

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE OPTICA Y OPTOMETRÍA**  
**Departamento de Óptica**



**Sistemas ópticos avanzados para iluminación natural en  
entornos arquitectónicos**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR**

**Berta García Fernández**

**Directores**

**Daniel Vázquez Moliní**

**Antonio Álvarez Fernández-Balbuena**

**Madrid, 2018**

**ISBN: 978-84-09-01531-3**

**© Berta García Fernández, 2016**

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

Facultad de Óptica y Optometría  
Departamento de Óptica



TESIS DOCTORAL

**SISTEMAS ÓPTICOS AVANZADOS PARA ILUMINACIÓN  
NATURAL EN ENTORNOS ARQUITECTÓNICOS**

Memoria para optar a grado de  
Doctor en Óptica, Optometría y Visión presentada por

**Berta García Fernández**

Directores

Dr. Daniel Vázquez Moliní  
Dr. Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Madrid 2016



Sistemas ópticos avanzados para iluminación natural en  
entornos arquitectónicos

Berta García Fernández

2016



*A mi familia*



# Agradecimientos

*A mis Directores: Antonio Álvarez Fernández Balbuena; por su dirección, dedicación y valioso apoyo. Igualmente a Daniel Vázquez Moliní, por su dirección y gran carisma.*

*A los Revisores Académicos y a los Miembros del Tribunal por compartir esta importante etapa de mi formación.*

*A todos mis compañeros de la Facultad de Óptica y Optometría con quienes comparto agradables horas de trabajo.*

*A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.*

*A mis amigos y compañeros que me alentaron en este trayecto. Particularmente a Beatriz Valle, María José de Miguel y Marta Alejos, quienes además de su amistad fueron de estimable ayuda a lo largo de este trabajo.*

*A mi familia, a mi marido Juan por su comprensión, paciencia, ayuda y constante apoyo.*

*A mis padres José y Alicia por ser mis maestros en la vida, por sus consejos y por la constante motivación que me han transmitido. A mi hermano Oscar, que siempre ha estado a mi lado.*

*A mis queridas hijas Sara y Natalia, mi gran tesoro, mi mayor motivación, y mis compañeras inseparables.*



# Resumen

La iluminación natural debe ser considerada como la forma más ecológica para iluminar cualquier espacio y una de las oportunidades y desafíos de diseño más importantes de la arquitectura. La vida humana está fuertemente influida por la luz natural y hoy en día tenemos que añadir a este factor la importancia de la conservación de la energía y la reducción de la contaminación. Por lo tanto, el guiado de la luz es un reto importante para la industria. Las guías de luz prismáticas huecas (HPLGs) ofrecen alternativas técnicas óptimas como herramienta de transporte de la luz, ya que pueden llevar la luz natural y artificial a través del interior de los edificios de manera eficiente.

En esta tesis, se proponen varios desarrollos relacionados con la iluminación mediante guías de luz huecas que incluyen estudios teóricos y experimentales, el desarrollo de modelos matemáticos que predicen el comportamiento de la luz en guías prismáticas y un método analítico para cuantificar la influencia de la deformación del principal elemento óptico que las compone y es la lámina prismática. Esta investigación facilita la predicción del flujo transportado, permitiendo optimizar su funcionamiento mejorando la eficiencia en sus aplicaciones.

Entre los diseños propuestos se presenta un sistema óptico de guiado de luz de grandes dimensiones aplicado a la edificación que permite una extracción de luz de manera controlada permitiendo equilibrar el flujo en los distintos espacios de manera eficiente en un edificio de oficinas para un amplio rango de posiciones solares. También se presenta un sistema óptico basado en óptica anidólica para transferir el flujo luminoso en los giros de las guías huecas incrementando la eficiencia respecto del diseño estándar.

La reproducción del color y las características colorimétricas en el guiado de la luz, son parámetros importantes a tener en cuenta dada la necesidad de obtener una elevada calidad de iluminación en construcciones como edificios de oficinas, centros de producción o museos y también con el objeto de conseguir las aprobaciones pertinentes en relación a la normativa vigente. Con objeto de evaluar la diferencia de calidad cromática que proporcionan las guías de luz huecas se realizan comparativas entre guías huecas prismáticas y de aluminio de diversas geometrías, obteniéndose

mejoras en la capacidad de reproducción cromática de la luz a través de la guía prismática.

El incremento de las guías de luz huecas instaladas en las últimas décadas, y las recientes innovaciones de los materiales que las componen, hacen necesario el desarrollo de métodos predictivos para cuantificar su eficiencia. A pesar de que los procesos de fabricación actuales hacen posible el desarrollo de unas láminas prismáticas de excelente calidad óptica, es importante analizar los fallos que limitan su comportamiento como sistema de guiado óptico. El desarrollo de un modelo matemático multiparamétrico permite determinar la eficiencia de unas guías de luz prismáticas cuantificando el impacto que tienen las imperfecciones de la lámina prismática en la eficiencia del guiado de luz. El ajuste del modelo se realiza mediante procedimientos de optimización basado en los datos de flujo obtenidos en simulaciones con software de trazado de rayos y comprobaciones de la eficiencia en la transmitancia mediante un modelo experimental. Este modelo muestra cómo los defectos en los vértices de la lámina prismática debidos a limitaciones en la fabricación son considerados como la principal fuente de pérdidas.

Por último se proporciona un método de caracterización de la deformación que es producida en una lámina prismática por cambios en la curvatura a través de algoritmos de procesamiento de imagen. Este método muestra la relación entre la curvatura de la lámina, la deformación y el flujo luminoso transmitido en diversos ángulos de incidencia de la luz.

En estos estudios, se ha evaluado la eficiencia y la calidad de luz en el guiado a través de guías huecas y se han propuesto modelos experimentales y teóricos para obtener mejoras en los desarrollos.

# Abstract

Daylighting must be considered as the greenest way to illuminate any space and one of the most important architectural opportunities and design challenges. Human life is strongly influenced by natural lighting, and nowadays we have to add to this factor the importance of energy conservation and pollution reduction objectives. Hollow prismatic light guides (HPLGs) offers optimal technical alternatives as light transport tool because they can transfer natural and artificial light through the buildings interiors efficiently. Therefore, the guiding of light is a valuable challenge for the industry.

This thesis provide several lighting developments related with HPLGs which include theoretical and experimental lighting studies, mathematical models of light behavior and an analytical method to determine optical film performance and deformations related with light transmission.

The proposed designs include a light guidance system to be applied to the building. This system allows a controlled extraction of light in different spaces of an office building for a wide range of solar positions. Transmission of light through elbows in a hollow light guide is an important step in the development of lighting applications. Thus, we present a new design based on non-imaging optics providing higher efficiency in flux transfer than a standard bending system. For HPLGs evaluation, color reproduction is an important parameter to evaluate by the need to obtain lighting quality in museums, office buildings and production centers to optimize light environment and for getting the normative approval. Therefore, spectral and colorimetric analyses are carried out comparing HPLGs with guides made of specular high reflectance materials. The results shows advantages related with HPLGs systems.

The increase of the hollow light guides installed in the last decades, and the recent innovations of the materials used, suggests the necessity to develop predictive methods to quantify its efficiency. Although current manufacturing processes make possible the development of prismatic sheets of optimal optical quality, it is necessary to study the prism defects of their surfaces to quantify the behavior of these optical components. Microscopic techniques had been conducted to determine the defects in the corners of the prisms. Afterthat, a model for light guide transmittance dependent on prism defects is proposed. Software simulations and an experimental studies are

carried out to check the validity of the proposed model. The proposed transmittance model and experimental results show that the corner defects are the main source of losses in hollow prismatic light guides.

To conform to cylindrical guides it is necessary to bend the film to guide the light; changes induced by curving the film give rise to deformation shifts. Thus, an analytical method based on experimental measurements is presented in order to obtain the prismatic film deformation for different curvatures of hollow cylindrical prismatic light guides. Light losses affected by deformation are experimentally evaluated and numerically analyzed. The effect of deformation on prism angle is determined.

Those studies involve numerous analysis of efficiency and quality of light through hollow light guides. Additionally, experimental and theoretical models had been proposed for improvements in developments.

# Índice general

Agradecimientos . . . . .	1
Resumen . . . . .	3
Abstract . . . . .	5
Índice general . . . . .	7
Índice de figuras . . . . .	11
Índice de tablas . . . . .	15
<b>1. Capítulo 1: Introducción</b>	<b>17</b>
1.1. Antecedentes y motivación . . . . .	17
1.2. Objetivos generales y específicos . . . . .	22
1.3. Justificación . . . . .	23
1.4. Metodología, alcance y contribución original al campo de la técnica . .	24
1.5. Estructura de la Tesis . . . . .	25
<b>2. Capítulo 2: Principios teóricos y conceptos básicos</b>	<b>27</b>
2.1. La luz y su estudio . . . . .	27
2.2. Medidas y estándares de iluminación . . . . .	30
2.2.1. Medidas de radiación óptica: radiometría y fotometría . . . . .	31
2.3. Propagación de la luz en medios ópticos, óptica geométrica . . . . .	33
2.3.1. Fenómenos de reflexión y refracción, ley de Snell . . . . .	34
2.3.2. Reflexión total interna . . . . .	35
2.4. Sistemas de guiado de luz, principios de funcionamiento . . . . .	37
2.4.1. Sistemas de captación de luz . . . . .	37
2.4.2. Sistemas de guiado de luz . . . . .	38
2.4.3. Sistemas de extracción de luz . . . . .	38

2.5.	Sistemas de guiado de luz . . . . .	39
2.5.1.	Guías de fibra óptica . . . . .	39
2.5.2.	Guías huecas . . . . .	39
2.5.2.1.	Guías prismáticas huecas . . . . .	40
2.5.2.2.	Lámina prismática de alta reflectancia . . . . .	41
<b>3.</b>	<b>Capítulo 3: Iluminación con guías de luz prismáticas huecas</b>	<b>43</b>
3.1.	Diseño de un sistema extracción de luz aplicado a la edificación . . . . .	43
3.1.1.	Configuración del sistema vertical de guiado y extracción de luz, edificio de oficinas . . . . .	44
3.1.2.	Evaluación del flujo luminoso del sistema de extracción prismático . . . . .	48
3.2.	Sistema de guiado de luz de alta eficiencia mediante codo ajustable . . . . .	52
3.2.1.	Diseño y caracterización del codo de $90^\circ$ . . . . .	53
3.2.2.	Rendimiento del codo de $90^\circ$ mediante software de trazado de rayos . . . . .	54
3.2.3.	Rendimiento de codo con guías especulares . . . . .	56
3.2.4.	Rendimiento en guías prismáticas con codo de $90^\circ$ . . . . .	57
3.3.	Alteraciones cromáticas en las guías de luz huecas . . . . .	62
3.3.1.	La medida del color . . . . .	62
3.3.2.	Diferencia cromática entre guías cilíndricas prismáticas y de aluminio . . . . .	65
3.3.2.1.	Evaluación de la diferencia cromática mediante métodos semiempíricos . . . . .	65
3.3.2.2.	Diferencia de color en guías cilíndricas, montaje experimental . . . . .	68
3.3.3.	Influencia de la geometría de las guías en la cromaticidad . . . . .	70
3.3.3.1.	Rendimiento de color en guías mediante análisis semiempírico . . . . .	70
3.3.4.	Influencia de la geometría de las guías primáticas en la eficiencia	73
<b>4.</b>	<b>Capítulo 4: Modelo matemático de eficiencia en guías prismáticas huecas</b>	<b>75</b>
4.1.	Modelos de cálculo de eficiencia . . . . .	75

4.2. Caracterización de defectos microprismáticos . . . . .	76
4.3. Aproximación de defectos en vértices a un radio de curvatura . . . . .	80
4.4. Modelo matemático para el cálculo de la eficiencia . . . . .	81
4.5. Cálculo de la eficiencia con aproximación de defectos mediante software	82
4.6. Modelo experimental para el cálculo de la eficiencia . . . . .	84
4.7. Ajuste del modelo de eficiencia . . . . .	86
4.8. Influencia del tamaño de la fuente emisora en la eficiencia . . . . .	88
<b>5. Capítulo 5: Método de caracterización de la deformación por curvatura de láminas prismáticas</b>	<b>91</b>
5.1. Método de caracterización de la deformación en la lámina prismática . .	91
5.2. Cálculo experimental de eficiencia en guías prismáticas curvadas . . . .	98
5.3. Cálculo teórico de eficiencia en guías prismáticas curvadas . . . . .	101
<b>6. Conclusiones</b>	<b>105</b>
<b>Publicaciones generadas</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>111</b>



# Índice de figuras

1.1.	Espectro solar de la irradiancia incidente en el límite de la atmósfera de la tierra y en la superficie (nivel del mar) . . . . .	18
1.2.	Componentes básicos de las guías de luz huecas integrados en un edificio	21
2.1.	Reflexión especular en una superficie lisa (a) y reflexión difusa de un haz de luz que incide en una superficie lambertiana (b) . . . . .	34
2.2.	Fenómenos de propagación de luz desde un medio de índice mayor a otro medio de índice menor: ausencia de desviación (rayo 0), refracción (rayo 1), reflexión parcial (flecha discontinua), ángulo de refracción de $90^\circ$ (rayo 2) y TIR (rayo 3) . . . . .	36
2.3.	Representación de los fenómenos de la refracción (rayo 1) y de la reflexión total interna (rayo 3) al pasar desde un medio de índice mayor ( $n_o$ ) a otro medio de índice menor en el interior de una fibra óptica (a) y de una guía prismática hueca (b) . . . . .	36
2.4.	Guiado de luz a través de una guía cilíndrica prismática hueca . . . . .	40
2.5.	Transmisión de la luz del día a través de la guía cilíndrica prismática . . . . .	41
2.6.	Imagen microscópica de la lámina prismática. Superficie prismática (izquierda) y sección transversal (derecha) . . . . .	41
2.7.	Representación de rayos en una lámina prismática que sufren reflexión total interna (TIR) en color rojo y transmisión en color amarillo . . . . .	42
3.1.	Sistema de extracción de luz construido en un edificio de oficinas . . . . .	44
3.2.	Alzado del edificio de oficinas, configuración de los heliostatos y sección del trazado de rayos de la simulación óptica con el sistema de guiado y extracción de luz mostrando los distintos elementos que lo componen	45
3.3.	Diagramas fotométricos rectangular (a) y polar (b) que muestran el comportamiento de la lámina difusora empleada en las simulaciones con el trazado de rayos (c) . . . . .	46
3.4.	Guía de luz prismática con detalle de la lámina prismática que funciona como sistema de extracción de luz . . . . .	47
3.5.	Maqueta experimental del sistema extractor. Vista frontal (a) y vista lateral (b) . . . . .	49

3.6. Sección del trazado de rayos en el sistema. Modelo 1 (a) y Modelo 2 (b)	49
3.7. Flujo luminoso en distintos ángulos de elevación ( $15^\circ$ , $40^\circ$ y $72^\circ$ ) en el modelo 1 (a) y 2 (b)	50
3.8. Comportamiento de los rayos de luz en un sistema óptico formado por una guía prismática hueca acoplada a un codo estándar de $90^\circ$	52
3.9. Configuración del sistema óptico formado por una guía prismática y un CPC de $30^\circ$	53
3.10. Codo estándar (a) y Codo UCM (b)	54
3.11. Eficiencia angular en el codo UCM en los dos planos principales	55
3.12. Distribución angular de luz a la salida en el codo estándar (a) y en el codo UCM de $30^\circ$ (b)	56
3.13. Flujo vs. esbeltez en sistemas de codo con guía de aluminio. Eficiencia normalizada en (a) y flujo del codo UCM en relación con el estándar en (b)	57
3.14. Interior del codo UCM	58
3.15. Esquema del sistema experimental de guiado con codo	58
3.16. Montaje experimental con el codo UCM que muestra el guiado de luz a lo largo del sistema prismático	59
3.17. Mapa de irradiancia normalizado obtenido a la salida de la primera guía (posición 1)	59
3.18. Mapa de irradiancia obtenido en la salida de codo estándar (a) y en el codo UCM (b) en la posición 2	60
3.19. Vista lateral de la propagación de luz a través del codo UCM de $90^\circ$ instalado en una guía prismática hueca	60
3.20. Mapa de irradiancia obtenida a la salida del codo estándar (a) y del codo UCM (b) en la posición 3	61
3.21. Perfil de irradiancia normalizado respecto del codo UCM a la salida del sistema	61
3.22. Curva polar de emisión de la fuente luminosa (a). Reflectancia espectral del aluminio objeto de estudio (AlanRh) (b)	65
3.23. Parámetros geométricos que definen el número de reflexiones en la guía cilíndrica. Sección longitudinal (a) y transversal (b)	66
3.24. Coordenadas cromáticas a la salida de ambos tipos de guías para varias longitudes. Los tres puntos consecutivos d5m, d10m y d15m, representan las longitudes de la guía de aluminio. Los resultados del iluminante D65 se superponen con los de la guía prismática $S'_p$	67
3.25. Representación gráfica de los índices de la diferencia de color ( $\Delta E$ ) en las guías analizadas con las diferentes longitudes (5, 10 y 15 m)	68
3.26. Guía hueca de distintas reflectancias: aluminio (a) y prismática hueca (b)	69
3.27. Diferencias de color Cielab obtenidas en las diferentes muestras de color del atlas Colorchecker	70

