta_s = 42^\circ)$ para el perfil lineal, y $(\theta_1 = 75^\circ, \theta_s = 43^\circ)$ para el perfil elíptico.

Ahora, si observamos la Figura 3.2, observamos que cuando el ángulo θ_1 es de 75° o de 10° la figura converge a la presentada en Figura 3.3. Se eligen estos casos debido a que existen fuentes para ambos y es una comparativa en casos opuestos y como se puede observar, en el caso en el de 10° el perfil lineal presenta mayores casos de longitudes de extracción.

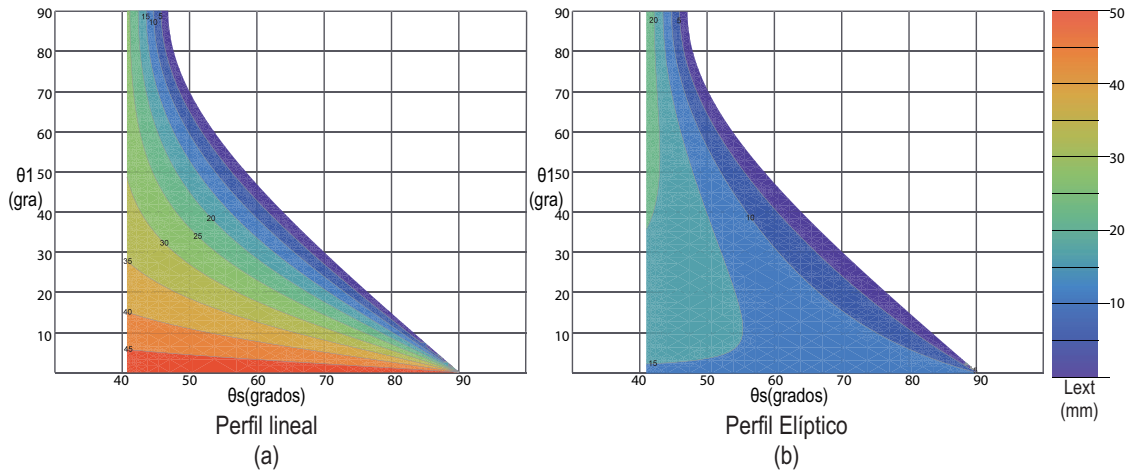


Figura 3.2: Del lado izquierdo se muestra una gráfica de contorno para la longitud de extracción de un perfil lineal y del lado derecho para un perfil elíptico. Como se puede observar, aparentemente el perfil lineal ofrece mayores longitudes de extracción comparado con el perfil elíptico, sin embargo, éstos cambian rápidamente a diferencia del perfil elíptico, quien ofrece menores longitudes de extracción, pero para ángulos de incidencia menores ofrece una familia mayor de elipses para un caso específico. Esto, es un indicador de que el perfil elíptico podría ofrecer una construcción con un mayor margen a errores de fabricación sin alterar gravemente el resultado esperado.

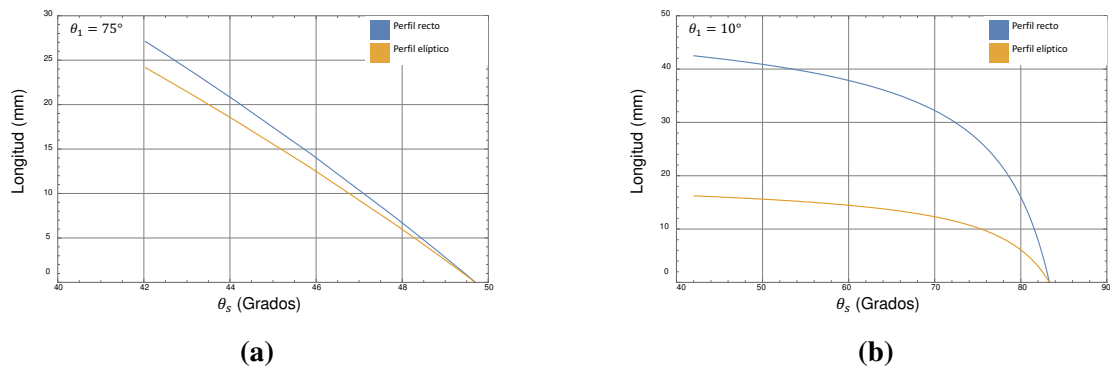


Figura 3.3: Longitud de extracción (L_{ext}) de un surco lineal y elíptico con a) $\theta_1 = 75^\circ$ y b) $\theta_1 = 10^\circ$ para diferentes valores de θ_s .

Además, hemos utilizado como una fuente LED con dos semi-ángulos de apertura diferentes $\theta_1 = 75^\circ$ y 10° . Las características del LED se indican en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Parámetros del LED utilizados en la simulación numérica.

Parámetro	Valor
Temperatura de Color Correlacionada (TCC)	6500K
Área	5.3 mm ²
Semi-ángulo de apertura	75° y 10°
Rayos	1,000,000
Potencia	1 W
Centro	(0, 0, -0.01)

También hemos considerado un detector cerca de la cara lateral del TGL para medir el parámetro de longitud de extracción L_{ext} numéricamente como se muestra en la Fig. Figura 3.1. La posición central del detector se colocó en (0, -12.701 mm, 390 mm) con un área cuadrada de 50 × 50 mm y una discretización de 1000 × 1000 píxeles respectivamente.

En esta parte es conveniente señalar que para precisar una comparación justa entre las características de la luz extraída de los perfiles, no basta con una mayor extracción de luz, sino también deben de evaluarse otras características que presentaremos más adelante.

Ahora, procedemos a simular el rendimiento del perfil en el sistema de TGL de iluminación analizando la irradiancia medida en el detector. En la Figura 3.5, mostramos los resultados obtenidos usando un LED con $\theta_1 = 75^\circ$ y un perfil lineal con $\theta_s = 42^\circ, 43^\circ, 44^\circ$ y 45° (líneas negras). Además, en la misma figura, mostramos los resultados obtenidos utilizando un perfil elíptico de $\theta_1 = 75^\circ$ y $\theta_s = 43^\circ, 44^\circ, 45^\circ$ y 46° (líneas rojas). Los ángulos θ_1 y θ_s se seleccionaron de acuerdo con la Figura 3.3 a para obtener los siguientes valores teóricos de $L_{ext} = 10, 15, 20$ y 23.82 mm para ambos perfiles lineal y elíptico respectivamente.

De acuerdo con la Figura 3.4, los perfiles lineales y elípticos pueden extraer luz con una longitud de extracción numérica L_{ext} cercana a lo predicho por el análisis teórico. En todos los casos, podemos observar que la distribución de irradiancia a lo largo de la columna central del detector (Posición Y) no es plana, pero tiene una ligera tendencia a ser uniforme a medida que aumenta L_{ext} para los perfiles lineales y elípticos. Además, podemos observar que cuando $L_{ext} = 23.82$ mm, el perfil elíptico realiza una mejor extracción de potencia que el lineal. Esta diferencia se puede visualizar de una mejor manera si calculamos la eficiencia de extracción para este caso de la siguiente manera: $\eta = P_1/P_0$, donde P_0 es la potencia que se propaga dentro del TGL antes de llegar a la interfaz ranurada, y P_1 es la potencia extraída medida en el detector de salida. Como resultado, obtenemos las siguientes eficiencias de extracción de luz: $\eta = 0.5$ y 0.8 para los perfiles lineal y elíptico, respectivamente. Estos resultados son la evidencia de que cuando $L_{ext} = 23.82$ mm el perfil elíptico puede extraer más rayos de iluminación.

En la Figura 3.5, obtuvimos la distribución angular de la luz extraída para cada L_{ext} considerada en la Figura 3.4. Los parámetros α y β corresponden a los ángulos de salida de los rayos de iluminación extraídos en las direcciones de los ejes y y z. La Figura 3.5 demuestra que en todos los casos la distribución angular de β no es uniforme y muestra valores principalmente positivos. Este hecho se atribuye a la orientación del perfil a lo largo de la dirección

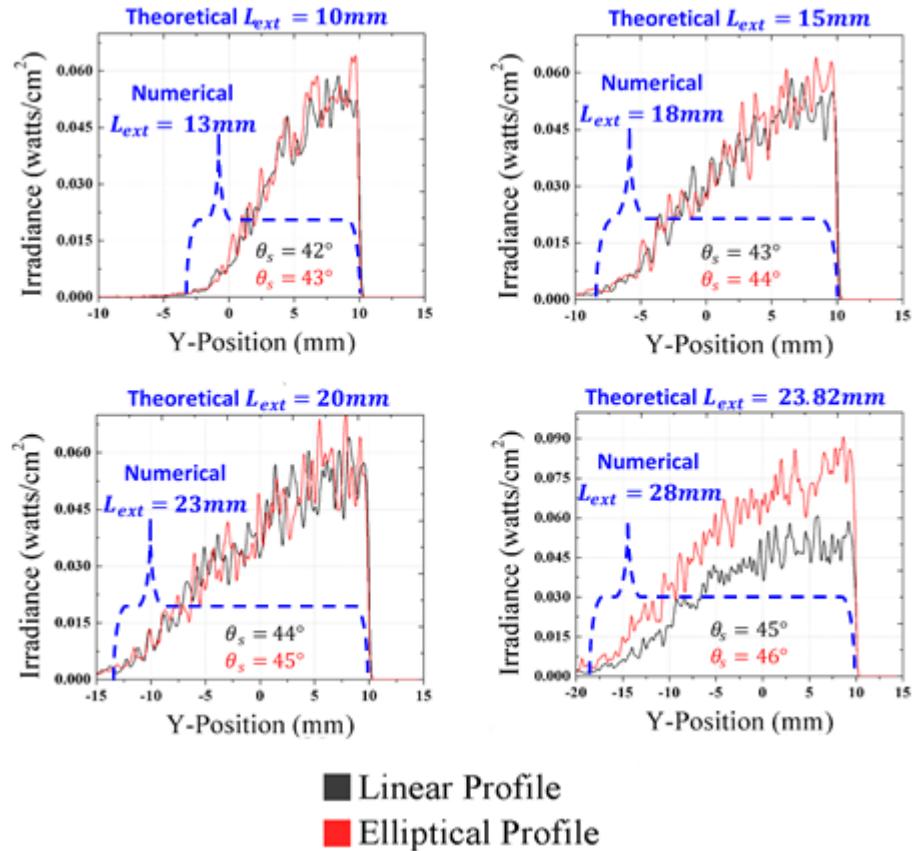


Figura 3.4: Columna central del detector a lo largo del eje Y. Mediciones de irradiancia empleando una fuente con $\theta_1 = 75^\circ$. La longitud de extracción L_{ext} en cada análisis numérico está cerca de lo predicho por el análisis teórico. En el último caso, que corresponde al $L_{ext} = 23.82\text{mm}$ teórico, el perfil elíptico realiza una mejor extracción de potencia que el perfil lineal. Todas las curvas son iguales a lo largo del eje X del detector.

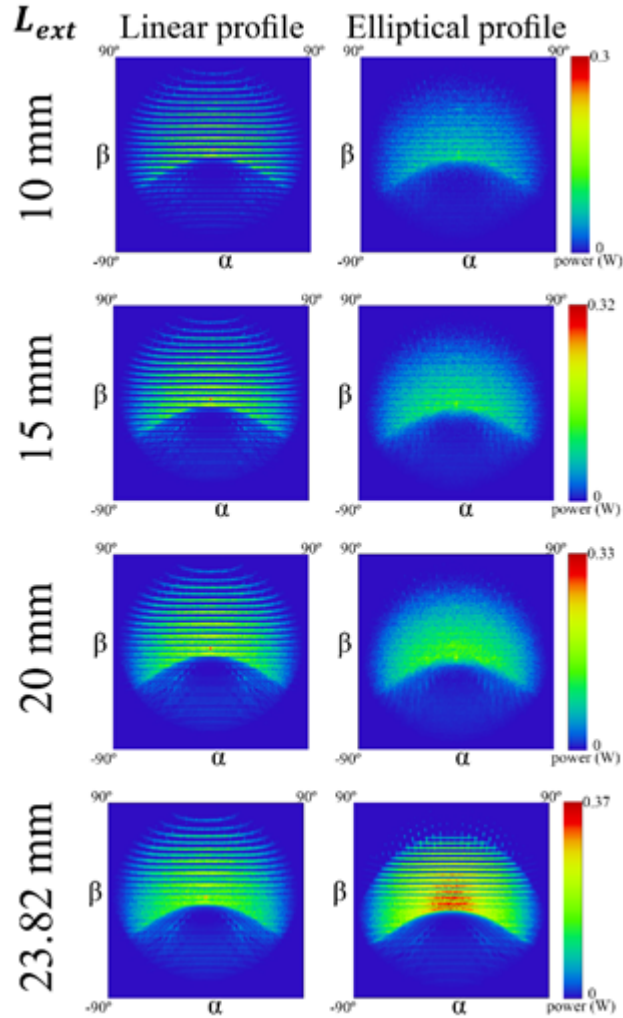


Figura 3.5: Mediciones de distribución del espacio en angular para un perfil lineal y elíptico empleando una fuente con $\theta_1 = 75^\circ$.

del eje z. Además, podemos identificar la presencia de ciertas franjas a lo largo de la distribución angular de β . Estas franjas son menos notorias por el perfil elíptico, lo que indica una mejor uniformidad de distribución angular de los rayos de iluminación. La presencia de estas franjas se ha informado anteriormente, y éstas dependen de la distribución de irradiancia dentro del TGL y el diseño geométrico del perfil de ranura. En este punto, es importante mencionar que todos estos resultados son reproducibles si empleamos un mayor número de rayos en la simulación numérica.

Por otro lado, también hemos analizado el caso cuando el semi-ángulo de apertura de la fuente es $\theta_1 = 10^\circ$. Este caso resulta interesante porque muchas fuentes están compuestas de fibras ópticas con aperturas numéricas definidas por $NA = \sin(\theta_1)$ con valores entre 0.14 y 0.2. Esto significa que la luz proveniente de estas fuentes se introduce en el TGL con los semiángulos de apertura alrededor de $\theta_1 = 10^\circ$. Antes de simular el rendimiento en $\theta_1 = 10^\circ$, analicemos nuevamente los resultados mostrados en la Figura 3.3 b. En $\theta_1 = 10^\circ$, las curvas de L_{ext} para los perfiles lineales y elípticos se ven más espaciadas a las que se muestran en la

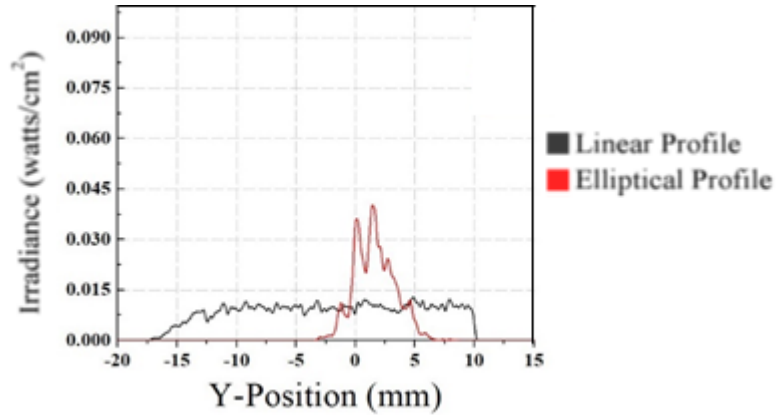


Figura 3.6: Columna central del detector a lo largo del eje Y. Mediciones de irradiancia empleando una fuente con $\theta_1 = 10^\circ$. Todas las curvas son iguales a lo largo del eje X del detector.

Figura 3.3 a. Entonces, para ángulos de θ_1 , es más difícil encontrar un perfil lineal y elíptico con el mismo L_{ext} . Por esta razón, procedemos a seguir una estrategia comparativa diferente para $\theta_1 = 10^\circ$ diseñando un perfil lineal y elíptico con la misma inclinación $\theta_s = 50^\circ$, pero diferente L_{ext} . En la Figura 3.7, mostramos los resultados numéricos obtenidos usando un LED con $\theta_1 = 10^\circ$ y un perfil lineal con $\theta_s = 50^\circ$ (línea negra). Además, en la misma figura, mostramos los resultados para un perfil elíptico de $\theta_1 = 10^\circ$ y $\theta_s = 50^\circ$ (línea roja). Los ángulos θ_1 y θ_s mencionados anteriormente producen los siguientes valores teóricos de $L_{ext} = 15$ mm para el perfil lineal y $L_{ext} = 40$ mm para el elíptico respectivamente.

De acuerdo con la Figura 3.6, la longitud de extracción numérica L_{ext} para el perfil lineal, tal como encontramos con el análisis teórico. Sin embargo, encontramos que algunas diferencias se encuentran en los valores nominales de L_{ext} numéricos y teóricos. Estas diferencias implican que el formalismo teórico no es preciso para los semi-ángulos de apertura de fuente baja, pero puede predecir razonablemente la diferencia relativa entre los valores de L_{ext} obtenidos con ambos perfiles. Además, en la Figura 3.6, notamos que la distribución de irradiancia para el perfil lineal (línea negra) es más uniforme que el perfil elíptico (línea roja). Lo anterior, indica un mejor rendimiento del perfil lineal para producir una iluminación uniforme a valores bajos de θ_1 . Sin embargo, en la misma figura, se muestra que la extracción de energía obtenida con el perfil elíptico no se reduce drásticamente a pesar de tener L_{ext} mucho más bajos para el perfil lineal. Para analizar con más detalle esta última observación, procederemos a calcular la eficiencia de extracción de energía η para ambos perfiles de ranura en $\theta_1 = 10^\circ$. Obtenemos los siguientes valores de $\eta = 0.5$ y 0.6 para los perfiles lineal y elíptica respectivamente. Estos cálculos confirman que los perfiles lineales y elípticos producen una extracción de energía similar a pesar de la diferencia significativa entre sus valores L_{ext} .

En la Figura 3.7 graficamos la distribución angular de la luz extraída para los perfiles lineales y elípticos analizados en la Figura 3.6. Es notable que la distribución angular de β para el perfil elíptico (lado derecho) sea más extensa en comparación con esto para el perfil lineal (lado izquierdo). Sugiere que cuando el objetivo a iluminar está alejado del TGL, promovemos un área de iluminación extendida a lo largo de la dirección z si empleamos el perfil elíptico en lugar de usar el perfil lineal.

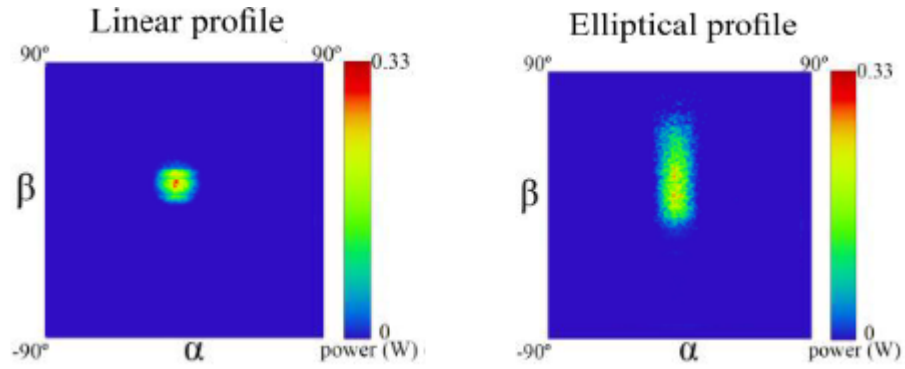


Figura 3.7: Mediciones de distribución de espacio angular para un perfil lineal y elíptico con $\theta_1 = 10^\circ$ y $\theta_s = 50^\circ$.

3.2. Discusión

En nuestro análisis numérico se ha utilizado como fuente un LED de Lumiled[®], de la serie Luxeon 3030 2D [41] que tiene una radiación típica como se muestra en la Figura 3.8 con una temperatura del color de 6500 K. Se utilizó esta fuente debido a que Lumiled[®] ofrece un archivo con sus rayos, esta elección fue muy efectiva debido a que este trabajo no pretende emular un LED, sino probar el TGL, lo cual fue conveniente para disminuir el trabajo de emular una fuente y sabemos que el producto se encuentra disponible en el mercado.

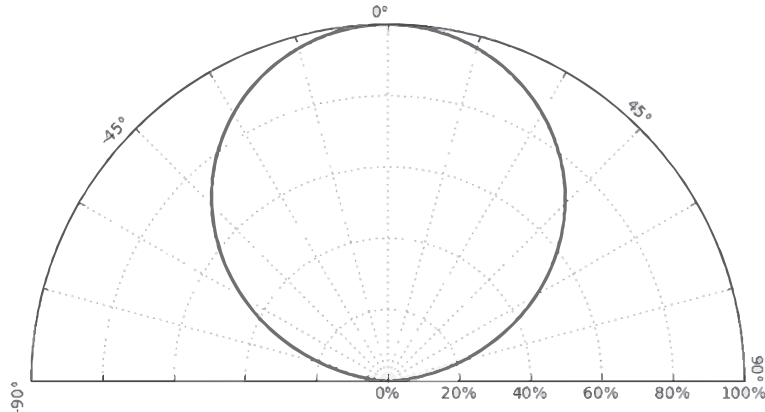


Figura 3.8: Radiación polar típica de un LED Lumiled[®] de la serie Luxeon 3030 2D.

Por otra parte, las dimensiones de los TGL varían de acuerdo a la aplicación, en nuestro caso, usamos las dimensiones de 1 pulgada, debido a que es un material que se puede adquirir con facilidad, planeando en un futuro poder realizar la experimentación que, debido a las limitaciones actuales, no fue posible realizar durante el desarrollo de este trabajo. En este capítulo no se mostró el motivo de la selección de estas dimensiones debido a que el modelo teórico debería ser capaz de trabajar para dimensiones mucho más grandes que la longitud de onda, esto no fue demostrado, pero si fue incluido en el modelo a través de la variable h . Ahora, se podría discutir acerca de la selección del TGL cuadrado y las implicaciones,

para esto se encontraron motivos suficientes para esta selección. Primero, la luminancia es uniforme en toda la cara, que sucede debido a que los rayos se dispersan debido al reflejo en las caras, a diferencia de uno circular que siempre pasarían por el centro. Y otro motivo es que al modificar la sección transversal, también se modificaría la fabricación, si tenemos una sección transversal circular, la ranura debería hacerse formando un arco, una sección pentagonal sería en secciones de arcos, lo cual es difícil de realizar en la práctica; al tener un TGL cuadrado, la ranura se fabricaría en un corte recto a través de la sección transversal y este podría hacerse con láser fácilmente.

Los resultados presentados anteriormente muestran un alto impacto del ángulo de apertura de la fuente θ_1 y el ángulo de inclinación θ_s en las medidas de la longitud de extracción L_{ext} , la eficiencia de extracción de luz y la irradiancia y distribuciones angulares de los perfiles lineales y elípticos. El parámetro de longitud extraída L_{ext} , que se calculó numéricamente y teóricamente con una buena precisión, se puede manipular modificando el diseño geométrico del perfil. En este contexto, utilizamos el gráfico de contorno de la Figura 3.2 como herramienta para ayudar en el diseño de primer orden de los perfiles lineal y elíptica para obtener un L_{ext} específico. El valor del parámetro L_{ext} es de gran importancia cuando el objetivo a iluminar está cerca del TGL, y de acuerdo con la Figura 3.4 y Figura 3.6, este parámetro se puede modificar de una manera diferente dependiendo de si empleamos un perfil lineal o elíptico. Resulta interesante analizar el parámetro L_{ext} considerando otros diseños geométricos del perfil como un perfil hiperbólico o parabólico siguiendo el proceso de diseño descrito en la sección 2. En estos casos, la línea f es una asíntota para estos nuevos diseños.