3.28. Parámetros geométricos de la guía rectangular. Sección longitudinal (a) y transversal (b) . . . . .	71
3.29. Ratio espectral ( $\eta$ ) en los dos tipos de guías cilíndrico (a) y rectangular (b) . . . . .	72
3.30. Vista en perspectiva de los modelos cilíndrico (a) y rectangular (b) empleados en el trazado de rayos con detalle de la estructura prismática	73
3.31. Eficiencia en guías prismáticas de geometría cilíndrica y rectangular para una longitud de onda de 546 nm . . . . .	74
4.1. Esquema de la trayectoria de un rayo de luz que sufre reflexiones totales internas (TIR) en el interior de una guía prismática. Vista transversal con un detalle de la TIR en el interior la estructura prismática (a). Vista longitudinal (b) . . . . .	77
4.2. Imagen en perspectiva de un corte transversal de la lámina prismática realizada mediante la técnica SEM . . . . .	78
4.3. Imagen de la superficie prismática realizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) (a) Detalle ampliado del vértice externo (b) . . . . .	79
4.4. Topografía de la película prismática obtenida mediante la técnica microscópica TOPAF (a). Análisis de la pendiente en valores absolutos (b) . . . . .	79
4.5. Imágenes de vértices superiores (a, b) y vértices inferiores (c, d) obtenidas con TOPAF . . . . .	80
4.6. Descripción geométrica en sección transversal que determina el radio de curvatura utilizada en el modelo transmitancia ( $\alpha = 90^\circ$ ) . . . . .	81
4.7. Influencia de la fuente de emisión en una CPLG con esbeltez de 30 y diversos radios en vértices . . . . .	83
4.8. Eficiencia obtenida con diversos radios en vértices en diversas longitudes de guía manteniendo un cono angular de $30^\circ$ . . . . .	84
4.9. Esquema del montaje experimental para el cálculo de la irradiancia . . . . .	85
4.10. Mapa de irradiancia obtenido a la entrada (a) y a la salida (b) de la guía prismática en el montaje experimental ( $\rho = 30$ ) . . . . .	85
4.11. Eficiencia medida experimentalmente a lo largo de una guía prismática de esbeltez 30 . . . . .	86
4.12. Eficiencia de cada uno de los tres parámetros del modelo teórico evaluados de manera independiente en diversas relaciones de aspecto y con un radio en vértices de $3 \mu m$ . . . . .	87
4.13. Resultados del modelo matemático de ajuste de la eficiencia, los resultados los obtenidos en las simulaciones y los obtenidos en las medidas experimentales . . . . .	88
4.14. Influencia del tamaño de la fuente de iluminación, normalizada a la unidad, en la eficiencia de las CPLGs . . . . .	89

5.1. Guía prismática que muestra la lámina prismática curvada en su interior	92
5.2. Imagen de la sección transversal de la lámina prismática con una curvatura de $57.14 \text{ m}^{-1}$ empleada para analizar la deformación del contorno (100 X)	93
5.3. Mapa de bordes de una lámina prismática (línea blanca) con las líneas de Hough identificadas en una curvatura de $20 \text{ m}^{-1}$ (líneas rojas)	94
5.4. La matriz de la HT de la imagen con curvatura $20 \text{ m}^{-1}$ muestra los picos de Hough identificados con un cuadrado rojo	95
5.5. Ángulo representativo del vértice prismático obtenido mediante la HT en cada curvatura	96
5.6. Histograma tridimensional de Hough con los valores de seis pendientes de los prismas en la lámina plana	97
5.7. Histograma tridimensional de Hough que los valores de seis pendientes de los prismas en la lámina prismática con curvatura de $66.67 \text{ m}^{-1}$	97
5.8. Desviación angular obtenida mediante la HT respecto de la posición plana en las distintas curvaturas	98
5.9. Vista lateral del esquema del montaje experimental empleado en el cálculo de la transmitancia óptica a través de la lámina prismática	99
5.10. Vista superior del montaje experimental empleado en el cálculo de la transmitancia óptica a través de la lámina prismática	100
5.11. Transmitancia óptica (escala de 0 a 1) en función de la curvatura para diversos ángulos de incidencia	101
5.12. Diversas curvaturas de lámina prismática reproducidas mediante software de modelado 3D	102
5.13. Distribución de flujo obtenido en simulaciones tridimensionales con curvaturas de $8.00 \text{ m}^{-1}$ (a) y $57.14 \text{ m}^{-1}$ (b)	103

# Índice de tablas

3.1. Datos de iluminancia y luminancia del modelo solar empleado para diferentes ángulos de elevación solar en invierno y verano . . . . .	48
3.2. Ratio de flujo luminoso del Modelo 2 respecto del Modelo 1 en cada una de las plantas del edificio (P1, P2, P3) para varias posiciones solares	51
3.3. Temperatura de Color Correlacionada (CCT) e Índice de Rendimiento Cromático (CRI) obtenidos a partir de las distribuciones espectrales en los dos tipos de guías (cilíndrica y rectangular) en diferentes longitudes	72



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes y motivación

La vida de los seres humanos ha estado dominada por la iluminación natural desde el hábitat en las cavernas. Durante siglos, ha sido la única fuente de luz eficiente disponible [1, 2]. Inicialmente el Sol servía para distinguir el día de la noche y proporcionar calor al hombre. Posteriormente hacia el año 2800 a.C. en la civilización egipcia, la vida de las personas también estuvo condicionada por el empleo de la luz natural como se muestra en las pirámides egipcias, que representan la arquitectura religiosa de la época. La cultura griega comenzó a diseñar sus casas con objeto de captar la radiación solar durante el invierno y evitar el calentamiento del Sol en verano, dándose prioridad al diseño solar sobre otras consideraciones. Posteriormente los romanos adoptaron la técnica arquitectónica griega. La ausencia de recursos naturales empleados para el calentamiento durante largos periodos, condicionaron el desarrollo del diseño solar en la arquitectura adaptándose a los diferentes climas del imperio [3]. La utilización del vidrio como elemento arquitectónico por los vidrieros romanos fue una de las innovaciones más importantes de la época. Utilizado en pavimentos, placas para revestimiento de paredes y en el cerramiento de huecos y ventanas [4]. Con la incorporación del vidrio incoloro hacia finales del siglo I d.C., se incrementó el aprovechamiento de la energía solar como fuente de calor en diversos ámbitos tales como invernaderos o termas. Posteriormente debido al auge de la religión cristiana en la Edad Media, la producción de vidrio más importante se realizó en la decoración de las iglesias y templos [5], destacando entre los elementos acristalados las vidrieras. En los siglos XVII y XVIII se producen grandes avances tecnológicos en diferentes campos como la óptica o la química que proporcionan mejoras en los procesos de fabricación. Finalmente se realiza un impulso decisivo de su crecimiento en el s. XIX debido a la producción masiva de láminas de vidrio plano que aportan mayor luminosidad en los ambientes y mejoran el aspecto de grandes edificios mediante la construcción de grandes ventanales. En el siglo XIX la popularidad de las

estufas como fuente de calor fue tan generalizada que se descuidó la correcta orientación de las fachadas de los edificios, perdiéndose la preocupación por el uso solar. Por otro lado, la luz artificial es incorporada de manera definitiva a finales del siglo XIX, proporcionando nuevas posibilidades de diseño arquitectónico relacionadas con la independencia temporal y espacial en la iluminación.

En el s. XX los arquitectos reformularon el concepto de iluminación natural para darle un uso adecuado en relación con la vida de los ocupantes. La preocupación por el calentamiento global del planeta junto con sus posibilidades estéticas y la capacidad de satisfacer necesidades biológicas del hombre incrementa el interés por su uso en el presente siglo [6].

### Energía radiante del Sol como fuente de energía renovable

El Sol y por lo tanto la radiación solar aprovechada por la tierra en el movimiento a su alrededor, constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. Energía que está disponible indefinidamente y en una proporción predecible aunque sufra variaciones [7, 8]. La constante solar es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar que realmente pasa a través de la atmósfera e irradia un área dada en la Tierra durante un tiempo específico y es aproximadamente  $1.35 \text{ kW/m}^2$  [9]. Cantidad altamente variable a nivel del suelo ya que cambia con aspectos como la latitud, las estaciones del año y la climatología. La gráfica de la figura 1.1 representa

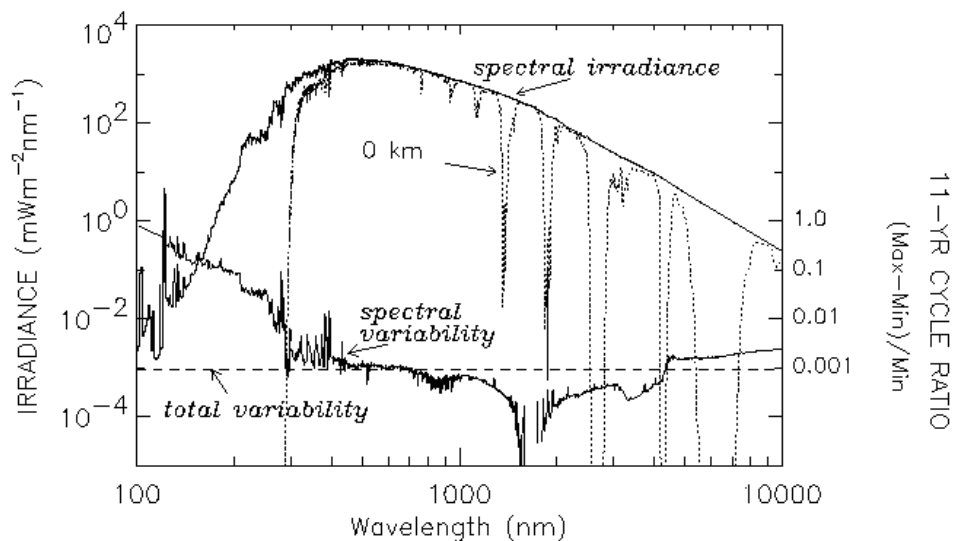


Figura 1.1: Espectro solar de la irradiancia incidente en el límite de la atmósfera de la tierra y en la superficie (nivel del mar)

el espectro de la radiación solar incidente entre 100 y 10000 nm en el límite de la atmósfera de la tierra y en la superficie (0 km), con lo que se muestra la transparencia

relativa de la atmósfera de la tierra a nivel del mar. También esta representada la variabilidad del espectro solar durante 11 años de actividad y es comparada con la variabilidad total de los datos observados (línea discontinua). Existen modelos establecidos que muestran el impacto que los cambios de los ciclos solares tienen en el flujo de la irradiancia solar. Estos modelos indican que la radiación del visible y el infrarrojo cercano varía desde 0.007 % a 0.11 % [10]. También la relación entre la tierra y el sol varía en tiempo y espacio condicionada por ciclos anuales y diarios [11], otros factores como el clima y la turbididad atmosférica de la tierra están en constante cambio [12, 13] por lo que el aprovechamiento de la radiación solar requiere un detallado estudio.

### **La luz natural y la salud**

La luz solar está cada vez más integrada en las construcciones como una herramienta arquitectónica con fines de ahorro energético, pero los efectos físicos y psicológicos que provoca la iluminación en las personas también tienen que ser considerados ya que pueden proporcionar beneficios tan significativos como el que supone el ahorro energético. El efecto beneficioso de la luz natural sobre la salud de las personas es conocido desde la antigüedad y gracias a los avances en múltiples ciencias como la medicina o la biología se ha vuelto a tener en cuenta para mejorar la salud y el bienestar de la sociedad [14].

Se pueden considerar varias vías a través de las cuales las condiciones de iluminación pueden influir en el rendimiento humano [15]. La más obvia es el sistema visual. Cualquier estímulo visual está condicionado por parámetros como el tamaño, el contraste luminoso, la diferencia de color, la calidad de la imagen retiniana y la iluminación retiniana. La interacción entre las características de estos parámetros en las tareas, la distribución espectral de la fuente y la intensidad de la luz condicionan su óptimo desarrollo. La segunda vía son los ritmos circadianos que están condicionados por los ciclos de luz y temperatura. Las condiciones de iluminación sobre los ciclos de 24 horas son los mayores factores que lo determinan, influyendo en el desarrollo de las actividades humanas incluidas las visuales. El tercer camino es el sistema de percepción visual mediante el cual son interpretados o discriminados los estímulos externos visuales en relación con factores como el conocimiento previo y el estado emocional del individuo. Existe por lo tanto una correlación entre el ambiente luminoso creado en el interior de las construcciones y la salud que repercute en el bienestar y en la productividad de las personas [16].

### **Iluminación natural en la arquitectura**

La luz natural varía en intensidad y calidad en cada momento del día, y la cantidad de variación que es tolerable y deseable en la iluminación de los espacios depende de cada uso particular. Los requisitos de iluminación, de acuerdo a la normativa pertinente, son muy estrictos en algunos casos, como por ejemplo en los museos y más

flexibles en otros como en los espacios de ocio. Las fuentes de luz pueden generar deslumbramientos que a la vez provocan irritaciones, debilitando la eficiencia en las tareas de los usuarios [17] por lo que el control de la admisión de la luz natural dentro de los espacios requiere un cuidadoso diseño [18]. Para poder proporcionar una buena iluminación existen tres factores básicos a tener en cuenta: la calidad, la cantidad y la distribución. Una óptima estrategia de iluminación natural regula el nivel de iluminación dentro del edificio y controla la direccionalidad de la luz optimizando la calidad del medio ambiente luminoso.

La iluminación natural tiene hoy en día mucha importancia en la arquitectura, debido a la necesidad que existe en la sociedad de la reducción de gasto energético para evitar el calentamiento global del planeta. Desde la década de los años 70, el guiado de luz natural en la arquitectura ha sido una de las mas importantes áreas de estudio e innovación con el objetivo de darle un uso adecuado relacionado con la conservación de la energía [19, 20]. La incorporación de elementos habitualmente utilizados como las ventanas, son una parte fundamental en el diseño de los edificios. Sin embargo su utilización tiene algunas limitaciones como la posibilidad de producir deslumbramientos, alto contraste y excesivo brillo. El flujo de luz que proporcionan afecta principalmente a los metros más cercanos al lugar en que se encuentran por lo que requieren sistemas de iluminación artificial auxiliar [21] o sistemas de control lumínico. El incremento de las dimensiones de las construcciones durante las últimas décadas requiere el desarrollo de sistemas innovadores que permitan distribuir la luz natural en el interior de las construcciones donde los elementos tradicionales no son eficaces [22, 23].

Podemos dividir las estrategias de iluminación natural [24, 25, 26], en dos grandes grupos. El primero incluye sistemas de iluminación laterales en los cuales la luz es captada desde el lateral del edificio hacia el interior. En la actualidad hay una gran variedad de desarrollos que dirigen y distribuyen la luz aunque el ejemplo más utilizado son las ventanas. El segundo grupo incluye sistemas de iluminación superiores donde la luz es captada desde lo alto del edificio y distribuida en el interior. Un ejemplo son las claraboyas que pueden ser definidas como ventanas abiertas en el techo o en la parte alta de las paredes por donde entra luz. Cambiando la orientación de estos sistemas, así como su tamaño y ubicación se ha conseguido aumentar su eficacia.

Los sistemas de iluminación natural innovadores son diseñados para redirigir la luz del sol o del cielo hacia las áreas donde es requerida sin producir deslumbramiento, utilizando desarrollos ópticos que hacen uso de las leyes de la reflexión y refracción en los materiales. Uno de los principales desafíos de diseño de los sistemas en iluminación radica en optimizar la eficiencia. Esto se consigue actuando en los diversos elementos que componen el sistema, como minimizando el tamaño del area de captación, mediante la incorporación de materiales con alta reflectancia o transmitancia y cambiando la geometría de los componentes. Los sistemas innovadores incluyen elementos ópticos como espejos, vidrios prismáticos, repisas, atrios y guías

de luz. Los espejos se pueden utilizar para dirigir y reflejar la luz directa del Sol. Los vidrios prismáticos, entre otras aplicaciones alteran la dirección de la luz del Sol y evitan los deslumbramientos debidos a la luz directa. Las repisas de luz trabajan mediante el principio de la reflexión y pueden redirigir la luz directa del Sol y la luz difusa del cielo. Suelen estar situados horizontalmente y en la parte superior de las ventanas o en el interior de las construcciones reflejando la luz hacia el techo de una manera difusa, ayudando de esta forma a obtener una mayor uniformidad de luz en el espacio. Los atrios proporcionan mayor cantidad de luz en las construcciones de grandes dimensiones aumentando el confort de los ocupantes.

En 1881 William Wheeler [27] desarrolló un sistema de iluminación basado en guías de luz huecas, a partir de entonces se desarrollaron estos sistemas para distribuir la luz natural en los espacios donde está ausente [28, 29]. Las guías de luz huecas son consideradas como los sistemas innovadores de mayor aplicación a nivel mundial [30], con los que se puede proporcionar un incremento de luz natural disminuyendo el gasto total de electricidad.

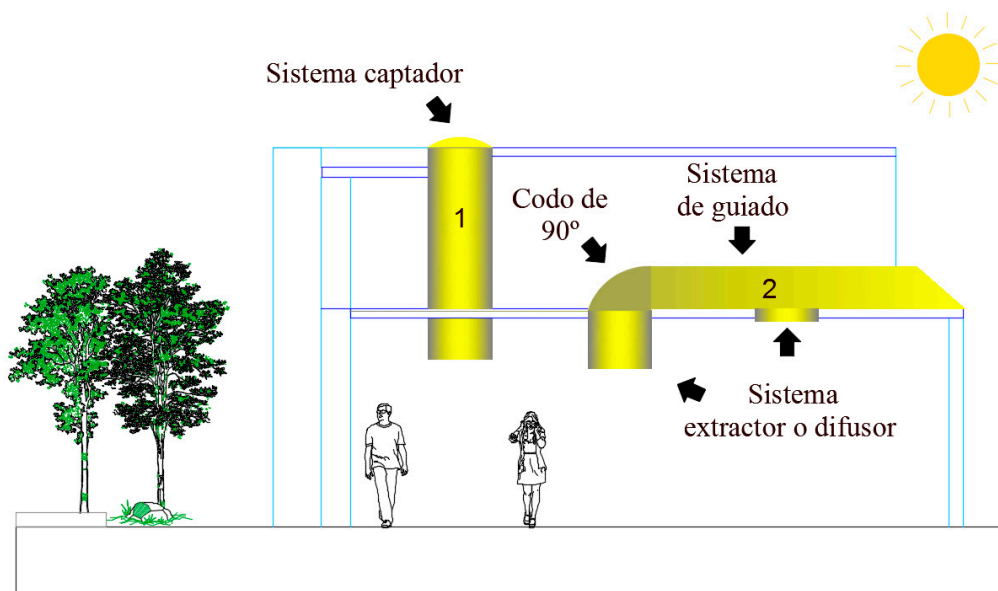


Figura 1.2: Componentes básicos de las guías de luz huecas integrados en un edificio

En el mecanismo básico de guiado (representado en la figura 1.2), la luz incide en un sistema captador o colector situado en el exterior de la construcción y es guiada hacia el interior del edificio a través de un sistema tubular, habitualmente vertical (1) u horizontal (2), recubierto internamente de una superficie altamente reflectante como el aluminio para luego ser expulsada mediante un sistema extractor o difusor. Las guías de luz huecas transparentes que incorporan láminas prismáticas han brindado mejoras respecto de las de aluminio como un aumento de la eficiencia

para determinados ángulos de incidencia de la luz [31]. La incorporación de las guías de luz huecas permite aumentar el flujo luminoso sin que se produzca elevación de la temperatura en verano ni pérdidas térmicas en invierno incrementando las alternativas de construcción y diseño.