Como se puede observar en la Figura 3.2, se podría concluir que el perfil lineal tiene ventaja sobre el perfil elíptico al ofrecer mayores longitudes de extracción para ángulos de apertura de la fuente θ_1 menores, pero esto requiere mayor precisión en fabricación, ya que pequeños cambios en el ángulo θ_s repercutiría enormemente en la longitud de extracción esperada. Por otro lado, si observamos el perfil elíptico, este presenta una mayor tolerancia a errores de fabricación, ya que el ángulo θ_s en ángulos θ_1 pequeños presenta menores cambios en la longitud de extracción. Cabe señalar que esta gráfica solo es una representación para un caso específico, podríamos incrementar una dimensión adicional en donde tendríamos que hacer una relación entre n_1 y n_2 , pero su interpretación para diseño se volvería compleja, ya que esta supuesta imagen representaría la familia de ranuras dependiente de la fuente y la razón de índices de refracción, además, estaría limitada a los índices de refracción de materiales existentes y eso se encuentra fuera de los límites de este trabajo ya que nuestro objetivo es el diseño para iluminación y no explorar el comportamiento con diversos materiales. En resumen, este contorno solo es una rebanada de una figura compleja.

También se logra ver que en la Figura 3.5 que aparecen algunas franjas visibles en el perfil lineal en el espacio angular. Se descartó que sean debido a un ruido numérico, ya que se realizaron simulaciones para determinar un número adecuado de rayos, para esto se hicieron diversas simulaciones incrementando el número de rayos en 1000 para cada simulación hasta llegar a 1,000,000 y midiendo la irradiancia se hizo el cálculo de la media cuadrática, los resultados se pueden observar en Figura 3.9. Sin embargo, esto no resuelve la incógnita, y no se logra observar en las gráficas presentadas. Este fenómeno se puede explicar fácilmente haciendo uso del étendue, si se observa con detenimiento, existe una densidad en el centro de la figura, lo que significa que una gran cantidad de rayos tiene un ángulo β y α pequeño, debido a que el área en ambos casos es similar y los rayos marginales, solo queda una posibi-

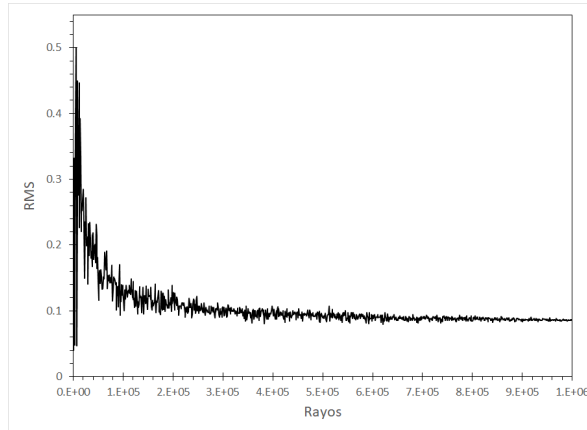


Figura 3.9: Se hicieron simulaciones para determinar un número adecuado de rayos. Se logra observar que para los valores usados en la simulación el valor converge. Esto nos descarta el ruido numérico en las simulaciones de irradiancia.

lidad para conservar el étendue, reducir el espacio angular. Debido a esto se puede observar que mientras aparezcan densidades centrales, los ángulos (espacio angular) se reducirán, y esto se puede observar en el perfil elíptico para 23.82 mm, como aparece una densidad central para un área definida, el espacio angular debe reducirse y aparecen dichas franjas. Dicho de otra manera, aquí se puede apreciar la conservación de la energía. Aunque no deja de ser interesante en un futuro obtener una gráfica del étendue de ambos casos para poder observar este fenómeno en el espacio de momento óptico.

Por otro lado, predecimos algunos escenarios donde la extracción de energía es diferente para los perfiles lineales y elípticos a pesar de tener la misma L_{ext} . Esta característica se observa en la Figura 3.4 para $\theta_1 = 75^\circ$ y $L_{ext} = 23.82$ mm. En este caso, la eficiencia de extracción de luz obtenida con el perfil elíptico es mayor que la obtenida para el perfil lineal. Además, identificamos un resultado opuesto en la Figura 3.6 para $\theta_1 = 10^\circ$, con una eficiencia de extracción de luz similar para ambos perfiles a pesar de tener un L_{ext} diferente. En este caso, el perfil elíptico tiene un L_{ext} más bajo que el perfil lineal pero una potencia de salida más concentrada. Esta última característica se puede utilizar para desarrollar sistemas de tubos de luz de iluminación lateral compactos.

Con respecto a la irradiancia y las distribuciones angulares de la luz extraída, detectamos que en la mayoría de los casos estas características son similares para los perfiles lineales y elípticos cuando empleamos valores altos de θ_1 como en la Figura 3.4 y Figura 3.5. La situación opuesta ocurre a valores bajos de θ_1 . Por ejemplo, en la Figura 3.6 para $\theta_1 = 10^\circ$ podemos observar cómo el perfil lineal distribuye la irradiancia de salida en un área de extracción más extensa, mientras que el perfil elíptico concentra la irradiancia en una zona de extracción inferior. Estos resultados se pueden utilizar para iluminar una superficie extendida o enfocar lateralmente la luz en un área reducida en los casos en que el objetivo a iluminar está cerca del TGL.

Además, parece interesante discutir acerca de la excentricidad, es evidente la relación por excentricidad entre la recta y la elipse. Por un lado, recordemos que la excentricidad para una elipse en el origen sin rotación está dada por $E = \sqrt{a^2 - b^2}/a$ en el caso que nuestro eje b sea muy grande, nuestro resultado es una línea recta como ranura. Ahora, si rotamos nuestra

elipse y encontramos la excentricidad podríamos expresarla en términos de magnitudes físicas, esto se vuelve interesante pero limitado por constantes físicas y queda fuera de nuestro objetivo de diseño, este sería un trabajo a futuro que podría expresar en otros términos el área de extracción con la excentricidad y nos permitiría conocer con mayor detalle nuestro problema.

Cabe señalar que se presentan resultados para una ranura y solo se presentaron resultados para los rayos extraídos por la cara lateral, no se presentan resultados para los rayos que no son extraídos porque esto representa un problema adicional. Los rayos que no son extraídos, siguen propagándose, salen por la ranura y dependiendo del diseño de la otra cara de la ranura los rayos pueden seguir propagándose o no. Además, en el caso de que la ranura no cubra por completo la altura del TGL existirán rayos que se sigan propagando por él sin ser modificados. Estos rayos propagados dentro del TGL representan una oportunidad para continuar con el diseño y precisamente la siguiente sección trata acerca de ello. Estos rayos son aprovechados para ser extraídos posteriormente por otra ranura, esto representa una oportunidad futura para otro trabajo, si deseamos cumplir con una necesidad, podríamos diseñar un TGL con diversas ranuras para cumplir con un objetivo. En el siguiente capítulo se muestra el efecto de colocar diversas ranuras, pero al no tener un objetivo solo se muestra una posible aplicación de este trabajo, esperando que en un futuro, se realice un estudio para las ranuras posteriores.

CAPÍTULO 4

Aplicaciones del formalismo teórico propuesto

4.1. Múltiples ranuras

El formalismo matemático de las ranuras propuestas permite el diseño de tubos de luz con diferentes configuraciones, una aplicación de este modelo es colocar diversas ranuras separadas una distancia l , teniendo la certeza de que cada ranura diseñada tendrá una longitud de extracción calculada desde el formalismo matemático.

Un diseño propuesto para mostrar el uso de este formalismo se presenta a continuación.

En este ejemplo, cada ranura tiene un ancho de 1mm y está colocada a una distancia de l entre sí medida desde las proyecciones de las ranuras en el eje z . La distancia se calculó utilizando los criterios de Cheng et al. [19] que es válido para la primera ranura. Las ranuras adicionales se colocaron a la misma distancia, que se calcula como:

$$l = \frac{3h}{2\sqrt{2}} \quad (4.1)$$

Este modelo puede verse en la figura 4.1.

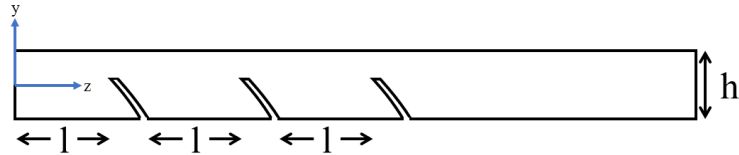


Figura 4.1: Se usaron diez ranuras idénticas colocadas a una distancia de l cada una en el tubo de luz de extracción lateral. El resto de las ranuras no se muestran.

Una vez definida la fuente y el material del tubo de luz se consulta la Figura 3.2, en este caso fue presentada para este material, para posteriormente converger a una gráfica como la presentada en Figura 3.3, esto nos da un mapa completo de las longitudes de extracción posibles para nuestro tubo de luz. Si seleccionamos una longitud específica, en este caso 16.38 mm, las ecuaciones de la elipse ya pueden tener solución y obtenemos un caso específico.

El tubo de luz utilizado fue de PMMA y el material circundante fue aire, las propiedades físicas del sistema determinaron la elipse; la apertura de la fuente es la que determina los rayos marginales para ubicar la primera ranura y h define el espacio entre ranuras. En este caso, se utilizó una elipse con semieje mayor $a = 18.03$ mm y el semieje menor $b = 1.18$ mm.

En este trabajo se muestra cómo funcionan 10 ranuras de manera simultánea, cada una diseñada para extraer 15×25.4 mm en la cara lateral. La fuente es una matriz de 4 LED colocados simétricamente en la cara frontal, cada LED tiene una potencia de 1 W. Cada ranura se establece a una distancia de $l = 13.47$ mm, y las dimensiones de cada una se muestran en la Fig. 4.2. La longitud del tubo de luz es $L = 400$ mm y la altura es $h = 25.4$ mm, los detectores de la misma longitud se colocaron en la cara lateral $D1$ y $D2$ a una distancia de 30 mm desde la cara lateral como se muestra en la Fig. 4.3.

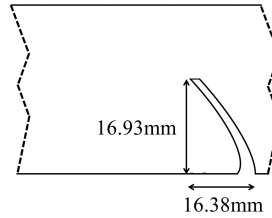


Figura 4.2: Dimensión de cada ranura. Esta ranura está diseñada para extender la fuente a la dimensión de 15 mm en el eje z y 25.4 mm en el eje x , que cubren toda la altura del tubo de luz.

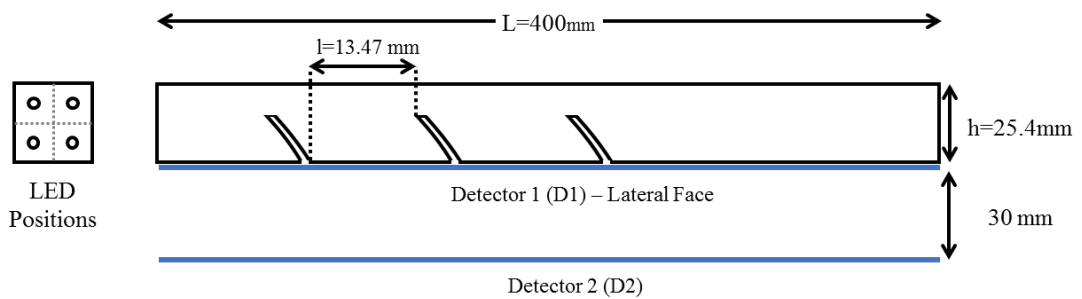


Figura 4.3: Dimensiones del tubo de luz. El tubo de luz tiene 10 ranuras dispuestas simétricamente. Cada surco está diseñado para extraer luz en un área de $15 \times 25.4\text{ mm}$ en la cara lateral.

Los resultados de la simulación en Zemax[®] se muestran en la Fig. 4.4 y 4.5. Estas figuras muestran los picos de la columna central y el color verdadero de los detectores iluminados 1 y 2. Los picos que se muestran en el gráfico son de la columna central en D1 y D2. Como puede verse en el detector 1 de color verdadero, la iluminación de cada ranura es similar, cada uno separado uniformemente. El detector 2 muestra franjas en la distancia, pero no puntos densos visibles.

Como se ve en la Fig 4.4 y 4.5, cada área de ranura es uniforme, el ancho de cada ranura en la cara lateral está delimitado, en el futuro, esto se combinará con otros métodos de extracción para mejorar partes definidas del tubo de luz. Utilizando el método de extracción en cada ranura se puede controlar el ancho de cada pico, pero en la fabricación es necesario con-

siderar otras variables porque la ranura puede romper el tubo de luz si es lo suficientemente profunda. Además, el ancho de los picos puede cambiar debido a los medios circundantes en la experimentación. Por último, la luz no extraída por las ranuras se propaga dentro del tubo de luz, este es el uso principal de la ranura de reflexión interna total propuesta, el uso adicional de la luz, en luminarias híbridas la luz restante se puede usar para regular la intensidad de la luz artificial del sistema.

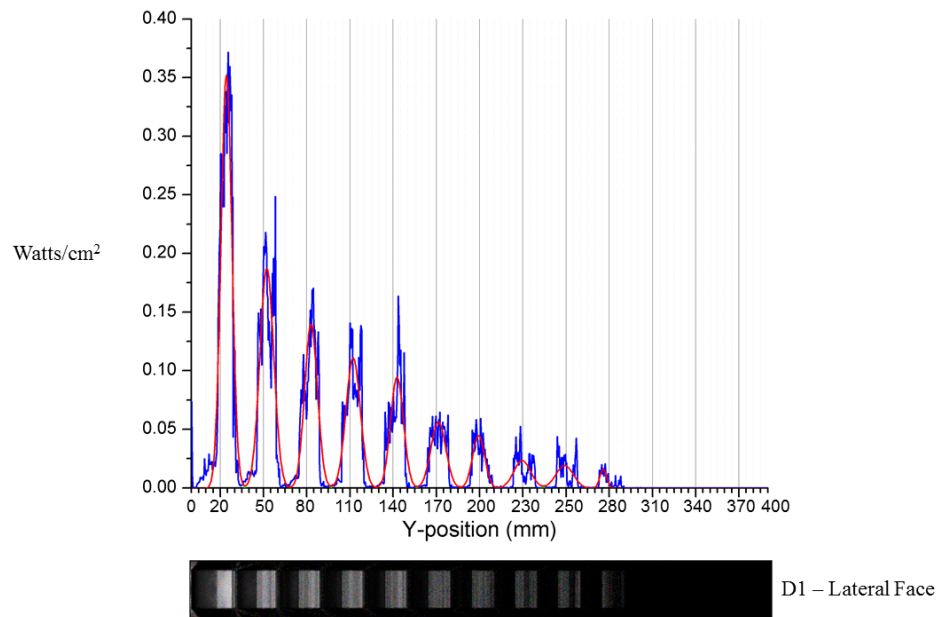


Figura 4.4: El gráfico representa la línea central de D1, esta línea muestra la iluminación de cada ranura. Esta imagen muestra el color de la iluminación. Cada ranura se puede colocar en cualquier posición superior a 1 para mejorar la iluminación en una zona, por ejemplo, se puede usar para elementos en una vitrina que necesitan atención.

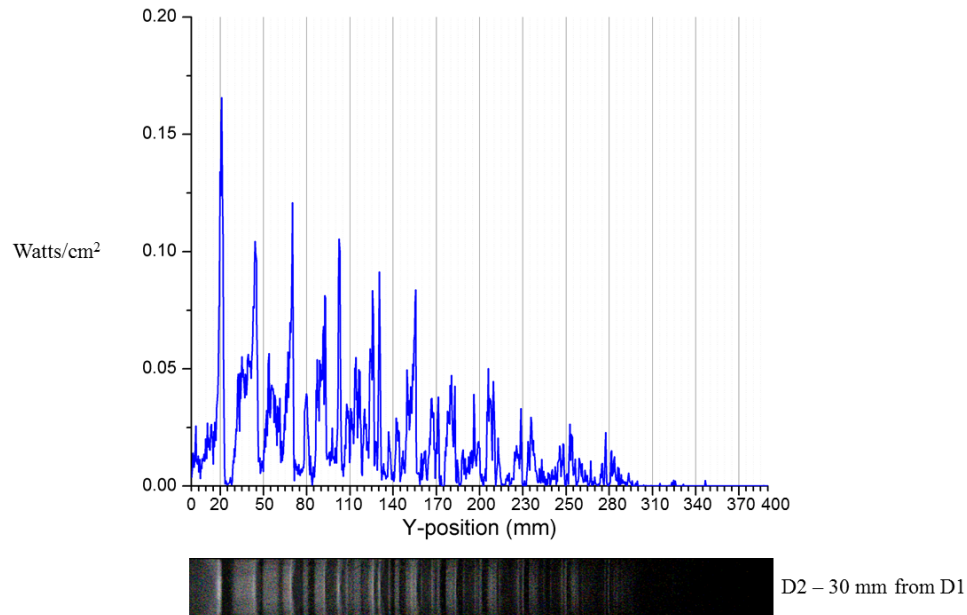


Figura 4.5: El gráfico representa la línea central de D2, esta línea muestra la iluminación de cada ranura. D2 es la iluminación de cada ranura a una distancia de 30 mm de la cara lateral.

En la tabla 4.1, se presenta la posición central del pico de cada pico de D1. Como era de esperar, la distancia media de cada pico es 29 mm.

Tabla 4.1: Cada pico se encuentra a una distancia media de 29 mm medidos de pico a pico. Esta distancia es la suma de l y h

Pico	Posición en el eje y (mm)	Max Val ($watt/cm^2$)
1	24	0.35
2	52	0.19
3	82	0.14
4	112	0.11
5	142	0.09
6	171	0.05
7	199	0.04
8	229	0.02
9	258	0.02
10	285	0.01

Como estaba previsto, cada ranura extrae una porción de la luz y esta porción disminuye

en cada surco, este problema se puede solucionar si cambiamos la profundidad de la interfaz, reduciendo el área de extracción para que coincida con el pico, esto puede ayudar a producir luz uniforme en la cara lateral del tubo de luz. Estos resultados ayudarán en el diseño posterior de un tubo de luz que pueda usar simultáneamente otras fuentes con diferentes aperturas.

4.2. Diseño híbrido

Como se puede observar en el ejemplo mostrado 4.3, las 4 fuentes de LED idénticas fueron colocadas de manera simétrica. Sin embargo, a partir del formalismo matemático mostrado, se pueden colocar fuentes diversas con aperturas distintas en la cara de entrada. Aunque la realidad de un diseño híbrido depende de las fuentes disponibles y el objetivo de la iluminación, por ejemplo.

- Las fuentes de luz disponibles.

- LED

- Luz natural guiada a través de fibra óptica.

- Otras que necesitan arreglos ópticos para su acoplamiento al tubo de luz.

- El objetivo de la iluminación.

- Iluminación de oficinas o laboratorios

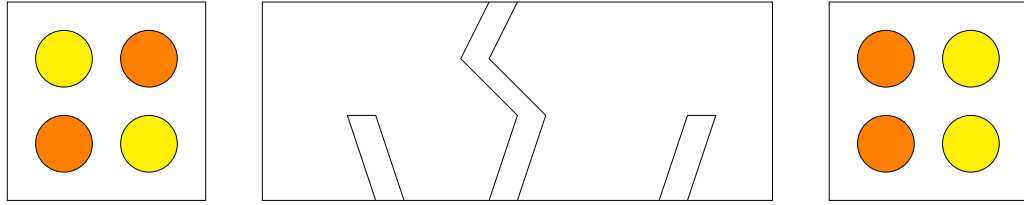
- Iluminación de vitrinas de exhibición.

- Otros tipos de iluminación como bodegas de refrigeración.

Las fuentes de luz disponibles se pueden diseñar para acoplarse al tubo de luz de diversas maneras.

1. Colocar en la entrada fuentes de diversas aperturas.
2. Colocar en la entrada y salida fuentes
 - Cambiando la dirección de la ranura
3. Combinar 1 y 2 de manera simultánea.

Lo anterior se puede observar en 4.6. En esta figura, las fuentes pueden ser colocadas a la entrada y salida, cuyo arreglo puede ser simétrico. El formalismo matemático permite el diseño de nuevas ranuras para tener un control del área de salida que sea dependiente de la fuente, de esta manera los objetivos de iluminación pueden cumplirse de acuerdo a las necesidades de iluminación. Crear un diseño específico para una aplicación va más allá de los objetivos de este trabajo, por lo que se muestran las ideas a futuro del mismo.



LED/Solar por fibra óptica. Entrada

LED/Solar por fibra óptica. Salida

Figura 4.6: Concepto de una luminaria híbrida en la que las fuentes se colocan en cualquier cara de entrada del tubo de luz en diferentes configuraciones. Las fuentes pueden ser combinaciones entre LED o luz solar guiada por fibra óptica. El formalismo matemático permite el diseño de las ranuras para tener una extracción controlada de luz en configuraciones complejas.

CAPÍTULO 5

Conclusiones Generales

5.1. Conclusiones

A continuación presentamos las conclusiones de este trabajo que son de interés para el desarrollo de nuevos sistemas de tubos de luz de iluminación basados en ranuras para extraer lateralmente la luz de una manera personalizada y eficiente para diferentes aplicaciones de iluminación.

1. Presentamos una gráfica de contorno a partir de un modelo teórico en la Figura 3.3a, que nos brinda un panorama general de la extracción de luz para un tubo de luz específico. A partir de este panorama general, podemos repetir el procedimiento para diversos materiales y poder predecir el comportamiento de las ranuras incluso antes de tener un diseño o un estudio numérico. Este es el resultado principal de este trabajo, ya que tenemos un mapa general del comportamiento de la luz con diversas ranuras y diversas fuentes, esto permite ya sea seleccionar la fuente o predecir la extracción posible por nuestro sistema. Esto es de gran utilidad ya que disminuirá mucho tiempo de evaluación numérica para nuestro sistema.
2. Los resultados numéricos presentados empatan con los resultados teóricos mostrados. Esto se mostró en la Figura 3.4, debido a que el diseño a partir del modelo teórico es el esperado en el numérico.
3. En el caso del perfil elíptico, este muestra una mayor uniformidad en el espacio angular como se mostró en la Figura 3.5. Esto hace que el perfil elíptico sea un mejor candidato para aplicaciones en las que requieran uniformidad angular.
4. Además, los resultados muestran un alto impacto del semi ángulo de apertura de la fuente θ_1 y el ángulo de inclinación θ_s en las medidas de la longitud de extracción L_{ext} , la eficiencia de extracción de luz y la irradiancia y las distribuciones obtenidas con ambos perfiles.
5. La extracción de luz es considerablemente más alta para el perfil lineal que para elíptico en ángulos de θ_1 .

6. El formalismo analítico propuesto empleado para calcular la longitud de extracción L_{ext} para los perfiles lineales y elípticos concuerda con la simulación numérica y proporciona un mapa de contorno como una herramienta poderosa para ayudar en el diseño de primer orden de los perfiles lineales y elípticos.
7. Hemos encontrado que en algunos diseños, el perfil elíptico puede producir una mayor eficiencia de extracción de luz y con rangos angulares más amplios que los obtenidos con el perfil de ranura lineal, mientras que en otros diseños el perfil lineal puede producir una mayor uniformidad de distribución de irradiancia en comparación con este obtenido con el perfil elíptico.
8. Mostramos una aplicación para diversas ranuras, lo cual abre la posibilidad de trabajos futuros. Esta aplicación, aunque breve, nos permite ver el panorama en aplicaciones, además, gracias al diseño original en un TGL cuadrado, nos permite que usemos diversas fuentes.