## 1.2. Objetivos generales y específicos

El objetivo general de esta tesis es la investigación de sistemas de guiado de luz prismáticos para obtener una cuantificación matemática de su eficiencia y de la calidad de luz obtenida. El estudio profundo de modelos de comportamiento de luz en las guías prismáticas y la elaboración de procedimientos ópticos de medida exhaustivos con herramientas de análisis actualmente vigentes, determinarán la importancia de los parámetros que condicionan su funcionamiento. Este estudio implica la formulación de un modelo matemático de precisión para determinar la eficiencia en el guiado de las guías de luz cilíndricas prismáticas (CPLG) basado en cálculos tanto teóricos como experimentales y la presentación de un método analítico para medir las deformaciones debidas a la curvatura en láminas prismáticas cuantificando su influencia en la transmitancia de luz.

Los objetivos específicos de la tesis son:

1. Diseñar un sistema óptico de guiado de luz de grandes dimensiones aplicado a la edificación que permita una extracción de luz de manera controlada y eficiente en un edificio de oficinas mediante el uso de láminas prismáticas.
2. Desarrollar un sistema óptico basado en óptica anidólica para guiar la luz en los giros de las guías huecas incrementando la eficiencia respecto del diseño estándar.
3. Evaluar la calidad cromática que proporcionan las guías de luz huecas prismáticas y de aluminio.
4. Realizar estudios comparativos teóricos de la eficiencia en el guiado de luz a través de guías prismáticas con diferentes geometrías.
5. Cuantificar microscópicamente las imperfecciones de las láminas prismáticas mediante diversas técnicas de análisis de superficie.
6. Desarrollar un modelo matemático multiparamétrico que permita determinar la eficiencia de una guía de luz prismática.
7. Cuantificar el impacto que tienen las imperfecciones de las láminas prismáticas en la eficiencia del guiado de luz a partir de estudios de superficie de las láminas prismáticas y mediante un modelo de aproximación de defectos en los vértices de los prismas.

8. Diseñar y construir un modelo experimental para medir la eficiencia, corroborando experimentalmente los modelos matemáticos desarrollados.
9. Proporcionar un método de caracterización de la deformación producida en una lámina prismática inducida por cambios en la curvatura cuantificando las pérdidas por transmitancia asociadas.

### 1.3. Justificación

La vida humana está fuertemente influida por la luz natural y hoy en día tenemos que añadir a este factor la importancia de los objetivos de conservación de energía y reducción de la contaminación. La iluminación natural debe ser considerada dentro de la arquitectura como la forma más ecológica para iluminar cualquier espacio y una oportunidad a la vez que un desafío de diseño.

Las preocupaciones recientes sobre el calentamiento global y la necesidad de conservar los combustibles fósiles, demandan el uso de la iluminación natural como estrategia para la iluminación de un edificio. Por lo tanto, el guiado de la luz es un reto importante para la industria. Las guías de luz prismáticas ofrecen alternativas técnicas óptimas como herramienta de transporte de la luz, ya que pueden transferir la luz natural y artificial a través del interior de los edificios de manera eficiente.

El hecho de que exista un factor de decrecimiento en el flujo luminoso a lo largo del guiado, incrementa la importancia del análisis de los parámetros que lo condicionan para la optimización y control de los sistemas ópticos. Conocer en detalle la morfología de las guías prismáticas es de gran importancia para entender el papel que tiene cada parámetro en la eficiencia óptica y el guiado de la luz.

La reproducción del color es un parámetro importante a tener en cuenta dada la necesidad de obtener una elevada calidad de iluminación en edificios de oficinas, centros de producción, en museos y también con objeto obtener las aprobaciones pertinentes en relación a la normativa vigente. Por ello, se han llevado a cabo diversos análisis espectrales y colorimétricos para mostrar los cambios en la reproducción del color de las HPLGs en comparación con guías compuestas de materiales de alta reflectancia especular.

La creación de modelos matemáticos como una representación simplificada de una realidad compleja, supone una herramienta de organización de datos con la consecuente mejora en la comprensión de los sistemas ópticos de guiado proporcionando ayuda para la toma de decisiones.

Hoy en día, las técnicas de análisis de imagen suponen una de las herramientas más importantes para obtener información. El empleo de diversas técnicas de procesamiento digital en los análisis realizados, englobadas dentro del campo de la visión artificial y con el apoyo de medidas a escala microscópica, permite mejorar la

calidad en los resultados, ayudándonos a comprender y descifrar características de los elementos ópticos con gran precisión.

Cuando se realiza un diseño adecuado, la iluminación natural puede proporcionar un ahorro significativo de energía y mejorar la calidad de los sistemas. Por lo tanto, el desarrollo de nuevas alternativas de diseño, la implementación de modelos numéricos que predicen el comportamiento de la luz y el análisis de la eficiencia mediante técnicas apropiadas, son necesarios para el perfeccionamiento de la iluminación en la arquitectura.

## 1.4. Metodología, alcance y contribución original al campo de la técnica

Para la elaboración de esta tesis se han realizado revisiones de los últimos avances relacionados con las técnicas empleadas y análisis de los trabajos desarrollados en el área de las guías de luz prismáticas huecas (HPLGs). La recolección y análisis de información relevante ha permitido definir los problemas existentes en el campo de conocimiento. A lo largo del proceso de investigación, se han realizado diversos estudios empleando nuevas tecnologías de medida que incluyen análisis teóricos mediante cálculo como el software de trazado de rayos Tracepro [32] y de lenguaje matemático Matlab, procediendo a su aplicación y su correspondiente verificación, validación y refinamiento con modelos reales experimentalmente.

En esta tesis se proponen novedosos diseños ópticos como un sistema de extracción lateral y otro de guiado en ángulo que permiten obtener mejoras en el guiado de luz mediante guías prismáticas huecas. Estos diseños permiten orientar la luz directa en los espacios utilizando la óptica anidólica, por medio de materiales dieléctricos y reflexivos de manera eficiente. El proceso de diseño conlleva una serie de etapas como son: definición del sistema, cálculo y evaluación de eficiencias, análisis de los resultados, modificaciones, ajustes en los parámetros de diseño y validación. Mediante cálculos teóricos y modelos experimentales se han realizado diversos análisis de eficiencia y cálculos colorimétricos en guías de luz huecas de diferentes geometrías y materiales. El desarrollo de un modelo matemático para el cálculo de la transmisión de luz de las guías prismáticas, muestra la eficiencia del sistema asociada a un análisis de la lámina prismática a escala micrométrica. Este modelo permite cuantificar la influencia de varios parámetros que la caracterizan como son los defectos que existen en la superficie del material que la compone. Para cuantificar los defectos topográficos, se han estudiado mediante diversas técnicas de microscopía los defectos superficiales a escala micrométrica. El ajuste del modelo se realiza mediante procedimientos de optimización basados en los datos de flujo obtenidos en simulaciones con software de trazado de rayos empleando modelos realistas y comprobaciones con un modelo experimental. Finalmente, se propone una técnica de análisis morfológico, empleando algoritmos de procesamiento de imagen para evaluar la influencia de la flexión

en la deformación de una lámina prismática flexible. Esta técnica muestra la relación entre la curvatura de la lámina, la deformación y el flujo luminoso transmitido.

El presente trabajo proporciona, una estimación cuantitativa de la influencia de numerosos factores que afectan al transporte de luz en guías huecas con el fin de contribuir a la predicción de pérdidas de luz, como la influencia de los defectos que se producen en los procesos de fabricación en un sistema óptico prismático o en el modelado de los sistemas ópticos para el reconocimiento de las limitaciones existentes.

## 1.5. Estructura de la Tesis

Esta memoria de tesis doctoral está dividida en seis capítulos. El capítulo uno presenta una introducción general a la tesis, sus objetivos, el estado de la investigación y la contribución al campo de conocimiento. Se presenta una breve revisión de los sistemas de iluminación natural, su evolución y potenciales beneficios. Se muestran las principales ventajas e inconvenientes relacionados con el diseño e implementación de las HPLGs. Finalmente se presenta una discusión sobre la justificación, metodología y alcance de este trabajo.

El capítulo dos presenta una revisión de los principales conceptos teóricos relacionados con la luz y su medida y se analizan las ventajas e inconvenientes de los sistemas de guiado de luz solar. También es presentado y discutido el actual estado del arte en la tecnología de las guías de luz prismáticas.

En el capítulo tres se describen diversos desarrollos de guiado y extracción de la luz que mediante cálculos teóricos y experimentales muestran análisis de la eficiencia. También se realizan cálculos colorimétricos en guías de luz huecas de diferentes geometrías y materiales, mostrando las técnicas de análisis óptico empleadas y la instrumentación aplicada.

En el capítulo cuatro se muestra el análisis y caracterización de una superficie micropismática, se desarrolla un prototipo experimental para determinar la eficiencia en el guiado y posteriormente se propone un modelo matemático semiempírico.

En el capítulo cinco se proporciona un método de caracterización de la deformación producida en una lámina prismática inducida por cambios en la curvatura de la guía cilíndrica que la contiene. Este método está basado en procedimientos de reconocimiento y análisis de imagen. También se cuantifican experimental y teóricamente las pérdidas de luz debidas a estos cambios mediante análisis de transmitancia óptica.

Finalmente, en el capítulo seis se recogen las principales conclusiones de ésta tesis.



## Capítulo 2

# Principios teóricos y conceptos básicos

### 2.1. La luz y su estudio

La luz es uno de los fenómenos físicos más fascinantes que existen y por lo tanto es una gran fuente de interés para muchos científicos que han tratado de describir su origen y explicar su naturaleza proponiendo distintos modelos de comportamiento a lo largo de la historia.

En el recorrido histórico de las teorías sobre la naturaleza de la luz se pone de manifiesto el doble carácter ondulatorio y corpuscular que se le ha atribuido. Las primeras propuestas elaboradas sobre la naturaleza de la luz se encuentran en la antigua Grecia [33] en las que se plantea el tema de la visión en gran número de trabajos. Aparece una primera concepción corpuscular de la luz apoyada por los atomistas. Demócrito, filósofo griego presocrático y matemático que vivió entre los siglos V-IV a.C., supuso que los cuerpos emitían átomos portadores de su imagen. Se encuentran precedentes del modelo ondulatorio por parte del filósofo griego Aristóteles (384–322 a.C.) que decía que podemos observar los objetos mediante la modificación del medio interpuesto entre el ojo y el objeto visto. Las ideas de los filósofos griegos fueron transmitidas a Europa por los árabes como el filósofo Alkindi que a finales del siglo VIII traduce escritos realizados por científicos y filósofos griegos y revisa las teorías de la visión y la luz. Posteriormente Alhacen (965 – 1039) escribió el primer tratado amplio sobre lentes y realizó importantes estudios con sistemas ópticos de espejos [34].

Fue a lo largo del siglo XVII, durante el establecimiento de la física clásica, cuando se inició el verdadero debate sobre la naturaleza de la luz, apareciendo dos tendencias claramente marcadas: por un lado la consideración de la luz formada por corpúsculos, proveniente de Newton y por otro la naturaleza ondulatoria de la luz obra de Huygens.

Newton en 1671 revitaliza ideas sostenidas por Empédocles (s.V a.C.) sobre la naturaleza de la luz mediante la teoría de la emisión. Propone que la luz está compuesta de pequeñas partículas o corpúsculos que se propagan en línea recta si no están sometidos a ninguna fuerza [35]. Esta teoría explica fenómenos como la propagación rectilínea de la luz, la absorción, la reflexión y la refracción. En 1678 Huygens propuso la teoría ondulatoria de la luz, correspondiendo al movimiento específico que sigue la luz al propagarse a través de un medio insustancial e invisible al que denominaron éter demostrando las leyes de la reflexión y refracción con su hipótesis [36].

Posteriormente los trabajos de Thomas Young (1804) pusieron de manifiesto fenómenos de interferencia y difracción [37] que eran inexplicables según la teoría corpuscular. Los experimentos realizados fueron decisivos para que la propuesta realizada por Huygens fuera tenida en cuenta. También Goethe (1810) mostró un gran interés por la luz y el color desarrollando una teoría subjetiva del color que hoy se llama psicología del color [38].

En 1865, se agregan a las teorías existentes las ideas del físico James Clerk Maxwell [39, 40], que descubrió las relaciones fundamentales entre las perturbaciones eléctricas y magnéticas propagándose en el vacío y dio a tales ondas el nombre de ondas electromagnéticas. Determinó la velocidad de propagación de un campo electromagnético, el cual coincidió con el de la luz en el vacío y le hizo afirmar que las ondas luminosas son ondas electromagnéticas. La velocidad de propagación  $c$  se relaciona con la constante eléctrica  $\epsilon_o$  y la constante magnética  $\nu_o$  mediante la ecuación:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_o \nu_o}}. \quad (2.1)$$

La radiación electromagnética es un fenómeno ondulatorio de transporte de energía, formado por un campo magnético y uno eléctrico perpendiculares entre sí, cuya velocidad de desplazamiento en el vacío es de  $c = 299792458$  km/s, difiriendo muy poco su valor en el caso de la propagación en el aire. La radiación electromagnética, al ser un fenómeno ondulatorio, tiene asociada una longitud de onda  $\lambda$  y una frecuencia  $\nu$ , ambas relacionadas entre sí por la expresión:

$$c = \lambda \nu_o. \quad (2.2)$$

El índice de refracción es una propiedad física fundamental de un medio que indica su “densidad óptica”. El índice de refracción absoluto del medio  $n$  es definido como el cociente entre la velocidad de propagación de una onda electromagnética en el vacío  $c_o$  y la velocidad de propagación de la onda en el medio  $v$ :

$$n = \frac{c}{v}. \quad (2.3)$$

En 984 Ibn Sahl ya utiliza la ley de la refracción para obtener formas de lentes que enfocan la luz sin aberraciones geométricas. Posteriormente el concepto de índice de

refracción es utilizado en 1807 por Tomas Young [41] y por varios autores [35, 42] que lo emplearon en relación con la potencia de refracción. En un medio homogéneo e isótropo, el valor de  $n$  varía con la longitud de onda.

Mediante el Teorema de Poynting, desarrollado por John Henry Poynting y publicado en 1884 [43], se expresa la ley de conservación de la energía dentro del electromagnetismo, estableciéndose que la disminución de energía electromagnética en una región se debe a la disipación en forma de calor por efecto Joule y al flujo hacia el exterior definido por el vector de Poynting. En 1900, Max Planck descubrió una constante fundamental, la denominada constante de Planck  $h$ , utilizada para calcular la energía de un *fotón* y formuló la hipótesis cuántica en la que la energía se radia en unidades pequeñas separadas llamadas cuantos e interpretó teóricamente las curvas de radiación de los cuerpos [44]. Para la luz visible, la energía portada por un fotón es de alrededor de  $4 \cdot 10^{-19}$  julios, energía suficiente para estimular la visión [45].

La ley de Planck establece que la energía de cada cuanto es igual a la constante universal de Planck multiplicada por la frecuencia de la radiación:

$$E = h\nu, \quad (2.4)$$

siendo la constante de Planck  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Js. Los cuerpos que reciben radiación térmica absorben y después emiten energía radiante en forma de ondas electromagnéticas de todas las frecuencias, que sólo corresponden al espectro visible si el cuerpo alcanza una cierta temperatura. Los descubrimientos de Planck, supusieron el nacimiento de un campo totalmente nuevo de la física conocido como mecánica cuántica y proporcionaron los cimientos para la investigación en campos como el de la energía atómica [46, 47].

Albert Einstein realizó en 1905 una descripción matemática del efecto fotoeléctrico explicando porqué la energía de los electrones dependía exclusivamente de la frecuencia de la luz incidente y no de su intensidad. Formuló las bases de la teoría de la relatividad [48] y dio cuerpo a la noción de fotón [49]. En 1916 quedaron establecidas las leyes del efecto fotoeléctrico al ser éstas corroboradas experimentalmente [50, 51].

Con el nacimiento de la mecánica cuántica a principios del s. XX, se propuso la existencia de ondas de materia resolviendo así el problema existente en relación a la interpretación de la teoría de la radiación electromagnética. Louis-Victor de Broglie en su Tesis Doctoral (1924) postuló que a cada partícula le corresponde una onda asociada [52]. A partir de aquí surgió la mecánica ondulatoria, que establece la naturaleza corpuscular de la luz en su interacción con la materia en los procesos de emisión y absorción y la naturaleza electromagnética de su propagación. La dualidad onda corpúsculo que presenta el fotón no sólo es un comportamiento excepcional, sino que es considerado como una ley de la naturaleza. Toda partícula de masa  $m$  y velocidad  $v$  tiene asociada una onda cuya longitud  $\lambda$  es definida como:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (2.5)$$

donde  $m$  es la masa,  $v$  es la velocidad y  $h$  es la constante de Planck.

Gilbert Lewis en 1926 [53, 54] propone el concepto de *fotón* como un nuevo átomo que no es luz pero juega una parte esencial en cada proceso de radiación. Se puede considerar que la energía radiante (por lo menos en el caso de altas frecuencias) viaja en unidades discretas, cada una de las cuales pasa por un camino definido de conformidad con las leyes mecánicas.

Después de que De Broglie propusiera el fundamento teórico de que los haces electrónicos tienen propiedades de radiaciones electromagnéticas, se incrementa el desarrollo de la mecánica ondulatoria, siendo aplicado en muchos supuestos y haciendo uso de las analogías mecánico-ópticas. Por ejemplo, Hans Busch muestra en 1926 que las lentes magnéticas podrían utilizarse para dirigir electrones al igual que las lentes ópticas se pueden utilizar para dirigir la luz. Este avance supone un importante paso para el establecimiento del primer microscopio electrónico desarrollado por Max Knoll y Ernst Ruska en 1932 [55].

La física por lo tanto trata de desarrollar teorías que representen el comportamiento de la naturaleza de la luz mediante una de sus ramas más antiguas que es la óptica. Hoy en día se acepta el hecho de que la luz parece tener una doble naturaleza: los fenómenos de propagación encuentran explicación dentro de la teoría ondulatoria electromagnética y los procesos de absorción y emisión que representan la interacción entre la luz y la materia responden a un fenómeno corpuscular.

## 2.2. Medidas y estándares de iluminación

En el s. XX se ha dado una gran importancia a la comprensión de conceptos relacionados con la radiación [56, 57]. Igualmente, se ha mostrado preocupación en normalizar y generalizar la terminología, los símbolos y las unidades de medida radiométricas y fotométricas. Una de las principales organizaciones internacionales de terminología en este campo es la CIE (Comisión Internacional de Iluminación o Commission Internationale de l'Éclairage). Es la autoridad que emprendió en 1931 el desarrollo de una gran cantidad de conceptos básicos y procedimientos estándar en metrología en el campo de la luz y de la iluminación [58].