Bibliografía

- [1] Winston, R. [Roland], Miñano, J. C. & Benítez, P. (2005). NONIMAGING OPTICAL SYSTEMS AND THEIR USES. En *Nonimaging Optics* (pp. 1-6). Elsevier. doi:10.1016/B978-012759751-5/50001-4
- [2] Winston, R. [Roland.], Miñano, J. C. & Benítez, P. (2005). *Nonimaging Optics*. Electronics & Electrical. Elsevier Academic Press. Recuperado desde <http://books.google.com.mx/books?id=MliJHWwTnVQC>
- [3] Canavesi, C., Cassarly, W. J., Foster, T. H. & Rolland, J. P. (2011). Lightpipe device for delivery of uniform illumination for photodynamic therapy of the oral cavity. *Applied optics*, 50(16), 2322-5. doi:10.1364/AO.50.002322
- [4] Feng, D., Yan, Y., Yang, X., Jin, G. & Fan, S. (2005). Novel integrated light-guide plates for liquid crystal display backlight. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7(3), 111-117. doi:10.1088/1464-4258/7/3/003
- [5] Lee, J.-H., Lee, H.-S., Lee, B.-K., Choi, W.-S., Choi, H.-Y. & Yoon, J.-B. (2007). Simple liquid crystal display backlight unit comprising only a single-sheet micropatterned polydimethylsiloxane (PDMS) light-guide plate. *Optics letters*, 32(18), 2665-7. doi:10.1364/OL.32.002665
- [6] Tekelioglu, M. & Wood, B. D. (2009). Solar light transmission of polymer optical fibers. *Solar Energy*, 83(11), 2039-2049. doi:10.1016/j.solener.2009.08.002
- [7] Chen, M. M., Berkowitz-Mattuck, J. B. & Glaser, P. E. (1963). The Use of a Kaleidoscope to Obtain Uniform Flux Over a Large Area in a Solar or Arc Imaging Furnace. *Applied Optics*, 2(3), 265. doi:10.1364/AO.2.000265
- [8] Fournier, F., Cassarly, W. J. & Rolland, J. P. (2008). Method to improve spatial uniformity with lightpipes. *Optics Letters*, 33(11), 1165. doi:10.1364/OL.33.001165
- [9] Werner, J. S. & Scheffrin, B. E. (2000). *Optics and Vision of the Aging Eye*. doi:10.1036/0071414789. arXiv: arXiv:1011.1669v3
- [10] Schwiegerling, J. (2004). *Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics*. Field Guide Series. 1000 20th Street, Bellingham, WA 98227-0010 USA: SPIE. doi:10.1117/3.592975
- [11] Koshel, R. J. (2013). *Illumination Engineering* (R. J. Koshel, Ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118462539
- [12] Bass, M., Enoch, J. M., Wolfe, W. L. & Van Stryland, E. W. (2000). *Handbook of Optics: Classical optics, vision optics, X-ray optics*. Handbook of Optics. McGraw-Hill. Recuperado desde <http://books.google.es/books?id=PAk6AQAIAAJ%20http://scholar.google.com/scholar?hl=en%7B%5C&%7DbtnG=Search%7B%5C&%7Dq=>

- intitle:Handbook+of+Optics:+Volume+III;+Classical+Optics,+Vision+Optics,+X-Ray+Optics%7B%5C#%7D0
- [13] Chen, C.-H., Chen, C.-C. & Liang, W.-C. (2007). Light Pipe Line Beam Shaper. *Optical Review*, 14(4), 231-235. doi:10.1007/s10043-007-0231-x
- [14] Arnaoutakis, G. E., Marques-Hueso, J., Mallick, T. K. & Richards, B. S. (2013). Coupling of sunlight into optical fibres and spectral dependence for solar energy applications. *Solar Energy*, 93, 235-243. doi:10.1016/j.solener.2013.04.008
- [15] Hough, T. A. (2004). Analytical model of flux propagation in light-pipe systems. *Optical Engineering*, 43(7), 1503. doi:10.1117/1.1753272
- [16] Teijido, J. M. [Juan M.], Herzig, H. P., Daendliker, R. & Grupp, J. (1996). Illumination light pipe using micro-optics as diffuser. En G. J. Dausmann (Ed.), *Proceedings of SPIE* (pp. 146-155). doi:10.1117/12.262413
- [17] Deller, C. A. (2005). *LEDs and doped polymer light guides for efficient illumination and colour engineering* (Tesis doctoral, University of Technology Sydney). Recuperado desde <http://epress.lib.uts.edu.au/research/bitstream/handle/10453/20201/02Whole.pdf?sequence=9>
- [18] Teijido, J. M. [Juan. Manuel.], Herzig, H. P., Daendliker, R. & Grupp, J. (1996). Illumination light pipe using micro-optics as diffuser. En G. J. Dausmann (Ed.), *Proc. SPIE* (Vol. 2951, pp. 146-155). doi:10.1117/12.262413
- [19] Cheng, Y.-K., Wang, M.-H. & Chern, J.-L. (2007). Irradiance formations of on-axis Lambertian pointlike sources in polygonal total-internal-reflection straight light pipes. *Journal of the Optical Society of America A*, 24(9), 2748. doi:10.1364/JOSAA.24.002748
- [20] Kim, J. H. & Gandhi, J. (2012). Light guides and backlight systems incorporating prismatic structures and light redirectors. 1(12), 0–4. doi:10.1016/j.(73). arXiv: arXiv:1208.5721
- [21] Ren, J., Lin, P. I. & Yu, G. (2014). Light guide plate and backlight module utilizing ultraviolet light source. Google Patents. Recuperado desde <https://www.google.com/patents/US8680492>
- [22] Yoon, J. B., Lee, J. & Yeon, J. H. (2015). Light guide plate and backlight unit. Google Patents. Recuperado desde <https://www.google.com/patents/US9022635>
- [23] Cho, H. M., Park, J. B. & Cho, D. C. (2014). Backlight assembly, method of manufacturing the same and display apparatus having the same. Google Patents. Recuperado desde <https://www.google.ch/patents/US8845168>
- [24] Chiang, C.-w., Hsu, Y.-k. & Pan, J.-w. (2014). Design and demonstration of high efficiency anti-glare LED luminaires for indoor lighting. *Optics Express*, 23(3), A15. doi:10.1364/OE.23.000A15
- [25] Lee, X.-H., Moreno, I. & Sun, C.-C. (2013). High-performance LED street lighting using microlens arrays. *Optics Express*, 21(9), 10612-10621. doi:10.1364/OE.21.010612
- [26] Nair, M. G., Ramamurthy, K. & Ganesan, A. R. (2014). Classification of indoor daylight enhancement systems. *Lighting Research & Technology*, 46(3), 245-267. doi:10.1177/1477153513483299
- [27] Kischkoweit-Lopin, M. (2002). An overview of daylighting systems. *Solar Energy*, 73(2), 77-82. doi:10.1016/S0038-092X(02)00036-1

- [28] Ge, A. [Aiming.], Cai, J., Li, L., Wang, W. & Qiu, P. (2012). Panel-integration of natural light and the related system of light guiding and illumination. *Optics Letters*, 37(17), 3666. doi:10.1364/OL.37.003666
- [29] Rosemann, A. & Kaase, H. (2005). Lightpipe applications for daylighting systems. *Solar Energy*, 78(6), 772-780. doi:10.1016/j.solener.2004.09.002
- [30] Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Martínez-Guerra, E. & Ceballos-Herrera, D. E. (2017). Design of a segmented nonimaging Fresnel dome for nontracking solar collection. *Optical Engineering*. doi:10.1117/1.oe.56.7.075103
- [31] Greivenkamp, J. E. (2004). Modeling of automotive interior illumination systems. *Optical Engineering*, 43(7), 1537. doi:10.1117/1.1748235
- [32] Alisafae, H. & Brand, A. C. (2018). Design and prototyping of a freeform light-guide for automotive lighting. En R. B. Johnson, V. N. Mahajan & S. Thibault (Eds.), *Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIX* (p. 8). SPIE. doi:10.1117/12.2320703
- [33] Whang, A., Jhan, K., Chao, S., Chen, G., Chou, C., Lin, C., ... Lai, Y. (2015). An innovative vehicle headlamp design based on a high-efficiency LED light pipe system. *Lighting Research & Technology*, 47(2), 210-220. doi:10.1177/1477153513513785
- [34] Fujieda, I., Arizono, K., Nishida, K. & Takigawa, N. (2014). Backlight units based on light extraction from a curved optical fiber. *Optical Engineering*, 53(6), 065104. doi:10.1117/1.OE.53.6.065104
- [35] Okuda, Y. (2012). Laser backlight unit based on a leaky optical fiber. *Optical Engineering*, 51(7), 074001. doi:10.1117/1.OE.51.7.074001
- [36] Liu, H., Rudd, G., Daly, L., Hempstead, J., Liu, Y., Khan, A. P., ... Celli, J. P. (2016). Development of low-cost devices for image-guided photodynamic therapy treatment of oral cancer in global health settings. En D. H. Kessel & T. Hasan (Eds.) (p. 96940C). doi:10.1117/12.2212918
- [37] Lawless, S. & Gorthala, R. (2018). Design and Development of a Fiber-Optic Hybrid Day-Lighting System. *Journal of Solar Energy Engineering*, 140(2). doi:10.1115/1.4039024
- [38] Viera-González, P. M., Sánchez-Guerrero, G. E., Ceballos-Herrera, D. E. & Selvas-Aguilar, R. (2015). Design of a solar collector system formed by a Fresnel lens and a CEC coupled to plastic fibers. En *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XII*. doi:10.1117/12.2188222
- [39] Ge, A. [Aiming], Qiu, P., Cai, J., Wang, W. & Wang, J. (2014). Hybrid daylight/light-emitting diode illumination system for indoor lighting. *Applied Optics*, 53(9), 1869. doi:10.1364/AO.53.001869
- [40] Sánchez-Guerrero, G. (2014). *Análisis de cortes elípticos en tubos de luz para su extracción* (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León). Recuperado desde <http://eprints.uanl.mx/4551/>
- [41] Lumileds. (2018). Lumileds. Recuperado el 1 de enero de 2018, desde <https://www.lumileds.com/support/design-resources>

Biografía

Guillermo Ezequiel Sánchez Guerrero

Candidato para el grado de Doctorado en Ingeniería Física Industrial

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Tesis:

ESTUDIO TEÓRICO Y NUMÉRICO DE EXTRACCIÓN LATERAL DE
LUZ EN GUÍAS DE ONDA PARA APLICACIONES DE ILUMINACIÓN

Biografía: Nació el 12 de mayo de 1987, en Monterrey, Nuevo León, México. Inició sus estudios de licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León en el 2004 y sus estudios de Maestría en Ingeniería Física Industrial en el 2012. Es miembro de las sociedades internacionales International Society for Optics and Photonics (SPIE) y del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y las sociedades Computer Society, Education Society y Photonics Society por IEEE. Cuenta con certificaciones de competencia laboral en la innovación en la industria 4.0 con tecnologías Microsoft. Ha recibido distinciones como el premio UANL a la Invención por la Universidad Autónoma de Nuevo León en diversas ocasiones y la Optics and Photonics Education Scholarship en 2016 por el SPIE por su potencial contribución en el campo de la óptica, la fotónica o campos relacionados.

Productos

A continuación se muestran los productos derivados de esta tesis.

Optical Engineering

OpticalEngineering.SPIEDigitalLibrary.org

Analysis of light extraction in light pipes by linear and elliptical grooves using different source aperture angles

Guillermo E. Sánchez-Guerrero
Perla M. Viera-González
Edgar Martínez-Guerra
Daniel E. Ceballos-Herrera

SPIE.

Guillermo E. Sánchez-Guerrero, Perla M. Viera-González, Edgar Martínez-Guerra, Daniel E. Ceballos-Herrera, "Analysis of light extraction in light pipes by linear and elliptical grooves using different source aperture angles," *Opt. Eng.* **59**(3), 035107 (2020), doi: 10.1117/1.OE.59.3.035107



Certificado de acuse de
recibo registro(s):
MX/2018/076376

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCION DIVISIONAL DE EXAMEN DE FONDO DE PATENTES AREAS
MECANICA, ELECTRICA Y DE REGISTROS DE DISEÑOS INDUSTRIALES Y
MODELOS DE UTILIDAD
COORDINACION DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FONDO AREA
ELECTRICA
Expediente de Patente **MX/a/2015/003755**

Asunto: Procede el otorgamiento.