El NBS (National Bureau of Standards) llamado actualmente Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) ha proporcionado una serie de informes mediante el desarrollo de avances en metrología, normas y tecnología para mejorar la estabilidad económica y la calidad de vida. Organizaciones como la reconocida autoridad en iluminación denominada IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) fundada en 1906 realiza, entre otras actividades, recomendaciones de las cantidades y calidades necesarias en materia de iluminación de los entornos según las necesidades del hombre. Estas recomendaciones son recogidas en prestigiosas publicaciones como IESNA Lighting Handbook [59]. También el instituto ANSI (American National Standards Institute) supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios,

procesos y sistemas en los Estados Unidos. La ISO (Organización Internacional de Normalización) busca la estandarización de normas de productos y seguridad para las empresas y organizaciones a nivel internacional.

Por otra parte, el Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo en el que se aprueba el Código Técnico de Edificación (CTE) establece unas exigencias en materia de iluminación para reducir a límites aceptables el consumo de energía en edificios y para que una parte de este consumo proceda de fuentes renovables.

### 2.2.1. Medidas de radiación óptica: radiometría y fotometría

La radiometría es una rama de la física utilizada para describir y medir la propagación de la radiación electromagnética [60].

La magnitud fundamental a la hora de estudiar un sistema es el *flujo radiante*  $\phi_e$  definido como la cantidad de partículas que fluyen a través de un medio, transportando una cantidad de energía  $Q$  y con una determinada probabilidad al interactuar con la superficie por unidad de tiempo  $t$ . Su unidad es el watio (W) y su valor es dado mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_e = \frac{dQ}{dt}. \quad (2.6)$$

La *irradiancia*  $E_e$  se utiliza para cuantificar el flujo radiante por unidad de superficie  $S$  y se define como la cantidad de energía que llega o sale (en éste caso denominada Exitancia  $M_e$ ) de un área determinada o superficie específica por unidad de tiempo y unidad de superficie, en éste caso sin importar la distribución angular o direccional de la radiación en cuestión. Se mide en  $W/m^2$  y se define como:

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS}. \quad (2.7)$$

El ángulo sólido  $\Omega$  es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado y corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie cónica. Mide el tamaño aparente de ese objeto y es definido como la relación de una porción del área de la superficie de una esfera en relación al cuadrado del radio de la esfera ( $d\Omega = dS \cos\theta / R^2$ ), su unidad es el esteroradián *sr*. En el caso de un casquete esférico cuyo radio se ve bajo un ángulo  $\theta$  desde el centro de la esfera, será definido como  $\Omega = 2\phi(1 - \cos\theta)$ .

La *intensidad radiante*  $I_e$ , es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, que incide o emerge de un determinado punto del espacio en una dirección específica. Las unidades utilizadas habitualmente para definir la intensidad radiante son  $W/sr$ :

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}. \quad (2.8)$$

La *radiancia*  $L_e$  es el flujo radiante  $\phi_e$  por unidad de área proyectada  $S$  y unidad de ángulo sólido que en cierta dirección incide, atraviesa o emerge de un punto específico

sobre una superficie específica y se mide en  $W/m^2sr$ :

$$L_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega dS \cos\theta}. \quad (2.9)$$

Todas las cantidades radiométricas definidas dependen de la longitud de onda, por lo que para escribir explícitamente esta dependencia es necesario agregar la razón de cambio con respecto a  $\lambda$ .

Cuando la radiación es detectada por el ojo humano, en los cálculos es empleada una zona restringida del espectro electromagnético, de tal forma que las unidades están en acuerdo con la sensibilidad del ojo humano en relación a las longitudes de onda que forman el espectro visible. El rango visible, en términos de longitud de onda, varía entre aproximadamente 380 nm y 780 nm y representa una pequeña parte del espectro electromagnético.

La fotometría estudia la capacidad de la radiación electromagnética dentro del rango visible del espectro. Está basada en un modelo estadístico de la respuesta visual del ojo humano bajo ciertas condiciones, introduce este hecho ponderando las diferentes magnitudes radiométricas medidas para cada longitud de onda por un factor que representa la sensibilidad del ojo para esa longitud. La función que introduce éstos pesos se denomina función de sensibilidad espectral relativa de un ojo modelo y se representa como  $V(\lambda)$  [61]. Esta función es diferente dependiendo de que el ojo se encuentra adaptado a condiciones de luz diurna (visión fotópica) o de visión en luz nocturna (visión escotópica). La estimulación relativa de la visión por lo tanto varía con la longitud de onda siendo el valor máximo en visión fotópica sobre 555 nm. En visión escotópica o nocturna tiene una respuesta similar, pero en este caso el máximo es sobre 500 nm.

El *flujo luminoso*  $\phi_v$  es considerado la energía por unidad de tiempo ( $dQ/dt$ ) que es radiado desde una fuente sobre las longitudes de onda del espectro visible. Si consideramos la densidad espectral como  $d\phi/d\lambda$ , podemos obtener el flujo luminoso, cuya unidad es el lumen ( $lm$ ) y definido por la siguiente expresión:

$$\phi_v = K \int_{380}^{780} V(\lambda)\phi_e(\lambda)d\lambda, \quad (2.10)$$

donde  $K = 638$  es la constante empleada para relacionar las magnitudes radiométricas con las fotométricas en condiciones fotópicas en  $lm/W$ .

La *iluminancia*  $E_v$  es la cantidad total de flujo luminoso que incide en una superficie por unidad de área. La iluminancia es equivalente a la irradiancia pero compensada con la curva de respuesta del ojo humano. La unidad estándar de iluminancia es el *lux*, el cual es definido como lumen por área ( $lm/m^2$ ):

$$E_v = \frac{d\phi_l}{dS}. \quad (2.11)$$

Se conoce como *intensidad luminosa*  $I_v$  medida en *candelas* ( $cd$ ) y equivalente a  $lm/sr$ , al flujo luminoso que emite una fuente luminosa en una determinada dirección por unidad de ángulo sólido:

$$I_v = \frac{d\phi}{d\Omega}, \quad (2.12)$$

entonces:

$$I_v = K \int_{380}^{780} V(\lambda) I_e(\lambda) d\lambda. \quad (2.13)$$

La *luminancia*  $L_v$  es la medida fotométrica de la radiancia y es definida como el flujo luminoso emitido por unidad de área proyectada y por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, se mide en  $cd/m^2$  o  $lm/m^2sr$ . Matemáticamente su expresión es la siguiente:

$$L_v = \frac{d^2\phi}{d\Omega dS \cos\theta}. \quad (2.14)$$

### 2.3. Propagación de la luz en medios ópticos, óptica geométrica

La luz es considerada una onda electromagnética transversal y se caracteriza por tener un comportamiento que responde a las ecuaciones de Maxwell. Su estudio mediante éste enfoque suele ser arduo en sistemas ópticos simples y se complica aún más en sistemas complejos, por lo que es conveniente considerar algunas aproximaciones de los fenómenos ópticos para su aplicación en los sistemas [62, 63, 64].

En los cálculos habituales empleados en los sistemas ópticos, al ser el tamaño de las longitudes de la onda que pertenecen al espectro visible mucho más pequeñas que las dimensiones de los sistemas con los que interactúan, se puede aproximar el valor de la longitud de la onda a cero. Cuando la longitud de onda es asumida cero, los efectos de difracción también tienden a cero, llegando de ésta forma a constituirse el haz de luz infinitesimal que determina el concepto de *rayo*, definido como la dirección de propagación de la energía en el límite  $\lambda \rightarrow 0$ . Con ésta aproximación entramos en la descripción del comportamiento de la luz mediante la óptica geométrica. La óptica geométrica describe la propagación de la luz a través de los medios dieléctricos o del vacío mediante hipótesis o suposiciones que permiten con suficiente precisión predecir el comportamiento de los rayos en las condiciones de contorno establecidas. Si consideramos el rayo como la línea o trayectoria que sigue la luz en su propagación, es posible representar el comportamiento de la luz en las diversas teorías desarrolladas: el rayo representaría la trayectoria de un fotón en la teoría corpuscular, la dirección de propagación de las ondas en relación al movimiento ondulatorio y la dirección y sentido del vector de Pointing en la teoría electromagnética.

La descripción de la propagación de la luz mediante el principio de Fermat o el de Huygens, nos permite desarrollar el estudio de la óptica estableciendo fundamentos geométricos.

El principio de Fermat o principio del tiempo mínimo afirma que la trayectoria que sigue un rayo de luz para ir de un punto a otro es tal que el tiempo invertido en recorrerla es mínimo. En el caso de que el medio sea homogéneo, la trayectoria es siempre recta [65]. El principio de Huygens supone un método de análisis aplicado a problemas de propagación de ondas que propone que todo punto de un frente de onda inicial puede considerarse como una fuente de ondas esféricas secundarias que se extienden en todas las direcciones con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda que el frente de onda del que proceden [36].

Mediante ambos principios pueden deducirse las leyes de la reflexión y refracción que describen el comportamiento de la luz al propagarse por medios transparentes.

### 2.3.1. Fenómenos de reflexión y refracción, ley de Snell

Cuando una onda o rayo de luz alcanza la superficie de separación de dos medios transparentes de distinta densidad se pueden producir básicamente dos fenómenos, el de la reflexión y el de la refracción.

La reflexión es el cambio de dirección que sufre el rayo al incidir en un medio de diferente composición del que proviene de tal forma que la luz regresa al medio del que salió inicialmente. La ley de reflexión establece que *el rayo reflejado por una superficie estará contenido en el plano definido por el rayo incidente y la normal a la superficie en el punto de incidencia (plano de incidencia), siendo el ángulo entre el rayo incidente con la normal, igual al ángulo entre el rayo reflejado y dicha normal ( $\theta_i = \theta_r$ )*.

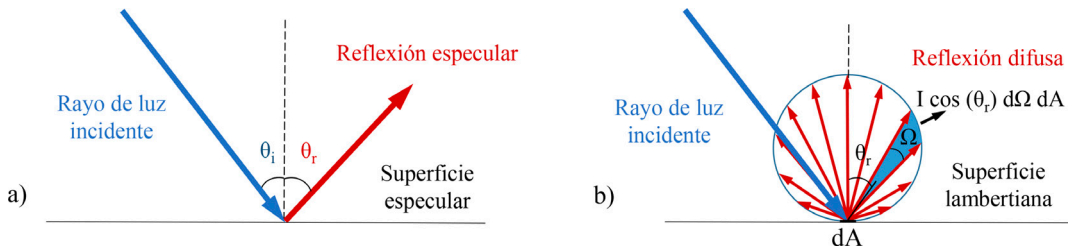


Figura 2.1: Reflexión especular en una superficie lisa (a) y reflexión difusa de un haz de luz que incide en una superficie lambertiana (b)

En una superficie pulida, la luz reflejada sale en una única dirección denominándose reflexión especular (Fig. 2.1 (a)), si no es especular la luz es reflejada saliendo en diversas direcciones dependiendo de las características del material; en éste caso se denomina reflexión difusa, pudiéndose presentar diferentes modelos de dispersión en función de la rugosidad. En el modelo de dispersión lambertiana representado en la

figura 2.1 (b) los rayos representan la intensidad luminosa en los que la radiación es reflejada por igual en todas las direcciones. Heinrich Johann Lambert caracterizó la función que define la intensidad siendo ésta proporcional al coseno del ángulo entre la normal a la superficie y el camino definido por la trayectoria del emisor radiante [66].

El fenómeno de la refracción, además de mediante el principio de Fermat puede ser explicado a través de la ley de Snell. En 1621, Willebrord Snell, observó que en función de la velocidad de la luz y al penetrar ésta en otro medio de distinta densidad del que provenía, sufría una desviación que guardaba relación con el ángulo de incidencia y con el índice de refracción del medio. La ley de Snell establece que *el rayo refractado se encontrará en el mismo plano que el definido por el rayo incidente y la normal, siendo la relación entre los senos de los ángulos de incidencia  $\theta_i$  y de refracción  $\theta_f$  inversamente proporcional a la relación de los índices de refracción:*

$$n_i \sin\theta_i = n_f \sin\theta_f. \quad (2.15)$$

### 2.3.2. Reflexión total interna

Cuando la luz llega a una superficie de separación de distintos medios donde el índice de refracción del primer medio es mayor que el índice de refracción del segundo medio ( $n < n_0$ ), según se aumenta el ángulo de incidencia, el rayo refractado se aleja cada vez más de la normal como se ilustra en la figura 2.2. El ángulo de incidencia para el cual el rayo refractado emerge tangente a la superficie se denomina *ángulo límite* o *ángulo crítico* y es definido el ángulo a partir del cual no existe refracción y toda la luz incidente es reflejada al mismo medio del que procede. Si el ángulo de incidencia es superior al ángulo límite, los rayos que inciden con un ángulo superior al límite no pasan al otro medio, sino que son "reflejados totalmente" en la superficie de separación produciéndose la reflexión total interna o *Total Internal Reflection* (TIR). El ángulo límite puede ser calculado como el ángulo de incidencia cuyo seno es igual a  $n/n_0$ .

Es necesario tener en cuenta que la reflexión de la luz en una superficie no aparece repentinamente para el ángulo límite, sino que se aproxima a la reflexión total de un modo gradual como se observa en la figura 2.2. Cuando un rayo luminoso incide en la superficie de separación de dos medios transparentes bajo un ángulo menor que el límite ( $\theta_l$ ), se producen a la vez el fenómeno de la reflexión y el de la refracción, fenómenos representados en la figura mediante los rayos 1 y 2. Según el ángulo de incidencia  $\theta_i$  aumenta, el rayo refractado se aleja cada vez más de la normal. El rayo 2 emerge rasante a la superficie formando un ángulo de refracción de  $90^\circ$ . El ángulo de incidencia para el cual de refracción es de  $90^\circ$  se denomina límite o ángulo crítico  $\theta_l$  (rayo 2); por encima de este ángulo se produce el fenómeno de la TIR.

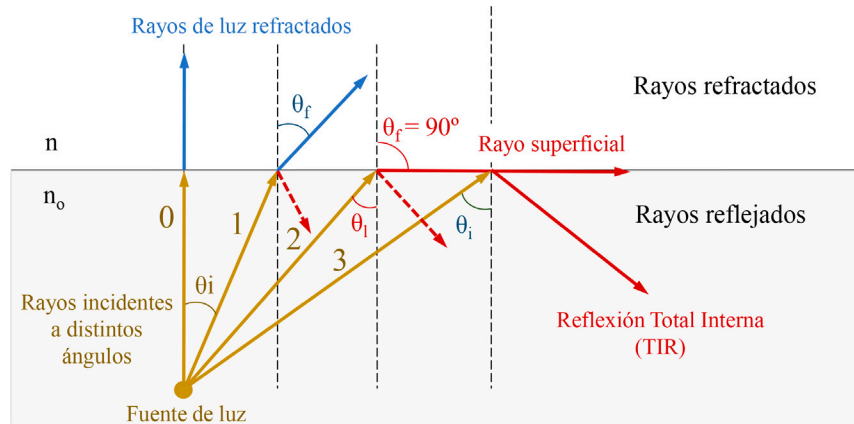


Figura 2.2: Fenómenos de propagación de luz desde un medio de índice mayor a otro medio de índice menor: ausencia de desviación (rayo 0), refracción (rayo 1), reflexión parcial (flecha discontinua), ángulo de refracción de  $90^\circ$  (rayo 2) y TIR (rayo 3)

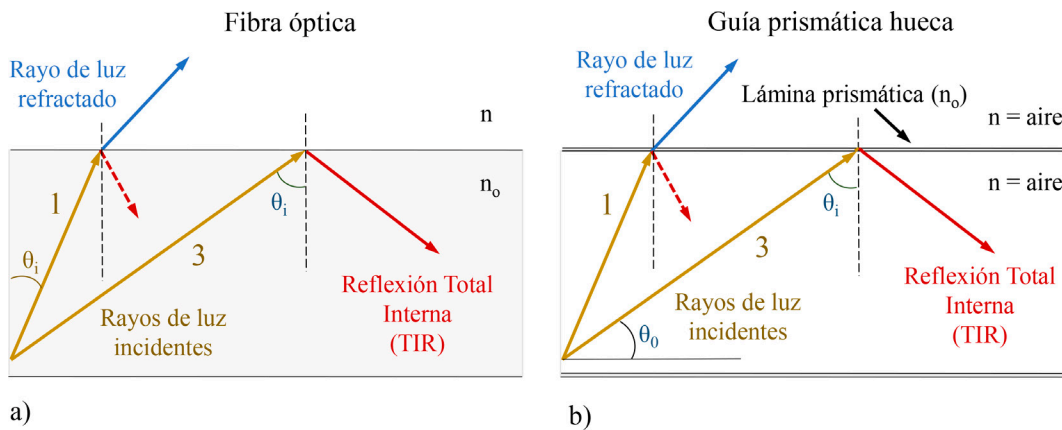


Figura 2.3: Representación de los fenómenos de la refracción (rayo 1) y de la reflexión total interna (rayo 3) al pasar desde un medio de índice mayor ( $n_o$ ) a otro medio de índice menor en el interior de una fibra óptica (a) y de una guía prismática hueca (b)

El fenómeno de la TIR es ampliamente empleado en el diseño de sistemas ópticos y aplicado en sistemas de guiado de luz en campos como la iluminación y la fotónica. La fibra óptica y las guías de luz prismáticas huecas son ejemplos de sistemas ópticos que utilizan éste comportamiento como medio de propagación de la luz (ver fig. 2.3 rayo 3). La fibra óptica es cable fino y flexible cuyo interior está compuesto por un núcleo de material plástico o vidrio de alta transmitancia (fig. 2.3 (a)) y está recubierto por un material de índice de refracción menor. La fibra óptica es muy empleada en la iluminación, además de ser utilizada en diversos campos como las

telecomunicaciones y la medicina. Las guías prismáticas huecas, son unas estructuras habitualmente cilíndricas recubiertas interiormente de una delgada lámina prismática que transmite la luz a través de largas distancias sin grandes pérdidas mediante reflexiones internas totales en el interior de su estructura como se ilustra en la figura 2.3 (b). Es habitual su aplicación como elemento de guiado de luz natural en espacios arquitectónicos en los que se hace precisa la transmisión de una gran cantidad de luz ya que permite el transporte de elevadas cantidades flujo luminoso con alta eficiencia.