Ciudad de México, a 2 de abril de 2019.

Lorena Nohemí GONZÁLEZ PACHECO

No. Folio: **27573**

Apoderado de

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

Av. Pedro de Alba S/N, Torre de Rectoría, Piso 4

Col. Ciudad Universitaria

66455, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

REF: Su solicitud No. MX/a/2015/003755 de Patente presentada el 24 de marzo de 2015.

En relación con la solicitud arriba indicada, comunico a usted que una vez satisfecho lo dispuesto en los arts. 38, 50 y 52 de la Ley de la Propiedad Industrial (LPI), se ha efectuado el examen de fondo previsto por el artículo 53 de la citada Ley y se cumplen los requisitos establecidos por los artículos 16 y demás relativos de dicha Ley y su Reglamento, por lo que es procedente el otorgamiento de la Patente respectiva. En consecuencia, de acuerdo con el artículo 57 de la LPI, se le requiere para que efectúe el pago por la expedición del título y las anualidades correspondientes a este año calendario y las de los cuatro siguientes, efectuándose por quinquenios y por año calendario completo, pudiendo pagar dos o más quinquenios en forma anticipada, de conformidad con el tercero y cuarto párrafos del artículo segundo de las Disposiciones Generales de la tarifa vigente y exhiba el comprobante de pago correspondiente a fin de expedirle el Título de Patente.

Asimismo, deberá entregar una copia de la(s) figura no. 4 con medidas 7.0 x 11 cm., en caso de un solo dibujo ó de 11.0 x 14.0 cm., para dos o más dibujos, para efectos de publicación a que se refieren los Artículos 57 y 60 de la LPI, 46 de su Reglamento y 10 del Acuerdo que establece las reglas para la presentación de solicitudes ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Para cumplir lo anterior, se le concede un plazo de dos meses, contado a partir del día hábil siguiente a la fecha en que se le notifique el presente oficio en términos de lo dispuesto por el artículo 184 de la LPI, mismo que podrá extenderse por un plazo adicional de dos meses conforme lo señala el artículo 58 de la LPI, comprobando el pago del artículo 31 de la tarifa vigente por cada mes adicional, apercibido que de no hacerlo dentro del plazo inicial o adicional antes precisados, su solicitud se considerará abandonada.

La suscrita autoridad firma el presente oficio con fundamento en los artículos 6º fracciones III y XI y 7º bis 2 de la Ley de la Propiedad Industrial; artículos 1º, 3º fracción V inciso a) sub inciso iii) segundo guión, 4º y 12º



MX/2019/27573



fracciones I, II, III, IV y VI del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1º, 3º, 5º fracción V inciso a) sub inciso iii) segundo guión, 16 fracciones I, II, III, IV y VI y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; 1º, 3º y 5º incisos d), e) e i) y penúltimo párrafo del Acuerdo que delega facultades en los Directores Generales Adjuntos, Coordinador, Directores Divisionales, Titulares de las Oficinas Regionales, Subdirectores Divisionales, Coordinadores Departamentales y otros subalternos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Asimismo, el presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento; y 1º fracción III; 2º fracción V; 26 fracción I; 26 BIS y 26 TER del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, en los trámites que se indican.

ATENTAMENTE
COORDINADORA DEPARTAMENTAL DE EXAMEN
DE FONDO ÁREA ELÉCTRICA
MARINA OLIMPIA CASTRO ALVEAR
MOCA/OHC/2019



Cadena Original

MARINA OLIMPIA CASTRO ALVEAR|00001000000408912028|Servicio de
Administración Tributaria|1300|ELE|MX/2019/27573|MX/a/2015/003755|Cita a pago
LPI|173|OHC|Pág(s) 2|ERvkzxYVS+/N7+DjYYIsvqHq9hg=

Sello Digital

HJINW/TvMn4I9Z6hwrnVfTLFrKdtyD/OJgDvSNXSVKHtw2cC//KC5Q1sckf
7uk0q5p/M3X7hiWby6vJdfYRHpDo+RFBUt6fi7DLut/B+1A9otHjz1m7tV9Q
qcC0akli0vBsUaOIKV9178PmDuDRxl0n5PP8TBmr5vZ5QRyg0DcwrjVaEMYJ
mofp/cPE/ytx9PMXiDPB+gBO8ptkQOPJXBoFCPYnoZPXHUhu7myTY5xi+c+d
NGVxS4avtXk/F4meQ9r5TM8jVFNfMthQCwrww8Q7O96CFX27sZyxL2LTxRQm
fJO/ABRw4KiWyQ7o5BmRlh0LvMct8geOIH0lpiGuTA==

Para verificar la autenticidad del presente documento, podrá ingresar a la página electrónica <https://validadocumento.impi.gob.mx/>, escaneando el código QR que aparece a un costado de la FIEL (Firma Electrónica Avanzada) del Servidor Público que signó el mismo, indicando, en su caso, el tipo de documento que pretende validar (solicitud, acuse, oficio o promoción); lo anterior con fundamento en lo dispuesto por los artículos 1º fracción III, 2º fracciones II y V, 25, 26 BIS y 26 TER del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, en los trámites que se indican; en caso de no contar con lector QR o en su defecto el Código no pueda ser leído por su dispositivo, puede digitar en la página antes referida el siguiente Código: uqhy8shOm6dz0qrPw9RWUp7Yc+A=



INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL
Dirección Divisonal de Patentes

OFICINA REGIONAL DEL NORTE

Solicitud Expediente: **MX/a/2015/003755**
Fecha: **24/MAR/2015** Hora: **14:54:59**
Folio: **MX/E/2015/020727** 264269



- Solicitud de Patente
 Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad
- Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál:
 Modelo Industrial Dibujo Industrial

Uso exclusivo del IMPI

No. de expediente

No. de folio de entrada

Fecha y hora de presentación

Antes de llenar la forma lea las consideraciones generales al reverso

I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)

El solicitante es el inventor El solicitante es el causahabiente

- 1) Nombre (s): **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.**
2) Nacionalidad (es): **MEXICANA.**
3) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: **AV. PEDRO DE ALBA S/N, TORRE DE RECTORÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA, C.P. 66455.**
Población, Estado y País: **SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO.**
4) Teléfono (clave): 5) Fax (clave):

II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)

- 6) Nombre (s): **A) GUILLERMO EZEQUIEL SÁNCHEZ GUERRERO. B) PERLA MARLENE VIERA GONZÁLEZ. C) DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA. D) ROMEO DE JESÚS SELVAS AGUILAR**
7) Nacionalidad (es): **A) MEXICANA. B) MEXICANA. C) MEXICANA. D) MEXICANA.**
8) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: **A) EL PUERTO NO.3312, COL. RIBERAS DEL RÍO, C.P. 67160. B) ROSA NO.1405A, COL. MODERNA, C.P.64530. C) VICTORIA CONDESA, NO.611C, COL. CENTRIKA VICTORIA, C.P. 64520. D) ALAMILLO NO.320, COL. DEL PRADO, C.P. 64410.**
Población, Estado y País: **A) GUADALUPE, NUEVO LEÓN, MÉXICO. B) MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO. C) MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO. D) MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO.**
9) Teléfono (clave): 10) Fax (clave):

III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO (S)

- 11) Nombre (s): **DR. RICARDO ALBERTO GÓMEZ FLORES.** 12) R G P: **RGPD-DAJ-22354.**
13) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: **AV. LÁZARO CÁRDENAS NO. 4600 OTE. ENTRE PRAGA Y TRIESTE, CENTRO DE INCUBACIÓN DE EMPRESAS Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA (CIETT), UNIDAD MEDEROS, C.P. 64930.**
Población, Estado y País: **MONTERREY, NUEVO LEÓN, MÉXICO.** 14) Teléfono (clave): **(81) 83294282.**
15) Fax (clave):
16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones: **LBG. ANGELA GABRIELA CARRILLO RODRÍGUEZ, LBG. FERNANDO FIGUEROA GARCÍA, LBG. LUIS FERNANDO LEAL FLORES, ING. ADRIÁN GERARDO MARROQUÍN ORTEGA.**

17) Denominación o Título de la Invención:

SECCIONAMIENTO TRANSVERSAL PARA EXTRACCIÓN DE LUZ DE UNA GUÍA DE ONDA.

18) Fecha de divulgación previa

16 | 06 | 2014
Día Mes Año

19) Clasificación Internacional

uso exclusivo del IMPI

20) Divisonal de la solicitud

21) Fecha de presentación

Número Figura jurídica Día Mes Año

22) Prioridad Reclamada:

País Fecha de presentación No. de serie
Día Mes Año

Lista de verificación (uso interno)

No. Hojas		No. Hojas	
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Comprobante de pago de la tarifa	<input checked="" type="checkbox"/> 3	Documento de cesión de derechos
<input checked="" type="checkbox"/> 7	Descripción y reivindicación (es) de la invención	<input checked="" type="checkbox"/> 1	Constancia de depósito de material biológico
<input checked="" type="checkbox"/> 3	Dibujo (s) en su caso	<input checked="" type="checkbox"/> 2	Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Resumen de la descripción de la invención	<input checked="" type="checkbox"/> 1	Documento (s) de prioridad
<input checked="" type="checkbox"/> 1	Documento que acredita la personalidad del apoderado	<input checked="" type="checkbox"/> 1	Traducción
		<input checked="" type="checkbox"/> 18	TOTAL DE HOJAS

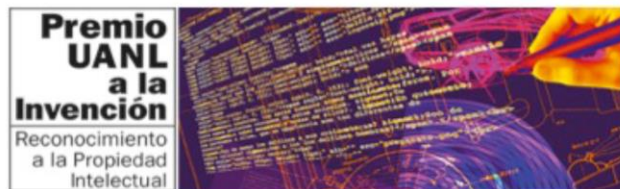
Observaciones:

Bajo protesta de decir verdad, manifiesto que los datos asentados en esta solicitud son ciertos.