## 2.4. Sistemas de guiado de luz, principios de funcionamiento

Los sistemas de guiado de luz natural están siendo utilizados ampliamente en el ámbito de la arquitectura ya que pueden enviar la luz del Sol directa y difusa hacia el interior de los espacios evitando los indeseados efectos de deslumbramiento o sobrecalentamiento [67]. Debido a las limitaciones que tiene su uso como fuente exclusiva de iluminación, se pueden hacer tres clasificaciones en función de la fuente de luz utilizada en su desarrollo:

- El primer grupo emplea la luz natural como fuente de iluminación, en éste caso las guías son denominadas sistemas de guiado de luz solar. La CIE ha fijado un comité técnico TC 3 – 38, en el que se reflejan unos estándares internacionales para regular el desarrollo de este tipo de guías [68].
- El segundo grupo incluye la luz artificial como fuente de iluminación.
- El tercer grupo es el que utiliza un sistema híbrido de iluminación que incorpora tanto la fuente de luz natural como la artificial en su desarrollo [69, 70].

El control de la iluminación en el sistema se realiza en tres partes: el sistema de captación o colector, el sistema de transporte o guiado y el sistema extractor o difusor.

### 2.4.1. Sistemas de captación de luz

El sistema colector o dispositivo de captación de luz, es el elemento sobre el cual incide la luz directa del Sol y también la difusa del cielo. El sistema colector tiene gran importancia ya que es el elemento que condiciona la cantidad de radiación dirigida hacia el interior del sistema. En ocasiones es acompañado de un concentrador que focaliza la energía solar en un área más pequeña o dirige la luz variando ángulo de incidencia en el sistema de guiado. Para definir la constitución de los sistemas de guiado de luz solar la CIE proporciona una clasificación acorde a los sistemas de captación solar:

- Cenital activo: compuesto por sistemas reflectantes como heliostatos que incorporan sistemas de seguimiento solar [71]. Los colectores activos son más eficientes pero elevan los costes del sistema, necesitan desarrollos tecnológicos adicionales para activar el movimiento y seguir la posición del Sol sobre el cielo ya que éste varía según la estación del año, el día y la hora.
- Cenital pasivo: constituido por una cúpula o domo para recoger la luz del Sol, cuenta habitualmente por patrones geométricos grabados en su material plástico para optimizar el guiado [72, 73, 74]. Los colectores pasivos suelen estar compuestos por un domo de policarbonato transparente con el mismo diámetro de la guía [75]. Son más económicos pero menos eficientes que los sistemas colectivos activos.
- Horizontal: lleva a cabo el transporte de luz en dirección horizontal en fachadas habitualmente orientadas al sur. También pueden incorporar sistemas reflectantes y refractantes con patrones geométricos o sistemas activos.

Cada uno de ellos puede estar compuesto de sistemas ópticos anidólicos o no formadores de imagen, que transmiten la luz de una manera eficiente y controlada [76].

### 2.4.2. Sistemas de guiado de luz

La segunda parte del sistema de guiado es la guía, la cual canaliza o transporta la luz captada por el colector hacia los espacios a iluminar. Existen diversos diseños de guías con variedad de materiales y geometrías: guías espejadas huecas, guías de fibra óptica y prismáticas huecas. Además de estos, otros diseños ópticos actuales, con materiales como plásticos transparentes, proporcionan novedosas alternativas de guiado [77]. En ocasiones, la superficie interna de la guía es diseñada específicamente con el objetivo de extraer parte de la luz fuera de la guía. También el cuerpo de la guía puede ser complementado con lentes, espejos o dispositivos ópticos con el fin de dirigir la luz adecuadamente [78]. El tamaño y la conformación de la guía, así como la distribución espacial de los sistemas extractores de luz, son elegidos para controlar la distribución luminosa. En el apartado 2.5 se describen brevemente diversos sistemas de guiado desarrollados.

### 2.4.3. Sistemas de extracción de luz

El componente final de la guía de luz es el sistema emisor o extractor. El sistema de extracción está compuesto de materiales plásticos, cristales y metalizados. Suele estar diseñado para obtener una óptima distribución de luz en los espacios, impedir la incidencia de la luz directa en los mismos y evitar el deslumbramiento mediante una distribución de luz adecuada [79, 80].

## 2.5. Sistemas de guiado de luz

Actualmente, los sistemas de guiado de luz están en constante desarrollo en muchos campos de conocimiento ya que constituyen un método práctico para transportar altas cantidades de flujo a lo largo de grandes distancias [67, 81]. La arquitectura, los museos, la iluminación vial y automovilística, la medicina, la señalización, la iluminación decorativa y muchos de los campos englobados dentro de nuevas tecnologías emplean el guiado de ondas del campo electromagnético visible. Sus propiedades como la ausencia de sobrecalentamiento, seguridad eléctrica y durabilidad las hacen ser un valioso recurso en la iluminación. A continuación, se realiza una breve descripción de los sistemas básicos de guiado y como principal aspecto a considerar se tratará la iluminación natural en la arquitectura mediante guías huecas debido a su enorme potencial como recurso energético y los beneficios que proporcionan en la salud.

### 2.5.1. Guías de fibra óptica

El uso y la demanda de la fibra óptica ha crecido enormemente en los últimos tiempos debido a sus numerosas aplicaciones: iluminación, telecomunicaciones, industria biomédica, telemedicina y sistemas de transporte inteligentes entre otros [82, 83].

La principal ventaja del uso de la fibra óptica en la iluminación es que la luz puede ser girada y dirigida hacia objetivos individualmente. Una característica de este tipo de sistema es que requiere una alta concentración de luz en la entrada para llevar a cabo el guiado de una forma eficiente. Las fibras ópticas están habitualmente compuestas de cristal y de materiales plásticos como silicona o polimetilmetacrilato (PMMA). A pesar de que la absorción y la dispersión son mínimos en la fibra óptica, la atenuación  $P$  de luz que indica la pérdida de potencia a través del medio y se expresa en decibelios (dB), se acumula resultando en un decrecimiento exponencial [84]. La atenuación expresada en decibelios es definida como:

$$\text{Atenuación}_{dB} = -10 \times \log_{10} \frac{P_s}{P_e}.$$

donde  $P_e$  y  $P_s$  son definidas como la potencia de entrada y de salida respectivamente.

### 2.5.2. Guías huecas

Las guías de luz huecas se encuentra entre los sistemas más utilizados de guiado con mínimas pérdidas pudiendo funcionar como una luminaria de alta eficacia. Son tubos que permiten transportar la luz hacia zonas que requieren una mayor intensidad luminosa y calidad minimizando el uso de la iluminación artificial. Están compuestas de materiales de alta reflectancia en el interior de sus superficies como recubrimientos de aluminio con alto grado de reflectancia que suele variar entre 0.95 y 0.995 o láminas microprismáticas. La luz es guiada en su interior para multitud

de ángulos de incidencia y longitudes de onda dentro del rango espectral de interés. Las modificaciones realizadas en la reflectancia espectral de su superficie proporciona cambios en la distribución espectral de la radiación transmitida. La transmitancia en la guía dependerá de la longitud de la guía, del ángulo de incidencia y del contenido de la radiación difusa de la luz incidente ya que estos parámetros determinan el número de reflexiones que sufrirán los rayos [85, 30, 86]. La mayoría de las guías tienen formas circulares o rectangulares, aunque las guías cilíndricas son más fáciles de instalar y requieren menor material por lo que son más económicas.

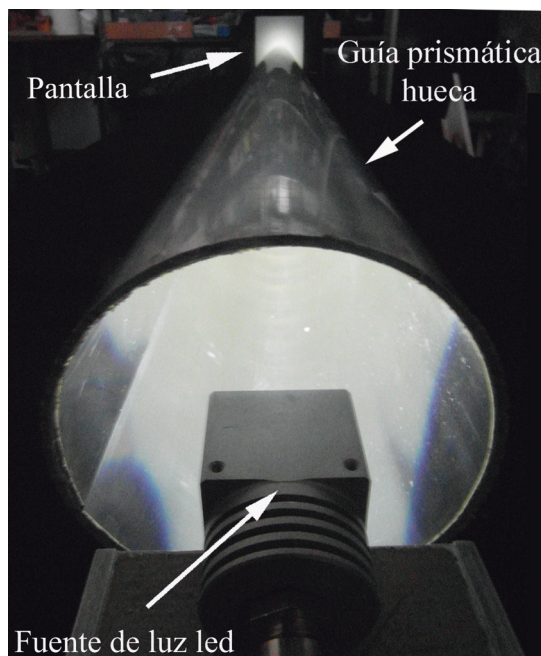


Figura 2.4: Guiado de luz a través de una guía cilíndrica prismática hueca

### 2.5.2.1. Guías prismáticas huecas

Dentro de la clasificación de las guías huecas, las guías prismáticas ofrecen una innovadora alternativa con mínimas pérdidas y excelente calidad. Gracias a la geometría microprismática de la lámina que las compone y su alto grado de transparencia, gran parte de la luz es dirigida a través del interior de la guía mientras que otra parte sale hacia el exterior. Las guías de luz prismáticas huecas permiten modificar la dirección de la luz incidente y dirigirla siguiendo las leyes de la refracción y la reflexión. El funcionamiento básico de una guía cilíndrica se representa en la figura 2.5.

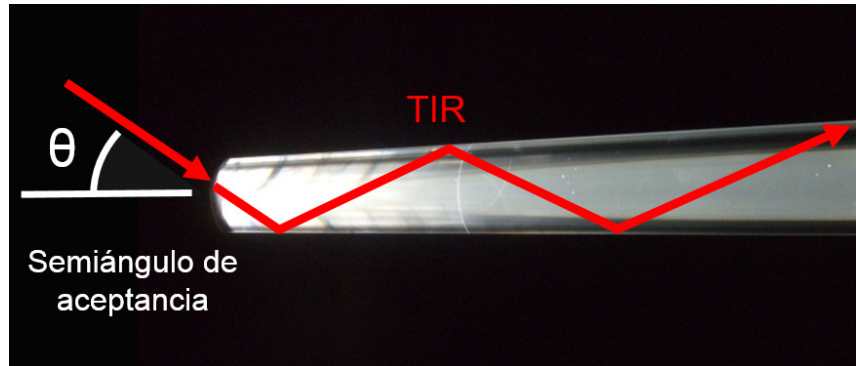


Figura 2.5: Transmisión de la luz del día a través de la guía cilíndrica prismática

### 2.5.2.2. Lámina prismática de alta reflectancia

La lámina prismática que compone la guía prismática es un elemento óptico de material plástico de alto grado de transparencia con funciones de guiado de luz gracias a su configuración geométrica. Una de las superficies que la compone es plana y la otra está compuesta por microestructuras prismáticas cuyas superficies están inclinadas  $45^\circ$  respecto de la superficie plana (Fig. 2.6). Este diseño proporciona un guiado de luz bajo el principio óptico de la reflexión total interna (TIR). La lámina prismática puede ser empleada reemplazando a los recubrimientos metálicos para una determinada configuración angular de incidencia de luz sobre la superficie plana.

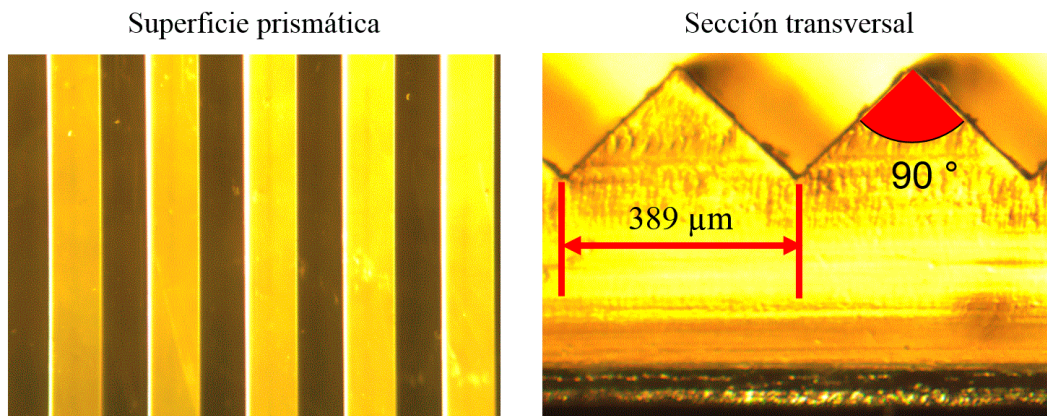


Figura 2.6: Imagen microscópica de la lámina prismática. Superficie prismática (izquierda) y sección transversal (derecha)

La figura 2.6 muestra diferentes perspectivas de una lámina prismática: una vista en planta de la superficie prismática (a) y un corte de la lámina que muestra la

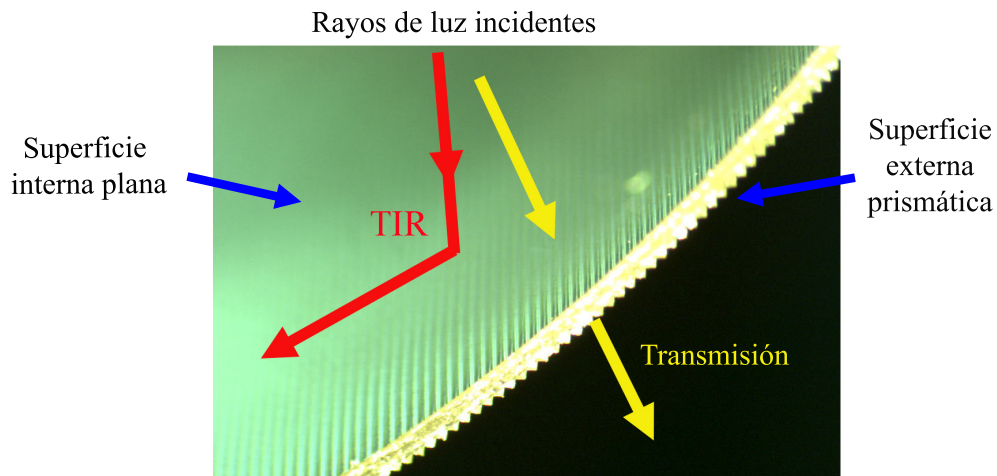


Figura 2.7: Representación de rayos en una lámina prismática que sufren reflexión total interna (TIR) en color rojo y transmisión en color amarillo

sección transversal (b). En la figura 2.7 se muestra una representación de dos rayos de luz incidiendo en la superficie plana de una lámina prismática. La luz reflejada mediante TIR que pertenece al haz de rayos que entra dentro del ángulo de aceptación de la lámina es representada en rojo. La luz refractada que no cumple el ángulo de aceptación es representada en amarillo. El principio de la TIR es el principio básico de guiado empleado en guías de luz prismáticas huecas.

## Capítulo 3

# Iluminación con guías de luz prismáticas huecas

Controlar la iluminación natural en las construcciones es fundamental para la mejora de la calidad, el aumento del confort de los ocupantes, la disminución del consumo energético y la reducción de los costes. Por lo tanto, el uso de la luz natural es un requerimiento básico en una arquitectura sostenible orientada al usuario y las guías de luz prismáticas huecas son elementos ópticos que proporcionan alternativas de diseño para conseguirlo. La aplicación de la luz natural en espacios arquitectónicos hace precisa la transmisión de una gran cantidad de flujo luminoso con eficiencia y alto rendimiento. El guiado óptico de la luz es uno de los sistemas que presenta prometedoras aplicaciones a la vez que grandes restricciones.

En este capítulo se presentan varios desarrollos ópticos que permiten obtener importantes mejoras en la transmitancia de flujo luminoso mediante el uso de láminas prismáticas como elemento de guiado. Por un lado, se presenta el diseño de un sistema óptico de guiado de luz de grandes dimensiones aplicado a la edificación que permite una extracción de luz de manera controlada en un edificio de oficinas. Por otro lado, se muestra un diseño óptico que permite dirigir la luz en los giros de las guías de luz huecas incrementando la eficiencia respecto del diseño estándar. También se muestran diversos estudios colorimétricos con guías de diversas geometrías y materiales.

### 3.1. Diseño de un sistema extracción de luz aplicado a la edificación

En el siguiente apartado se muestra el diseño óptico de un sistema de iluminación que dirige la luz natural hacia el interior de las construcciones y permite equilibrar el flujo en los distintos espacios de manera eficiente en busca de una construcción sostenible. El objetivo principal del modelo es la obtención de unos niveles de iluminación

adecuados y una correcta distribución luminosa en los espacios del edificio. En la figura 3.1 se muestra un ejemplo de aplicación del sistema de guiado y extracción en un edificio de oficinas construido [87].



Figura 3.1: Sistema de extracción de luz construido en un edificio de oficinas

### 3.1.1. Configuración del sistema vertical de guiado y extracción de luz, edificio de oficinas

El primer paso en el diseño de un sistema óptico, es determinar el modelo que cumpla las especificaciones requeridas. La definición del modelo en este caso, ha sido determinada por la búsqueda de un diseño que equilibre los niveles de flujo y la distribución luminosa en las distintas plantas un edificio de oficinas según las dimensiones fijadas.

El sistema vertical de guiado y extracción de luz se ha realizado con la ayuda de programas de modelado 3D y mediante la configuración de diversos posibles sistemas que permitan cumplir los objetivos propuestos. Estas configuraciones incluyen que incorporación de diversos elementos en el sistema como son el de captación, de guiado y extracción o elementos ópticos adicionales. Posteriormente se han realizado cálculos de flujo luminoso de las diversas configuraciones mediante el empleo de un software de trazado de rayos basado en el método de Monte Carlo [32]. El análisis de sistemas ópticos mediante este método permite realizar cálculos de iluminación en los sistemas utilizando los principios de la óptica geométrica con métodos estadísticos en los que la propagación de un fotón se define en forma de funciones de densidad de probabilidad. El método de Monte Carlo, proporciona una solución a sistemas complejos en los que la propagación de la luz se lleva a cabo en distintos medios,

simulando mediante trazado de rayos fenómenos como la reflexión, la transmisión, el escátering y la absorción de la luz. El análisis de los resultados ha permitido realizar modificaciones y ajustes en los parámetros de diseño para optimizar los resultados según los requerimientos.

El diseño óptico final consta de un sistema captador, un sistema de guiado y un sistema extractor. La figura 3.2 muestra una representación del alzado del edificio de oficinas que incorpora una guía de luz hueca con el objeto de aportar flujo lumínico a las zonas más alejadas de la fachada. El sistema captador está compuesto por dos heliostatos esféricos móviles de 0.9 m de diámetro cada uno, que reflejan la radiación solar, hacia la superficie de entrada de una guía cilíndrica de 2 m de diámetro y 16.7 m de longitud.

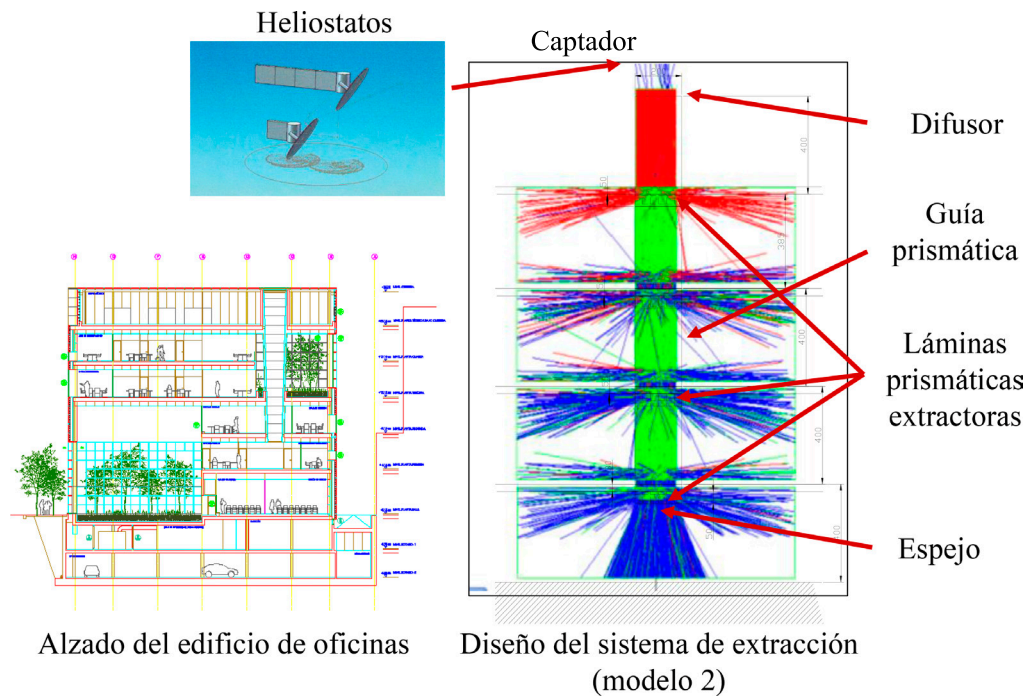


Figura 3.2: Alzado del edificio de oficinas, configuración de los heliostatos y sección del trazado de rayos de la simulación óptica con el sistema de guiado y extracción de luz mostrando los distintos elementos que lo componen

Una lámina difusora transparente se sitúa en la entrada de la guía para dispersar la luz uniformemente. Esta lámina proporciona una curva de distribución luminosa determinada por una Función de Distribución Bidireccional de Transmitancia (BTDF) que permite optimizar al máximo el sistema. La figura 3.3 muestra el dia-

grama fotométrico rectangular (a) y polar (b) de la lámina difusora empleada en las simulaciones con trazado de rayos. El comportamiento de los rayos a través de la lámina mediante el trazado de rayos con software es representado en el apartado (c).

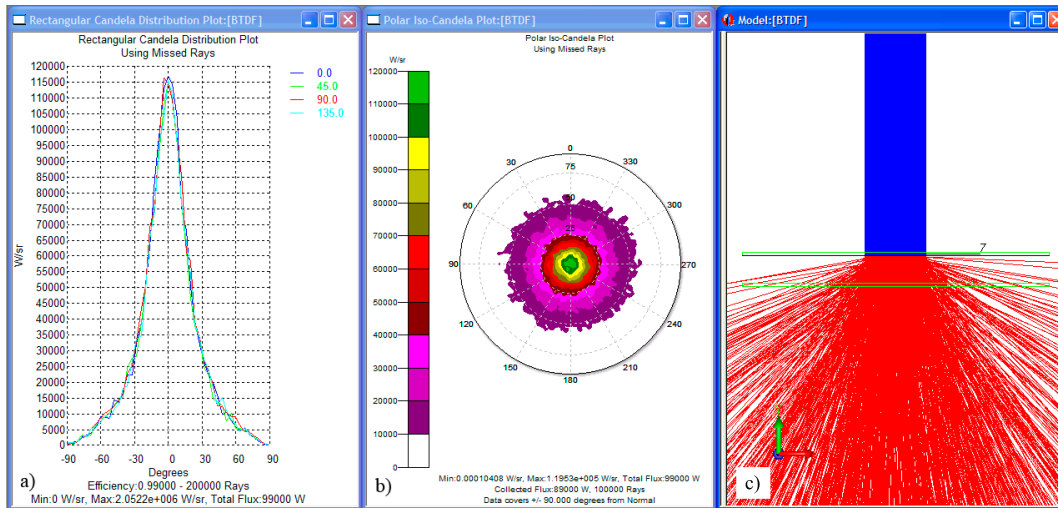


Figura 3.3: Diagramas fotométricos rectangular (a) y polar (b) que muestran el comportamiento de la lámina difusora empleada en las simulaciones con el trazado de rayos (c)

El sistema óptico vertical que realiza las funciones de guiado y extracción de luz consta de una guía prismática hueca con una capa perimetral que usa dos tipos de láminas prismáticas transparentes sin la necesidad de elementos adicionales exteriores ni interiores para su correcto funcionamiento [88, 89]. Para conseguir este fin, la lámina que realiza la función de guiado de luz, tiene los vértices de los prismas posicionados longitudinalmente respecto al eje de la guía y dirigidos hacia el exterior como se muestra en la figura 3.4. La lámina que realiza las funciones de extracción, los tiene situados transversalmente al eje de la guía y orientados hacia su interior.

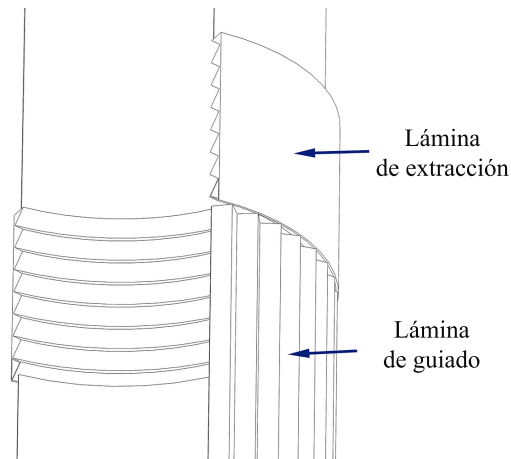


Figura 3.4: Guía de luz prismática con detalle de la lámina prismática que funciona como sistema de extracción de luz

La guía cilíndrica por lo tanto está formada por dos tipos de láminas prismáticas, una de ellas transporta la luz mediante TIR y tiene un ángulo en sus prismas de  $90^\circ$  los cuales se disponen coincidiendo longitudinalmente con el eje de la guía cilíndrica, la otra lámina, cuyos prismas son de  $70^\circ$  se encuentran contenidos en un plano perpendicular al eje del cilindro actuando como elemento extractor de luz. La configuración angular de la lámina es definida para conseguir una distribución de la luz adecuada en los diversos espacios según la radiación incidente. Por último, un espejo (Miro 20) se sitúa al final de la guía, proporcionando una mejora en la distribución de luz de la planta baja del edificio.

El software de trazado de rayos, permite validar el comportamiento óptico del sistema y definir el diseño cuantificando la cantidad de flujo y la distribución luminosa en los distintos espacios. En las simulaciones ópticas mediante software de trazado de rayos, el edificio se divide en cuatro plantas de idénticas áreas (21 m x 21 m) con una altura de 3.850 m para cuantificar el flujo extraído en las distintas plantas.

La radiación solar que incide en el sistema óptico depende de diversos factores como son las coordenadas geográficas en las que se sitúa la superficie de captación solar, el posicionamiento del Sol a lo largo del día y la composición y estado de la atmósfera. Las coordenadas geográficas de referencia que se toman en el estudio coinciden con la Isla de la Cartuja en Sevilla (España) son  $37.41^\circ 24' 48.497''$  latitud norte y  $5^\circ 59' 57.348''$  latitud oeste y es el lugar donde se ha construido un edificio de oficinas destinado a la Agencia Andaluza de Energía. La posición del Sol está definida por el ángulo de elevación y el azimut. Los ángulos de elevación solar que abarcan distintos periodos estacionales se indican en la tabla 3.1. También se muestran los

niveles de iluminación proporcionados por el Sol y el aporte de dos elementos en base a los cuales se ha realizado el estudio: el Sol directo y los heliostatos.

	Invierno (9 y 15 h)	Verano (8 y 16 h)	Verano (11 y 13 h)
Elevación (°)	16	40	72
Acimut (°)	45	90	45
Iluminación Sol (Klx)	15	62	98
Flujo heliostatos (Klm)	9.19	26.67	15.60
Flujo Sol directo (Klm)	9.90	95.42	223.16
Flujo total (Klm)	19.09	122.09	238.76

Tabla 3.1: Datos de iluminancia y luminancia del modelo solar empleado para diferentes ángulos de elevación solar en invierno y verano

Las cantidades de flujo luminoso que recibe el área de entrada de la guía por parte de los heliostatos  $\theta_h$  y el Sol directo  $\theta_{Sol}$  se calculan según las expresiones:

$$\theta_h = E S_e 0.8 \operatorname{sen}\left(45 - \frac{h}{2}\right), \quad (3.1)$$

$$\theta_{Sol} = E S_g \operatorname{sen}(\vartheta_{elev}), \quad (3.2)$$

donde  $S_e$  representa la superficie de los heliostatos y  $S_g$  la de la entrada de la guía,  $E$  es la iluminancia del Sol a una altura  $h$  y  $\vartheta_{elev}$  es la altitud solar o ángulo de elevación.

### 3.1.2. Evaluación del flujo luminoso del sistema de extracción prismático

Con el propósito de evaluar la influencia del sistema extractor, se ha comparado la distribución de flujo luminoso obtenido mediante dos modelos de guías prismáticas. El primer modelo denominado Modelo 1, representa una guía hueca prismática formada por la lámina de prismas de  $90^\circ$  sin la contribución de ningún sistema extractor. En el segundo modelo denominado Modelo 2, es incorporado el sistema extractor de luz compuesto por dos láminas transparentes de 0.5 metros de anchura en cada planta formadas por la estructura prismática de  $70^\circ$  cuyo eje es perpendicular al de la guía. Estas láminas están situadas en la parte superior e inferior del segundo y tercer piso con objeto de incrementar el flujo de luz de los pisos intermedios a la vez que se controla el deslumbramiento. En la figura 3.5 se muestra una maqueta experimental de la guía cilíndrica. En el apartado (a) se aprecia la diferencia en intensidad entre las dos superficies emisoras. En el apartado (b) se puede observar la direccionalidad de los rayos que salen del sistema extractor.

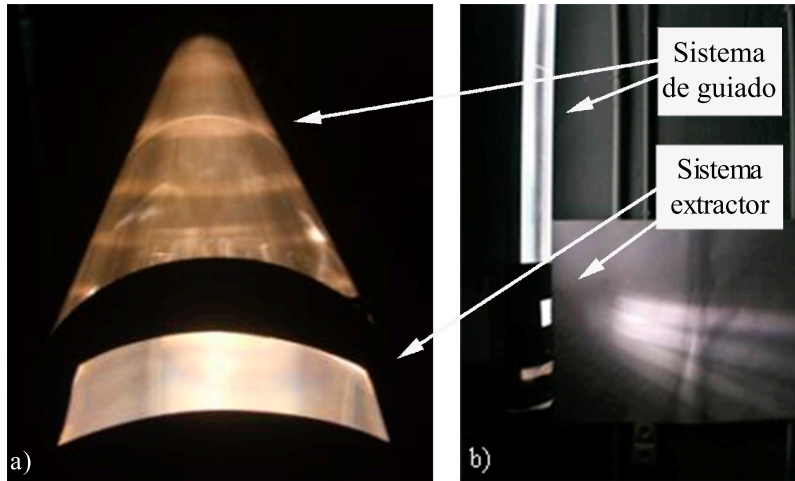


Figura 3.5: Maqueta experimental del sistema extractor. Vista frontal (a) y vista lateral (b)

El flujo luminoso obtenido en las diferentes plantas del edificio bajo la influencia de los modelos solares descritos en la tabla 3.1 se muestra en la figura 3.7 detallando la contribución del Sol y de los dos heliostatos. El apartado (a) se representa el flujo obtenido en el Modelo 1, es decir, en la guía prismática hueca y en el apartado (b) el resultado obtenido en el Modelo 2, en el que se aprecia un incremento de flujo en los pisos intermedios respecto del Modelo 1 gracias a la contribución del sistema extractor, que proporciona un reparto más equitativo de la luz a lo largo del sistema. La figura 3.6 muestra el trazado de rayos de ambos modelos.

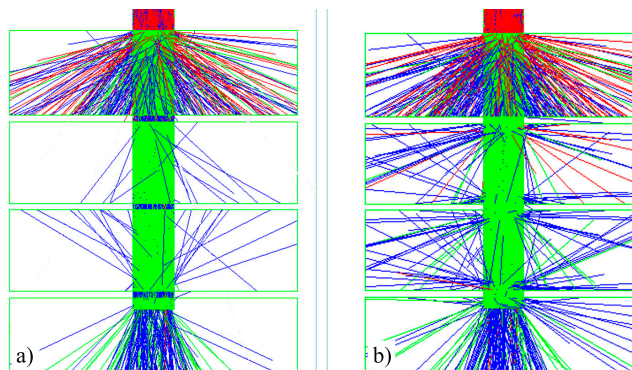


Figura 3.6: Sección del trazado de rayos en el sistema. Modelo 1 (a) y Modelo 2 (b)

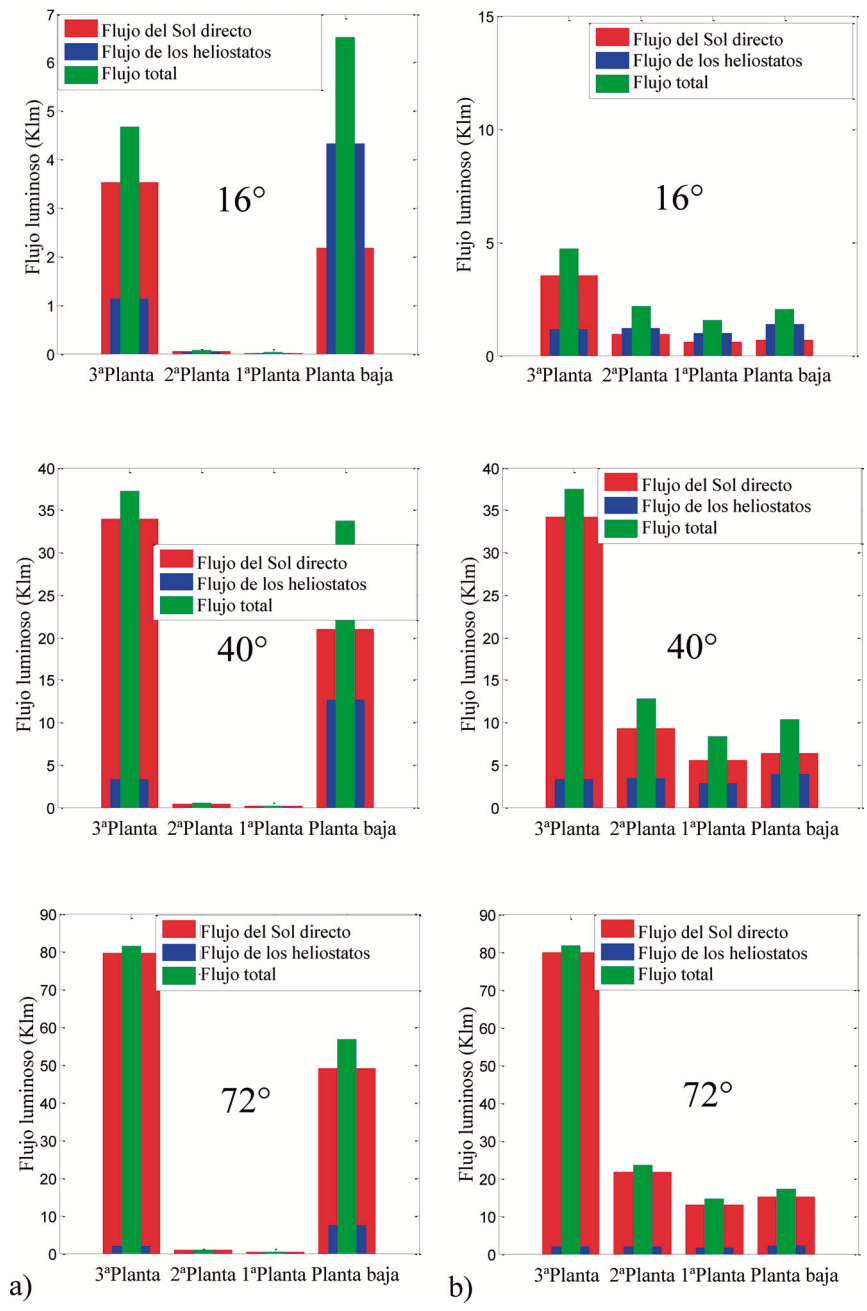


Figura 3.7: Flujo luminoso en distintos ángulos de elevación (15°, 40° y 72°) en el modelo 1 (a) y 2 (b)

Siendo la eficiencia  $T_g$  del sistema definida como:

$$T_g = \frac{\phi_d}{\phi_i}, \quad (3.3)$$

donde  $\phi_d$  es el flujo a la salida y  $\phi_i$  es el flujo a la entrada de la guía. Es posible determinar el ratio de eficiencia  $R_e$ , comparando la eficiencia obtenida en el Modelo 2  $T_{m2}$  respecto del obtenido en el Modelo 1  $T_{m1}$ :

$$R_e = \frac{T_{m2}}{T_{m1}}, \quad (3.4)$$

En la tabla 3.2 se muestra el ratio de eficiencia en cada una de las plantas del edificio (P1, P2, P3) en tres posiciones solares. El ratio obtenido es entre 23 y 64 veces mayor en la primera y segunda planta con el sistema de extracción incorporado.