Anexo hoja de descuento

DR. RICARDO ALBERTO GÓMEZ FLORES
Nombre y firma del solicitante o su apoderado

MONTERREY, N. L.
A 20 DE MARZO DE 2015
Lugar y fecha



GANADORES

Premio UANL a la Invención :
Reconocimiento a la Propiedad Intelectual 2014

No.	Categorías			Folio	Solicitud de Registro IMPI	Título del Proyecto	Título	Nombre (s)	Primer Apellido	Segundo Apellido	Dependencia	Tipo de Autor
	Diseño Industrial	Modelo de Utilidad	Patente									
1	4			94	MX/f/2015/001051	Modelo industrial de módulo de pared de escalada	Dra. Nahielly Alejandra	Marín	González	Facultad de Arquitectura	Investigador	
				94	MX/f/2015/001052	Modelo industrial de módulo de pared de escalada	LDI. Edhith Alejandra	Flores	Livas	Facultad de Arquitectura	Estudiante	
				94	MX/f/2015/001053	Modelo industrial de módulo de pared de escalada	LDI. Edhith Alejandra	Flores	Livas	Facultad de Arquitectura	Estudiante	
				94	MX/f/2015/001054	Modelo industrial de módulo de pared de escalada	Dra. Nahielly Alejandra	Marín	González	Facultad de Arquitectura	Investigador	
				94	MX/f/2015/001054	Modelo industrial de módulo de pared de escalada	LDI. Edhith Alejandra	Flores	Livas	Facultad de Arquitectura	Estudiante	
2			1	95	MX/a/2014/016099	Implante de células madre mesenquimales autólogas transducidas con IGF1 en una matriz colágeno/alginato para regeneración de cartilago articular.	D.Sc. Augusto	Rojas	Martínez	Facultad de Medicina	Investigador	
							Ph.D. Lizeth Alicia	Fuentes	Mera	Facultad de Medicina	Docente	
							D.Sc. Iván Alberto	Marino	Martínez	Facultad de Medicina	Docente	
							Ph.D. Jorge	Lara	Arias	Facultad de Medicina	Investigador	
3			1	96	MX/a/2014/012486	Relevador de protección de distancia con estimador fasorial de Prony	Dr. Luis Alonso	Trujillo	Guajardo	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Investigador	
							Dr. Arturo	Conde	Enríquez	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Investigador	
4			1	140	MX/a/2015/003755	Seccionamiento trasversal para extracción de luz de una guía de onda.	Dr. Guillermo Ezequiel	Sánchez	Guerrero	Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas	Estudiante	
							Dr. Daniel Enrique	Ceballos	Herrera	Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas	Investigador	
							Dr. Romeo de Jesús	Selvas	Aguilar	Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas	Investigador	
							MC. Perla Marlene	Viera	González	Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas	Estudiante	
5			1	148	MX/a/2014/016129	Proceso de obtención de nanopartículas ultrafinas de akaganeita, proceso de formulación de un agente terapéutico sobre las mismas y su uso localizando con campos magnéticos.	Dr. Carlos	Luna	Criado	Facultad de Ciencias Físico Matemáticas	Investigador	
							Dr. Raquel	Mendoza	Reséndez	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Investigador	
6			1	149	MX/a/2014/014098	Uso de nanopartículas metálicas, organometálicas y dendritas metálicas obtenidas a través de jalea real, como bactericidas.	Dr. Raquel	Mendoza	Reséndez	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Investigador	
							Dr. Carlos	Luna	Criado	Facultad de Ciencias Físico Matemáticas	Investigador	
							Dr. Jesús Alberto	Gómez	Treviño	Facultad de Ciencias Químicas	Investigador	
7			1	159	MX/a/2014/016133	Método de obtención de nano y microestructuras metálicas a base de azucares de la familia agavaceae, sus Productos obtenidos y usos.	Dr. Raquel	Mendoza	Reséndez	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Investigador	
							Dr. Carlos	Luna	Criado	Facultad de Ciencias Físico Matemáticas	Investigador	
							Dr. Jesús Alberto	Gómez	Treviño	Facultad de Ciencias Químicas	Investigador	
8			1	217	MX/a/2015/003353	Proceso termoquímico para la purificación de carbonato de calcio, óxido de calcio e hidróxido de calcio a partir de biomasa.	Dr. Jesús Alejandro	Salinas	Montelongo	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Estudiante	
							Dr. Leonardo	Chávez	Guerrero	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica	Investigador	

SECCIONAMIENTO TRANSVERSAL PARA EXTRACCIÓN DE LUZ DE UNA GUÍA DE ONDA

DESCRIPCIÓN

5

OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención se relaciona con los procesos de extracción de luz de una guía de onda, como una fibra óptica, específicamente a un seccionamiento transversal con acabado liso capaz de controlar y mejorar la calidad de la iluminación extraída de luminarias plásticas transparentes, tales como tubos de luz de acrílico o fibras ópticas plásticas, para resaltar el área y los objetos iluminados, todo ello basado en un diseño eficiente y con forma determinada implementado a lo largo de las fibras ópticas o de los tubos de luz.

15

ANTECEDENTES

Se conocen en el estado de la técnica antecedentes a la invención tales como el documento de patente de **US 7330632 B1** que presenta una luminaria de fibra óptica con patrones para la dispersión y extracción lateral de luz, la cual comprende un tubo de luz con una sección de emisión lateral. Dicha sección ilumina un área objetivo por medio de un patrón para extracción de luz por dispersión y un patrón de extracción especular. La patente citada presenta patrones de extracción dispuestos para extraer la luz por medio de emisión lateral en un ángulo radial, ortogonal al eje principal de los patrones, de menos de 180°.

Al aplicar los patrones descritos, se obtienen, en el área de destino, mediciones mayores al 50% de la luz de la fuente por medio de los patrones de dispersión y, a través de los patrones especulares, se alcanza, en una sección específica del área de destino, una iluminancia mayor al 5% de la máxima producida en el área de destino por los patrones de dispersión. Además, el patrón de extracción por dispersión comprende un patrón de extracción de tipo Lambertiano, mientras que el patrón de extracción especular está conformado por cortes con caras principales paralelas que definen un ángulo de 10° con respecto al eje longitudinal. En la presente invención se tiene, en contraste, un patrón especular cuya extracción es, si se aplicase en el mismo tubo de luz, dirigida a la periferia opuesta. A su vez, el patrón especular corresponde a una forma determinada que sigue la curvatura de una elipse.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

- 15 La **Figura 1** ilustra una vista lateral de la guía de onda de geometría cuadrada con la implementación del corte transversal para el método de la presente invención.
- La **Figura 2** ilustra una vista isométrica de la guía de onda de geometría cuadrada con la implementación del corte transversal por el método de la presente invención.
- 20 La **Figura 3** ilustra la guía de onda vista de frente y muestra como el ángulo α es propagada sobre el área objetivo.

La **Figura 4** ilustra el funcionamiento del seccionamiento transversal al hacer incidir luz desde una fuente definida por un ángulo de incidencia θ a una guía de onda.

5 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN

Se describe un seccionamiento transversal para extracción de luz de una guía de onda de polímero transparente, que comprende un corte con acabado liso de la sección transversal desde un punto inferior en periferia hasta un punto de profundidad definido, siguiendo el camino de una elipse trazada determinada por un rayo marginal dirigido a la profundidad y un rayo dirigido al punto inferior en la periferia, los cuales están separados por una línea determinada por el ángulo crítico que se define a partir del ángulo de emisión de la fuente y el material de la guía de onda; la distancia focal de la elipse es definida por la distancia entre el inicio del primer rayo marginal y el punto en la periferia determinado anteriormente.

En la **figura 1** se ilustra una guía de onda de geometría cuadrada con la implementación del corte transversal para el método de la presente invención. La fuente de luz **(1)** definida por un ángulo de emisión θ **(6)** ilumina la guía de onda transparente **(2)** y la luz es extraída por el seccionamiento transversal **(3)** propuesto, en cual debe tener un acabo liso. Algunos rayos de luz representados en **(5)** son extraídos de la guía de onda **(2)** e ilumina el área objetivo **(4)**.

La **figura 2** ilustra una guía de onda de geometría cuadrada **(2)** con la implementación del corte transversal por el método de la presente invención. La

fuente de luz **(1)** definida por un ángulo de emisión θ **(6)** define el ángulo máximo posible de salida α **(10)**. El área objetivo **(4)** es iluminada por los rayos de luz representados en **(5)**.

La **figura 3** ilustra la guía de onda vista de frente **(2)** y muestra como el ángulo α **(10)** es propagado sobre el área objetivo **(4)**.

La **figura 4** ilustra el funcionamiento del seccionamiento transversal al hacer incidir luz desde una fuente **(1)** definida por un ángulo de incidencia θ **(6)** a una guía de onda **(2)**. El ángulo ρ **(8)** queda definido por el ángulo de incidencia θ **(6)**. Los rayos de luz marginales internos **(7)** que son guiados hasta el seccionamiento transversal **(3)**, como se puede observar, son reflejados y se convierten en los rayos de luz extraídos **(5)** que se dirigen a un área objetivo **(4)**. Los rayos de luz incidentes que no son reflejados por el seccionamiento transversal **(3)**, son rayos que siguen guiados **(9)** por la guía de onda **(2)**.

15 **EJEMPLO1. APLICACIÓN DE LA INVENCIÓN.**

Se considera una fuente de luz direccionada, como LED, solar concentrada, fluorescente concentrada o similares, donde por concentrada se hace referencia a una fuente omnidireccional, que mediante elementos ópticos, modifica la dirección de propagación de la luz a un objetivo determinado, disminuyendo la omnidireccionalidad. Dicha fuente ilumina una cara de una guía de onda, como lo fuere fibra óptica, una fibra óptica de emisión lateral, o un tubo de luz el cual tiene en su longitud un seccionamiento transversal elipsoidal, que dependiendo de las dimensiones transversales se diseña para obtener una extracción óptima. Por

ejemplo, en el caso de tener una fuente de luz con un ángulo de emisión definido de 42° , una profundidad definida de 1.27 centímetros desde la periferia de una guía de onda y una guía de onda de acrílico de 2.54 centímetros de diámetro o geometrías inscritas en un círculo de 2.54 centímetros, las dimensiones de la

5 elipse se definen, en el eje mayor 6.6 centímetros, en el eje menor 1.4 centímetros, con una inclinación de 22° con respecto a la periferia de la guía de onda, llevando el corte elipsoidal hasta la profundidad definida de la fibra óptica, fibra óptica de emisión lateral o tubo de luz.

REIVINDICACIONES

Habiendo descrito suficiente mi invención, considero como una novedad y por lo tanto reclamo como de mi exclusiva propiedad, lo contenido en las siguientes cláusulas:

5

1. Seccionamiento transversal para extracción de luz de una guía de onda, caracterizada porque se comprende de un corte de la sección transversal, cuyo acabado debe corresponder a una superficie lisa y libre de porosidades, el seccionamiento transversal comprende desde un punto en
10 la periferia de la guía de onda, hasta un punto de profundidad definido, a partir de una elipse trazada mediante la determinación del ángulo de emisión de una fuente de luz a utilizar y el ángulo crítico de la guía de onda; definiendo el ángulo crítico de la guía de onda a partir de su material y tomando como distancia focal de la elipse la distancia desde una periferia
15 hasta la opuesta, siguiendo un rayo marginal interno.
2. Seccionamiento transversal para extracción de luz de una guía de onda, según la reivindicación 1, caracterizado porque el medio de corte a emplear es uno que permita conseguir el acabado liso y libre de porosidades necesario para permitir la extracción de la luz.
- 20 3. Seccionamiento transversal para extracción de luz de una guía de onda, según la reivindicación 2, caracterizado porque el material a utilizar como guía de onda es transparente.

RESUMEN

La presente invención describe procesos de extracción de luz que es conducida en una guía de onda, como una fibra óptica, específicamente se refiere a un seccionamiento transversal con acabado liso capaz de controlar y mejorar la calidad de la luz extraída de luminarias plásticas transparentes, tales como tubos de luz de acrílico o fibras ópticas plásticas, con el objetivo de resaltar el área y los objetos iluminados, todo ello basado en un diseño eficiente y con forma determinada como se define en la descripción e implementado a lo largo de las fibras ópticas o de los tubos de luz