Posición solar		Ratio de eficiencia (%)		
Elevación	Azimut	P3	P2	P1
(°)	(°)	(%)	(%)	(%)
16	45	100.68	3057.89	6417.28
40	90	100.50	2531.52	5021.47
72	45	99.98	2267.79	4225.62

Tabla 3.2: Ratio de flujo luminoso del Modelo 2 respecto del Modelo 1 en cada una de las plantas del edificio (P1, P2, P3) para varias posiciones solares

### **Ventajas de la guía prismática hueca con la incorporación del sistema de extracción: Modelo 2**

El Modelo 2 permite obtener las ventajas que a continuación se enumeran:

- Extracción de la luz controlada a lo largo de la guía que incrementa el flujo luminoso en las plantas intermedias de un edificio de oficinas
- Guiado de luz en medios transparentes que proporciona una estética óptima
- Alta eficiencia
- Peso reducido al ser una guía hueca

Por lo que concluimos que mediante la incorporación de elementos extractores adecuadamente diseñados, es posible proporcionar mejoras en la iluminación natural de las construcciones para un amplio rango de posiciones solares. El guiado de luz depende estrechamente de la configuración óptica de los componentes así como de la longitud de la guía.

### 3.2. Sistema de guiado de luz de alta eficiencia mediante codo ajustable

El principal objetivo de las guías huecas en iluminación es transmitir la luz de una manera eficaz a través de largas distancias. En muchas ocasiones, debido a los límites espaciales que existen en la arquitectura existe la necesidad de girar el haz de luz y por lo tanto es necesario doblar la guía [90]. Este hecho condiciona que se ocasionen grandes pérdidas de flujo luminoso en los codos o giros de las guías huecas, lo cual supone un gran inconveniente para la eficiencia en el guiado a la vez que una enorme restricción en el diseño de estos sistemas aplicados en la arquitectura.

El diseño estándar comercialmente empleado en los giros está formado habitualmente por la rotación de las piezas de aluminio que lo componen, construyéndose codos con ángulos en el intervalo de  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$ . La configuración geométrica de un codo estándar produce una distribución espacial de la radiación luminosa inadecuada que deriva en numerosas pérdidas de luz laterales y un aumento del número de reflexiones en el sistema de guiado. Este fenómeno es representado en la figura 3.8 en la que se aprecia el comportamiento de los rayos de luz en color rojo al atravesar un codo estándar de  $90^\circ$ .

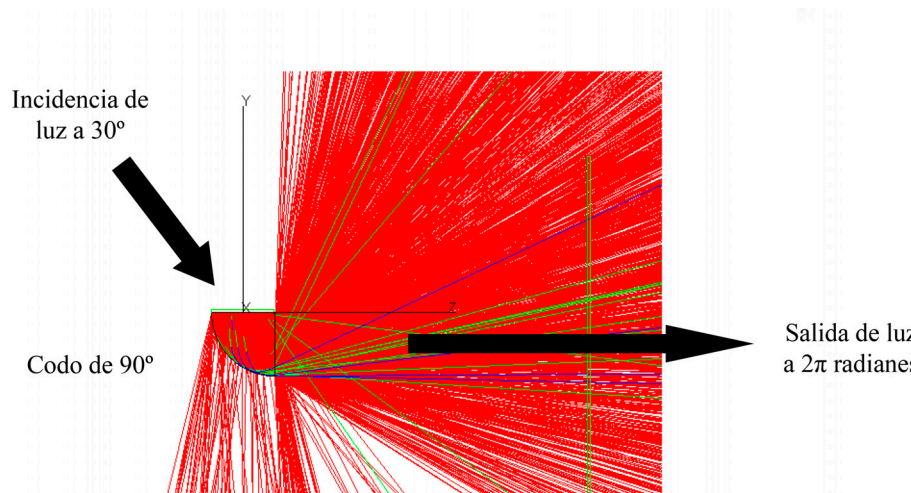


Figura 3.8: Comportamiento de los rayos de luz en un sistema óptico formado por una guía prismática hueca acoplada a un codo estándar de  $90^\circ$

Debido a estas limitaciones del comportamiento de la luz en los sistemas de guiado, surge la necesidad de mejorar el diseño de los codos con el fin de aumentar el transporte de flujo luminoso. El principal objetivo del diseño presentado en éste capítulo, es el desarrollo de un sistema óptico que permite lograr una elevada eficiencia en el guiado de luz en codos de  $90^\circ$  de guías huecas [91].

### 3.2.1. Diseño y caracterización del codo de 90°

En el diseño del codo, hay que tener en cuenta los parámetros clave que condicionan la eficiencia en las guías de luz cilíndricas huecas que son la relación de aspecto y la reflectancia del material. En el caso de las guías de aluminio, la eficiencia está condicionada por la reflectancia especular de la superficie y en el caso de las guías prismáticas, por el ángulo crítico que determina las reflexiones totales internas, a partir del cual, gran parte de la luz atraviesa la lámina saliendo al exterior. El ángulo crítico de las guías prismáticas depende de la composición del material plástico de la lámina prismática [31].

El diseño del codo (llamado codo UCM), basado en el Concentrador Parabólico Compuesto (CPC) [92], permite captar la luz con un ángulo de aceptación definido por la configuración geométrica parabólica. El concentrador diseñado ha sido generado a partir de la caracterización de dos de sus parámetros geométricos que determinan un acoplamiento óptico óptimo del CPC con la guía prismática. El primer parámetro es el tamaño del diámetro de apertura mayor del CPC, indicado en la figura 3.9 como el segmento CD y coincide con el tamaño del diámetro de la guía prismática empleada. El segundo parámetro corresponde al ángulo definido por el eje de la parábola del concentrador con respecto al eje principal, es el ángulo que condiciona la aceptación angular del concentrador y es denominado  $\theta_c$ . El ángulo  $\theta_c$  del CPC ha sido configurado en concordancia con el ángulo determinado para un guiado óptimo en las guías prismáticas y es  $\theta_g = 30^\circ$ . La figura 3.9 muestra un esquema del sistema óptico compuesto por el CPC y la guía prismática. La correspondencia entre el ángulo de aceptación del CPC con el de la guía prismática, determina una elevada captación de luz y un óptimo guiado.

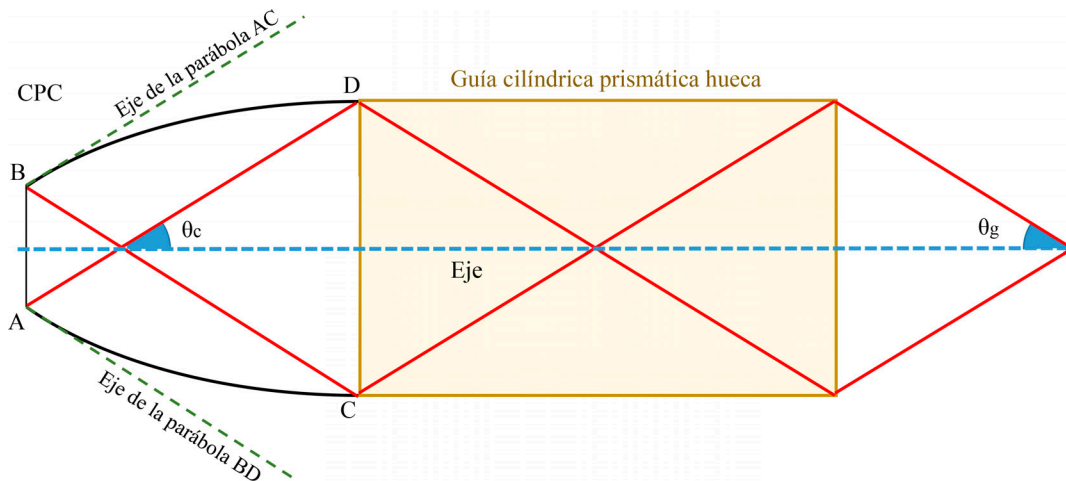


Figura 3.9: Configuración del sistema óptico formado por una guía prismática y un CPC de  $30^\circ$

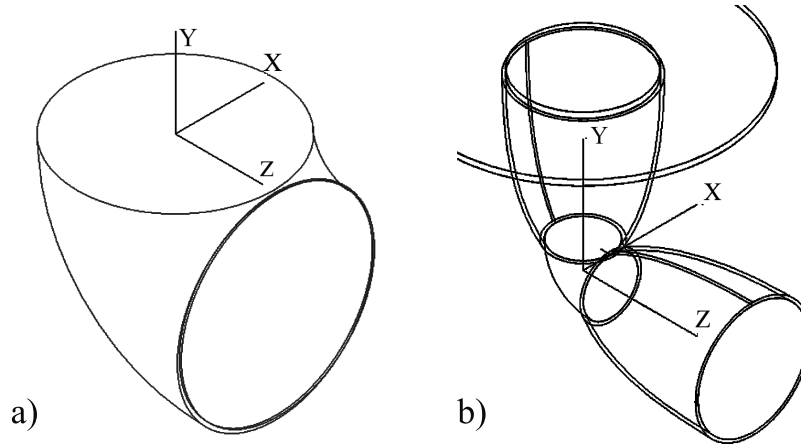


Figura 3.10: Codo estándar (a) y Codo UCM (b)

La figura 3.10 (a) representa el codo de  $90^\circ$  estándar, configurado mediante una adaptación del material que compone la guía al ángulo de giro. El codo UCM representado en la figura 3.10 (b) está compuesto por dos CPCs unidos por su diámetro de apertura menor (segmento AB en la figura 3.9) con un codo estándar. A través de ésta configuración, el flujo es transferido de una manera eficiente, ya que se mantiene el ángulo de aceptación a la entrada y a la salida del sistema.

El diseño del codo UCM permite adaptar el guiado de luz a diversas configuraciones angulares ya que se mantiene la razón básica de funcionamiento del sistema óptico.

### 3.2.2. Rendimiento del codo de $90^\circ$ mediante software de trazado de rayos

Para evaluar la eficiencia del codo UCM, se ha calculado el flujo transmitido mediante un programa de trazado de rayos con luz colimada a distintos ángulos de incidencia. El rendimiento de ambos sistemas se ha estimado mediante el cálculo de la eficiencia  $T_c$ , definida como la relación entre el flujo radiante emitido a la salida del sistema  $\phi_s$  respecto del flujo de entrada  $\phi_e$ :

$$T_c = \frac{\phi_s}{\phi_e}, \quad (3.5)$$

En la figura 3.11 se muestra la eficiencia de transmisión (Eq. 3.5) en los dos ejes perpendiculares, el eje YX y el eje YZ. La eficiencia del sistema es óptima dentro del ángulo de aceptación del CPC fijado en  $30^\circ$ , obteniéndose un rendimiento de aproximadamente 80.5% para una reflectancia del material de 94.8%, una absorptancia del 5% y un pequeño resto debido a la dispersión que sufre la radiación al incidir en la superficie y que sigue un patrón dictado por la BRDF. La distribución angular

de la intensidad radiante que proporciona el codo UCM es importante para poder cuantificar el flujo que será transportado a través de las guías.

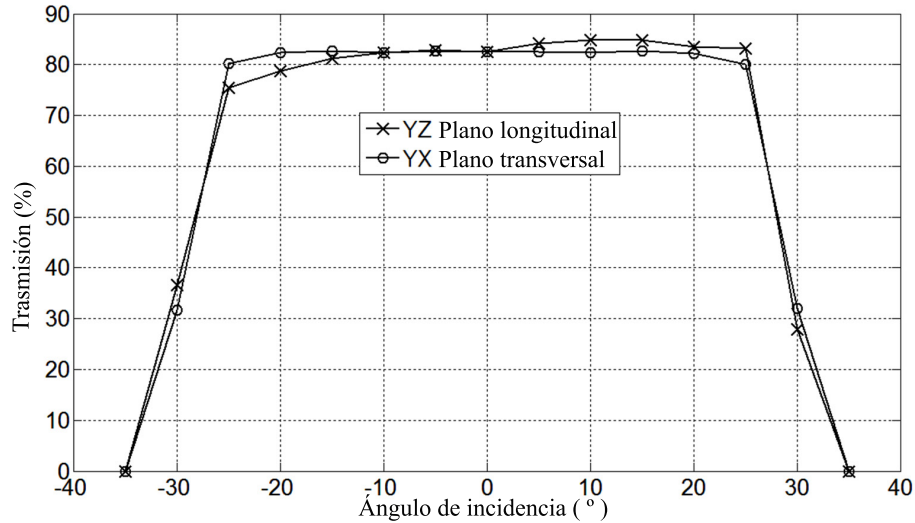


Figura 3.11: Eficiencia angular en el codo UCM en los dos planos principales

La figura 3.12 muestra un diagrama polar de la distribución del flujo radiante a la salida en ambos sistemas, el codo estándar en (a) y el codo UCM en (b). El codo estándar proporciona el 50% del flujo incidente en un ángulo de 15°, sin embargo, en el nuevo sistema presentado, la luz es más colimada obteniéndose el 50% del flujo dentro de los 5° centrales. La eficiencia total en el codo UCM es de 80.6% y el flujo está altamente concentrado en los 30° centrales con objeto de ser guiado a través del sistema prismático. A pesar de que la eficiencia total del codo estándar a la salida es mayor ( $\simeq 92.5\%$ ), la gran dispersión del flujo que existe indica unos elevados ángulos a la salida que produzcan un incremento del número de reflexiones de la luz en los sistemas de guiado por lo que la cantidad de flujo transportado se reducirá.

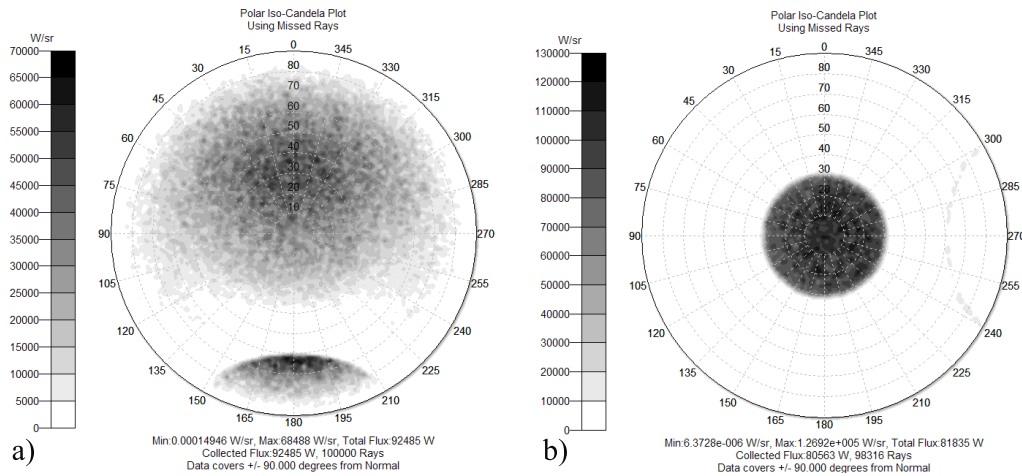


Figura 3.12: Distribución angular de luz a la salida en el codo estándar (a) y en el codo UCM de  $30^\circ$  (b)

La función principal del codo UCM es colimar la luz a la salida con un semiángulo de  $30^\circ$ , de esta forma se consigue minimizar el número de reflexiones que se producirán en el sistema de guiado prismático acoplado aumentando el flujo transmitido.

### 3.2.3. Rendimiento de codo con guías especulares

Mediante software de trazado de rayos, se ha analizado el rendimiento del codo UCM y del codo estándar con una guía de aluminio acoplada a la salida de ambos. Para el análisis, una fuente de luz cuyo semiángulo de emisión es de  $30^\circ$  se ha situado a la entrada del codo proporcionando una distribución de luz uniforme.

La eficiencia calculada mediante la relación que muestra la ecuación 3.5 aumenta de forma significativa en el sistema del codo UCM debido a que responde mejor a las condiciones angulares de guiado exigidas en las guías de aluminio como se observa en los resultados obtenidos (Fig. 3.13 (a)).

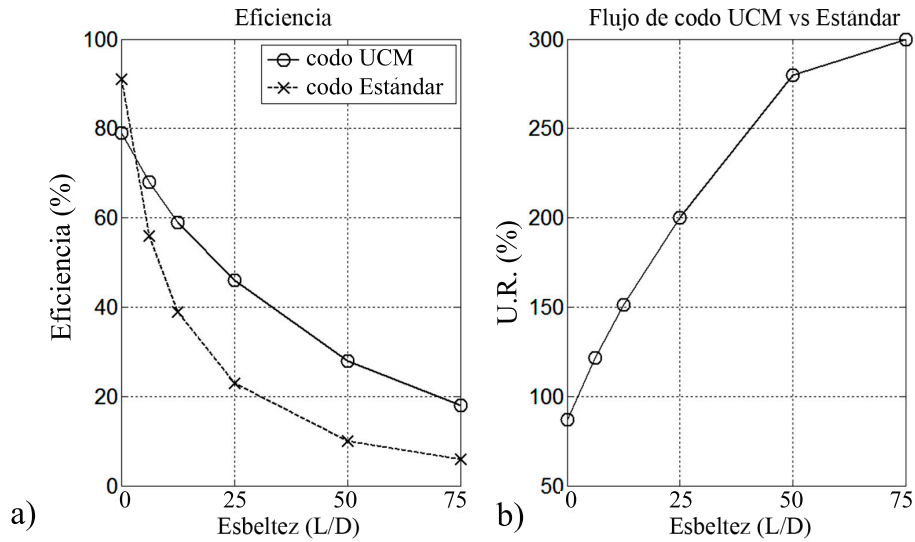


Figura 3.13: Flujo vs. esbeltez en sistemas de codo con guía de aluminio. Eficiencia normalizada en (a) y flujo del codo UCM en relación con el estándar en (b)

El ratio de eficiencia del codo UCM respecto del estándar se muestra en la figura 3.13 (b), como se puede observar, disminuyen las pérdidas y aumenta la eficiencia del sistema debido a la reducción del número de las reflexiones que sufre la luz. La mejora de flujo obtenida con el codo UCM en una esbeltez  $\rho$  (definida como la relación de longitud entre diámetro) de 25 es de 200 %, en el caso de una esbeltez de 75 se obtiene un incremento de 300 % respecto del codo estándar.

### 3.2.4. Rendimiento en guías prismáticas con codo de 90°

En esta sección se comprueba experimentalmente la transmisión de flujo radiante del codo UCM y del codo estándar con guías de luz prismáticas. Con el objetivo de sopesar la viabilidad del sistema UCM y medir la eficiencia de ambos codos en un sistema real, se han reproducido los dos modelos a escala en laboratorio. Para ello, se han fabricado prototipos experimentales del codo estándar y el codo UCM de 90°. El codo UCM ha sido diseñado con un ángulo de aceptación de 30° para aprovechar al máximo el ángulo necesario para un guiado óptimo en las guías prismáticas. Ambos sistemas se han aluminio mediante una deposición al vacío para obtener el mismo grado de reflectancia, que puede ser mejorable aplicando un tratamiento especializado. La figura 3.14 muestra el guiado de un haz de luz en la superficie interna del codo UCM.