10

15

20

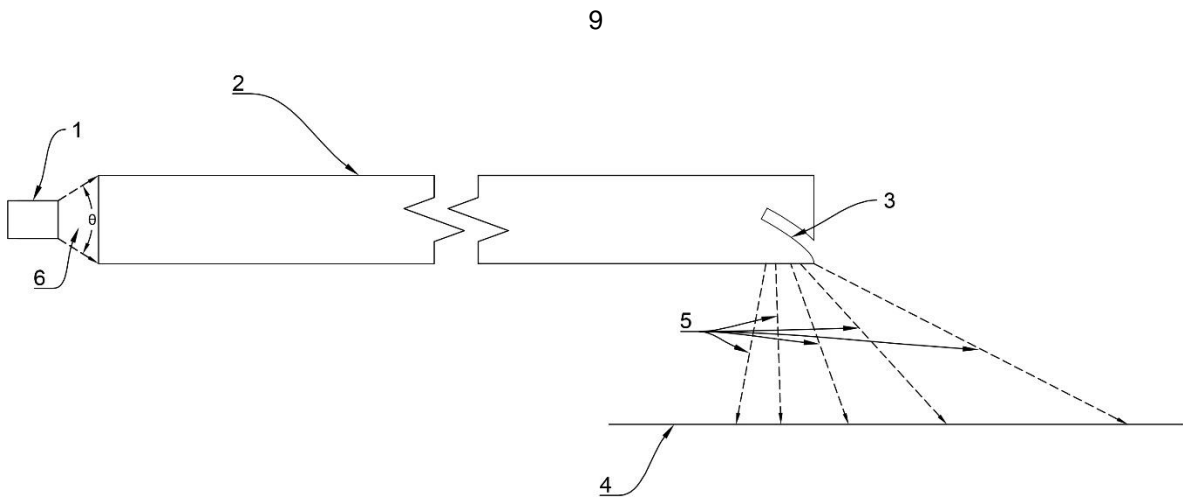


Figura 1

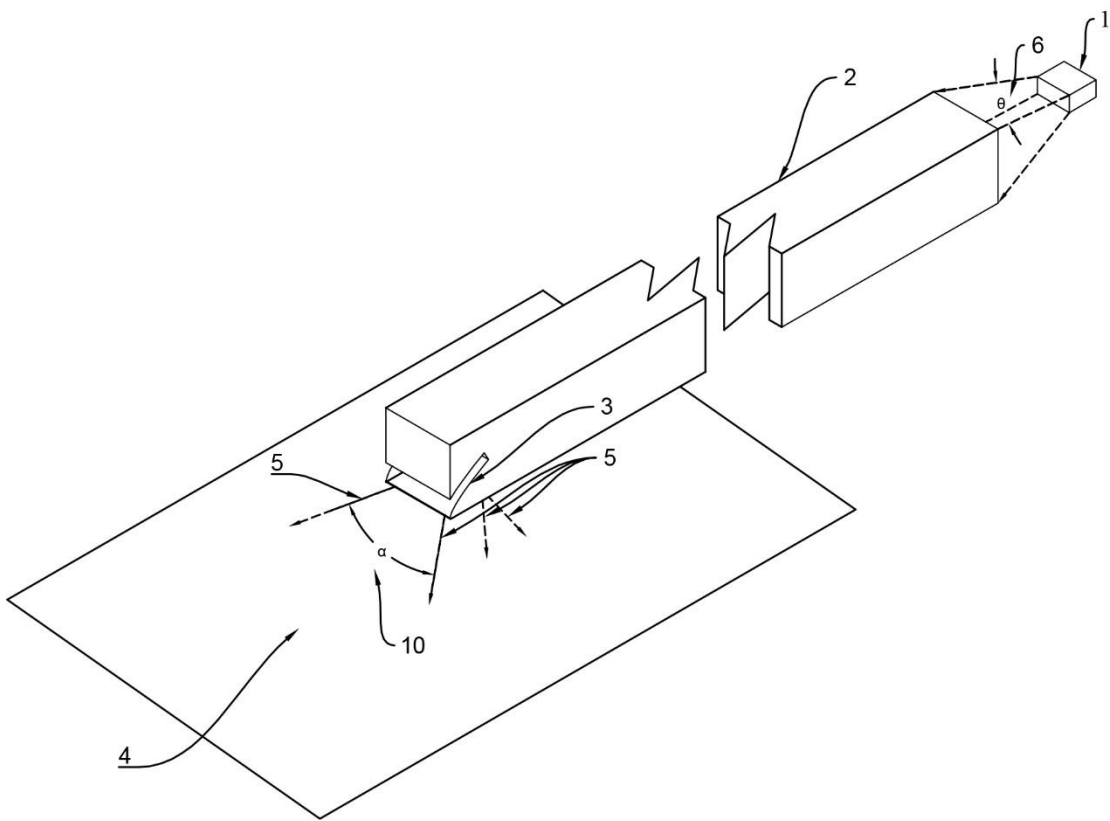


Figura 2

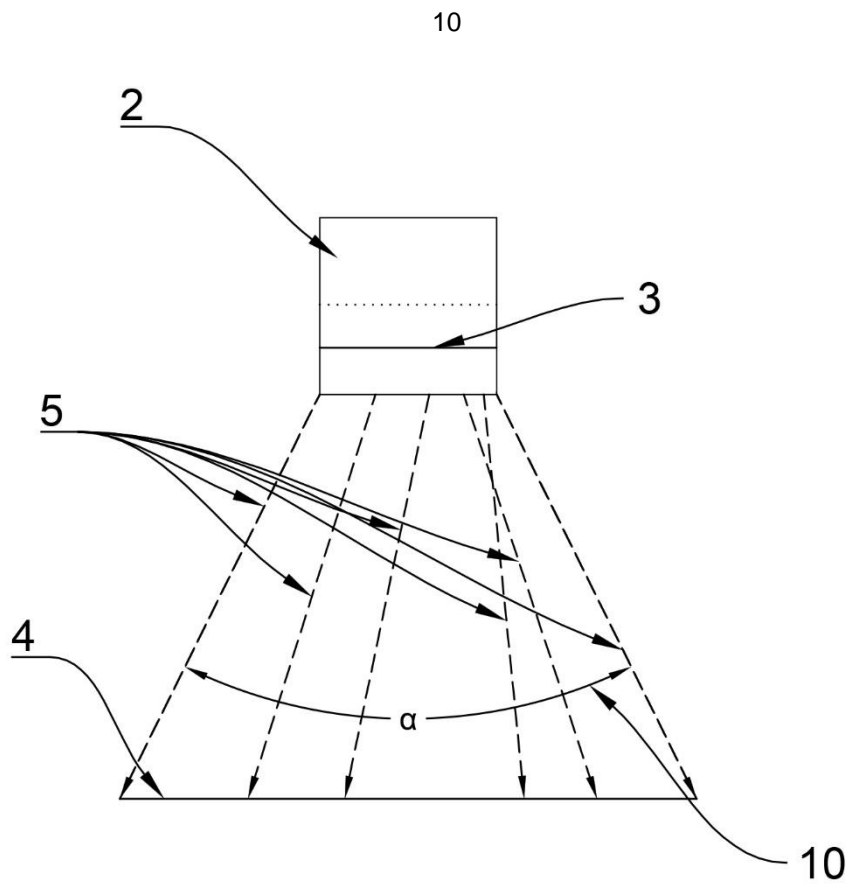


Figura 3

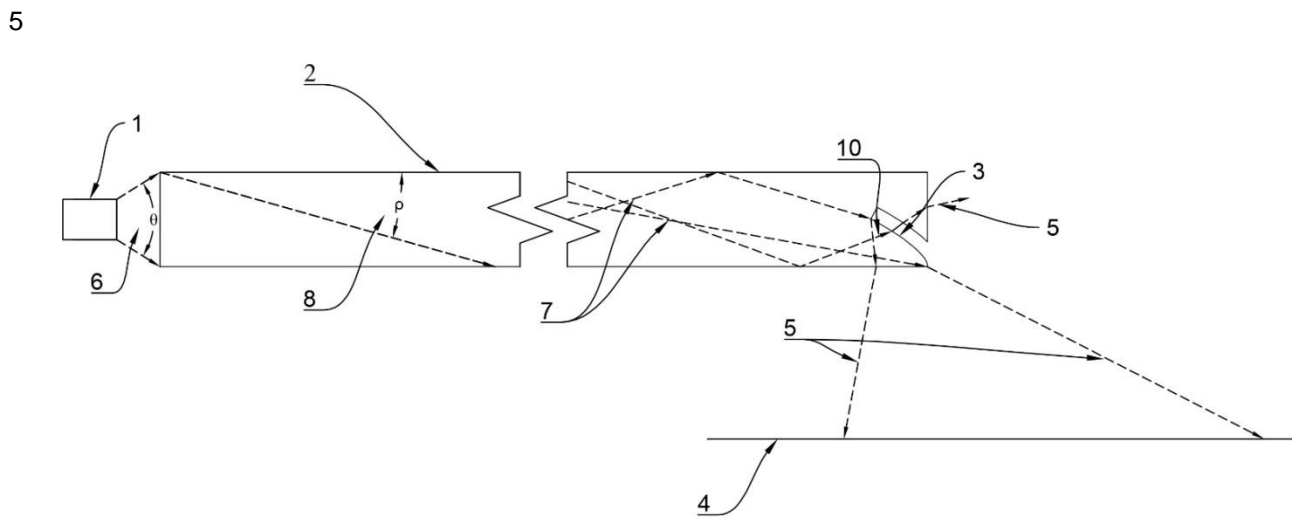


Figura 4

PROCEEDINGS OF SPIE

SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie

Light extraction method for mixing rods based in grooves with elliptical shape

Guillermo E. Sánchez-Guerrero, Perla M. Viera-González,
Daniel E. Ceballos-Herrera, Romeo Selvas-Aguilar

SPIE.

Modeling of efficient light extraction in light-pipes through specular surfaces with elliptical and lineal front shapes

Sánchez-Guerrero, Guillermo E.^a, Viera-González, Perla M.^a, Ceballos-Herrera, Daniel E.^b,
and Martínez-Guerra, Edgar^a

^aFacultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Cd
Universitaria 66455, San Nicolás de los Garza, México

^bInstituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria 04510,
Ciudad de México, México

ABSTRACT

Extraction light in light-pipes with different specular surfaces was analyzed. In the analysis, the impact of the surface shape in all properties of the extracted light in order to obtain an efficient extraction and a uniform illumination using a LED as light source. Also, several parameters of the specular surface to obtain spatial uniformity inside the light-pipe are considered. In this case, the simulation was made for a rectangular light-pipe. One objective of this work is to compare how the front face shape of the specular surface can affect the extraction of light in the lateral face of the light-pipe, only straight and elliptical front faces were used in this work and the comparison between them at different tilts and lengths were made. The main purpose of the front face was extract the light uniformly at the lateral face and this was done by studying simulations on OpticStudio Zemax[®]. The results show how the extraction length is lower in the elliptical front but its total power performs better than the line front.

Keywords: Light-pipe, Light Extraction, Optical Design, Illumination.

1. INTRODUCTION

A daylight system can be any technology or optical device that can maximize natural light penetration in buildings usually using fenestrations and/or light guides such light-pipes or optical fiber.¹ Daylight systems is a developing technology that can work in some climates, rarely tropical² because they depend on daylight, but are from interest due to the benefits for human beings and its energy saving for electrical lighting and reduction of cooling load. Usually, daylight dependency is compensated with a conventional lightning system, in the later years with LED systems which can perform uniform illumination.³ A daylight system is composed by any of the next parts:^{4,5}

- Collectors, used to collect as much sunlight possible can be passive such panels or anidolic concentrators or active such Fresnel lenses or heliostats.
- Light transportation guides, such hollow light-pipes, optical fiber, optical rods, horizontal or vertical light pipes, water filled pipes, etc.
- Diffusers, to distribute light such prismatic, Fresnel or lamps.

In some cases, the diffuser is omitted and the light transportation guide is used directly⁶⁻⁸

A variety of daylight systems exist and this work only focuses on a component, the light-pipe, more specifically specular light pipes for illumination^{9,10} using Total Internal Reflection (TIR) only.

Further author information: (Send correspondence to G.S.G.)

G.S.G.: E-mail: guillermoesanchez@gmail.com

P.V.G.: E-mail: marlene.viera.gzz@gmail.com

PROCEEDINGS OF SPIE

[SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie](https://spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie)

Numerical analysis of lateral illumination lightpipes using elliptical grooves

Guillermo E. Sánchez-Guerrero, Perla M. Viera-González, Edgar Martínez-Guerra, Daniel E. Ceballos-Herrera

Guillermo E. Sánchez-Guerrero, Perla M. Viera-González, Edgar Martínez-Guerra, Daniel E. Ceballos-Herrera, "Numerical analysis of lateral illumination lightpipes using elliptical grooves," Proc. SPIE 10379, Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIV, 103790S (7 September 2017); doi: 10.1117/12.2273096

SPIE.

Event: SPIE Optical Engineering + Applications, 2017, San Diego, California, United States

Acrónimos

CEC Concentrador Elíptico Compuesto	23
CPC Concentrador Parabólico Compuesto	14
CIE Internationale de l'Eclairage	6
LCD <i>Liquid Crystal Display</i>	17
LED <i>Light Emitting Diode</i>	IV
PMMA Polimetilmetacrilato	1
RTI Reflexión Total Interna	2
TCC Temperatura de Color Correlacionada	32
TFD Terapia Foto-Dinámica	VI
TGL Tubo Guiador de Luz	VI
USPTO <i>United States Patent and Trademark Office</i>	18