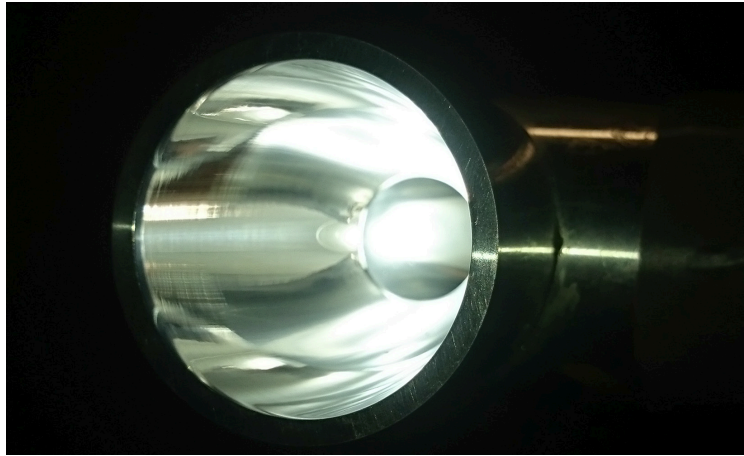


Figura 3.14: Interior del codo UCM

La figura 3.15 representa el esquema del sistema experimental en el que dos guías de luz huecas prismáticas A y B son unidas mediante un codo de 90°. La primera guía tiene una longitud de 0.75 m y la segunda tiene una longitud de 1.5 m, siendo el diámetro de ambas de  $4.5 \cdot 10^{-2}$  m. En el montaje se ha incorporado una fuente de luz LED (Lumiled LXHL-PW01) a la entrada de la guía prismática A proporcionando un cono con una distribución energética angular de 60°. El flujo obtenido en las posiciones 1, 2 y 3 se ha analizado mediante una pantalla lambertiana difusora en transmitancia y un vídeo fotómetro CCD (Radiant Imaging Prometric 1400).

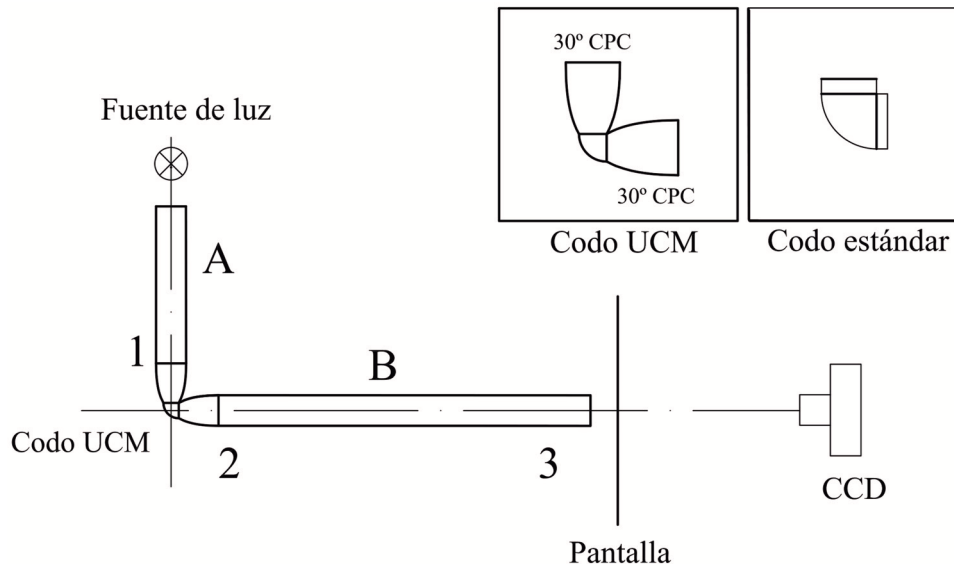


Figura 3.15: Esquema del sistema experimental de guiado con codo

La figura 3.16 muestra una imagen del montaje experimental del codo UCM de  $90^\circ$  en el sistema de guiado prismático.

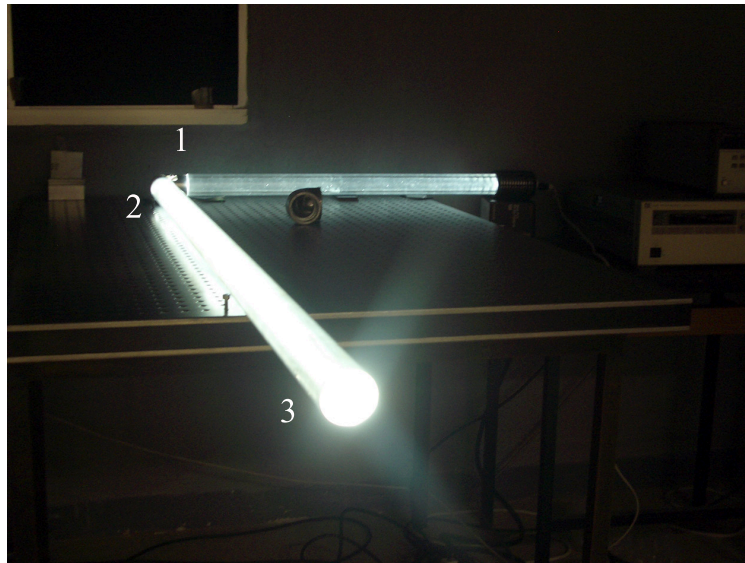


Figura 3.16: Montaje experimental con el codo UCM que muestra el guiado de luz a lo largo del sistema prismático

El mapa de irradiancia en grados obtenido al final de la primera guía y antes de cada codo (posición 1) se representa en la figura 3.17. La distribución angular a la salida está condicionada por la distancia de la pantalla a la salida del sistema.

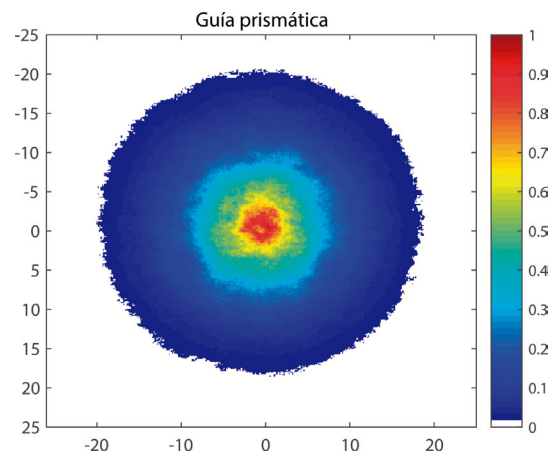


Figura 3.17: Mapa de irradiancia normalizado obtenido a la salida de la primera guía (posición 1)

Las figura 3.18 muestra el mapa de irradiancia en grados obtenido en la posición 2 en ambos sistemas. El codo estándar presenta una distribución asimétrica y gran dispersión de la luz (Fig. 3.18 (a)). Sin embargo, el codo UCM (Fig. 3.18 (b)) se caracteriza por una distribución de irradiancia simétrica respecto del centro geométrico y con alta concentración de flujo en la zona central por lo que más cantidad de luz será guiada hasta el final del segundo tubo.

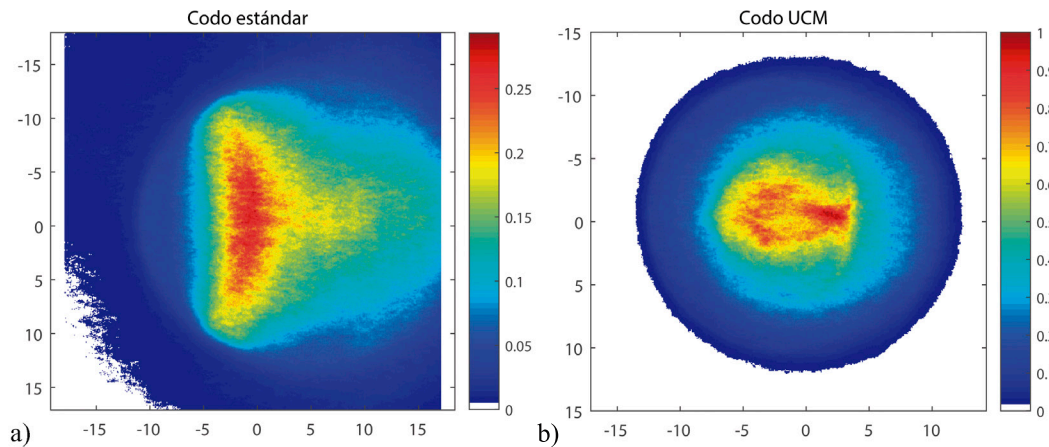


Figura 3.18: Mapa de irradiancia obtenido en la salida de codo estándar (a) y en el codo UCM (b) en la posición 2

La figura 3.19 muestra una vista lateral de la propagación de la luz al pasar a través de la guía prismática A y el codo UCM en el montaje experimental. En ella se observa la distribución luminosa que forma el codo UCM, un cono angular de aproximadamente  $60^\circ$ .



Figura 3.19: Vista lateral de la propagación de luz a través del codo UCM de  $90^\circ$  instalado en una guía prismática hueca

Los resultados del mapa de irradiancia en grados obtenidos a la salida del sistema (posición 3) se muestran en la figura 3.20.

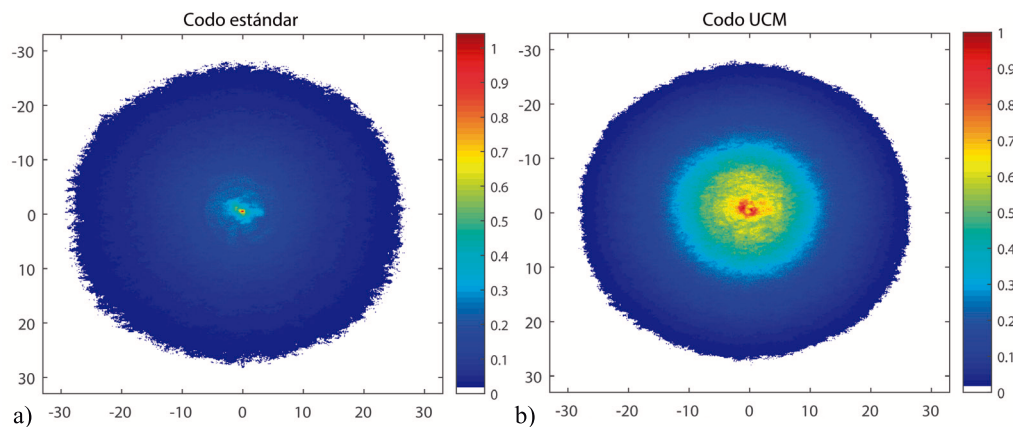


Figura 3.20: Mapa de irradiancia obtenida a la salida del codo estándar (a) y del codo UCM (b) en la posición 3

La transmisión de luz mejora con el nuevo sistema como se observa en la figura 3.21, ya que proporciona una mayor eficiencia debido a la distribución angular simétrica y mayor concentración respecto del eje central. La eficiencia del codo UCM es 2.60 veces mayor que la del estándar.

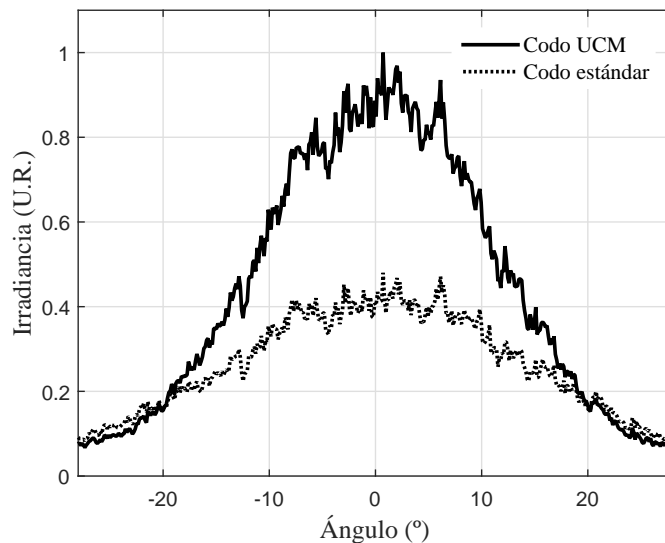


Figura 3.21: Perfil de irradiancia normalizado respecto del codo UCM a la salida del sistema

### 3.3. Alteraciones cromáticas en las guías de luz huecas

La luz natural empleada en la iluminación de los espacios interiores ofrece muchos beneficios, tales como el ahorro de energía y una mejor calidad de visión. Es muy importante tener en cuenta la reflexión, la transmisión y la absorción en el diseño de los elementos que componen los sistemas de guiado ya que los efectos ópticos en la superficie juegan un papel primordial en la eficiencia de los sistemas de guiado [93]. Entre la variedad de materiales empleados en los diseños de guías de luz [94], el aluminio y las láminas plásticas con superficie prismática se encuentran entre los más populares. Es importante analizar las diferencias de color con los distintos sistemas ya que su uso en edificios de oficinas y centros de producción influye en la productividad y el confort de los ocupantes [95].

La respuesta espectral que determina la cromaticidad de los sistemas de iluminación está condicionada por factores como la reflectancia espectral del material, la longitud de la guía, la composición espectral de la luz incidente (tanto directa como difusa) y el ángulo de incidencia de la luz. En el caso de guías de aluminio la reflectancia espectral del material [85] es un factor determinante de los cambios cromáticos que sufre la luz. Los procesos de fabricación actuales permiten elaborar superficies de alta reflectancia espectral que varían entre 95 y 99.7 %, siendo estos valores incluso menores en las longitudes de onda cortas del rango espectral del visible. En el caso de las guías prismáticas, la luz es transmitida mediante TIR en la superficie de la lámina prismática que la compone, siendo mínima la influencia de la absorción del material.

El objetivo de los estudios que se presentan posteriormente es evaluar la diferencia en contenido espectral y cromático en la luz transmitida a través guías de luz reflectantes de aluminio y prismáticas con distintas geometrías.

#### 3.3.1. La medida del color

Desde la antigüedad, se ha mostrado interés por la reproducción del color de los materiales. Con el desarrollo de las técnicas de medida ópticas en el siglo XIX, se ha podido expresar el color cuantitativamente mediante valores del color definidos dentro de los denominados sistemas de color [96, 97]. Los sistemas de color se pueden clasificar en dos tipos: los basados en la percepción del color y los basados en la mezcla del color.

En los sistemas de apariencia de color basados en la percepción del color, el color percibido depende de la distribución espectral y de diversos factores relacionados con el estímulo como son: el tamaño, la forma, la estructura y el entorno de la zona, el estado de adaptación del observador y también de la experiencia que este último posee de las condiciones de observación en que se encuentra o en condiciones semejantes. Aunque son métodos muy intuitivos en algunos casos, los resultados obtenidos proporcionan baja precisión ya que son necesarias interpolaciones y extra-

polaciones en el análisis de colores arbitrarios. Uno de los sistemas de apariencia de color más popular basado en la percepción es el sistema Munsell [98], en el que se recogen aproximadamente 1500 muestras de color ordenadas por tono, luminosidad y saturación.

Los sistemas de mezcla de color están basados en la determinación de cantidades de color necesarios en una mezcla para obtener la igualación a un color de referencia. Estos sistemas definen el color en sentido psicofísico mediante la combinación de mediciones físicas de la energía radiante espectral con datos obtenidos por observadores que igualan colores. Los estímulos son determinados en función de unos valores definidos experimentalmente denominados valores triestímulos definidos como las cantidades de los tres estímulos de referencia, que en un sistema tricromático dado, son necesarios para igualar el color del estímulo considerado.

Un sistema basado en la mezcla de color es el sistema CIE 1931, ampliamente utilizado debido a la alta precisión de sus resultados y muy utilizado en diversas aplicaciones como la industria. El sistema colorimétrico patrón CIE 1931 es uno de los primeros espacios de color definidos matemáticamente que permite la determinación de los valores triestímulo de cualquier distribución espectral de energía [61]. Los valores triestímulos en este sistema son determinados en relación a la visión foveal central para estímulos pequeños que abarcan un campo visual de  $2^\circ$  (representa un diámetro de 17 mm a 0.5 metros de distancia) y es considerado válido para el cálculo de campos comprendidos entre aproximadamente  $1^\circ$  y  $4^\circ$ . En el caso de campos de igualación de color que subtienden más de  $4^\circ$  en el ojo del observador, es recomendable utilizar las especificaciones colorimétricas del estímulo de color basadas en las funciones de igualación del color publicadas en el sistema de la CIE 1964 [99].

Los valores triestímulo en el sistema CIE 1931 son denominados X, Y y Z y pueden ser calculados como:

$$X = k_m \int_{\lambda=380}^{780} \phi_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda), \quad (3.6)$$

$$Y = k_m \int_{\lambda=380}^{780} \phi_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda), \quad (3.7)$$

$$Z = k_m \int_{\lambda=380}^{780} \phi_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda), \quad (3.8)$$

donde  $\phi_\lambda(\lambda)$  es la distribución espectral que describe un estímulo de color mediante la concentración espectral de la radiancia o potencia radiante en función de la longitud de onda y  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  son las tres funciones de igualación de color para el observador patrón considerado. Las integrales definidas pueden ser sustituidas por la suma de

las integrales parciales que abarcan intervalos de longitud de onda de un nanómetro. En objetos reflectantes, la distribución espectral del estímulo de color  $\phi_\lambda(\lambda)$  es reemplazada por la distribución espectral relativa  $\phi(\lambda)$ , definida como:

$$\phi(\lambda) = R(\lambda)S(\lambda) \quad (3.9)$$

donde  $R(\lambda)$  es el factor de reflectancia espectral del objeto y  $S(\lambda)$  es la distribución de la potencia espectral relativa del iluminante. En el caso de objetos transmisores, se sustituirá el factor de la reflectancia espectral por el de la transmitancia espectral  $T(\lambda)$ .

En la evaluación de objetos reflectantes o transmisores considerados como fuentes de luz secundarias, la constante  $k_m$  es elegida de manera que se cumpla  $Y=100$  para que los objetos tengan una reflectancia  $R$  o transmitancia  $T$  igual a la unidad en todas las longitudes de onda, es decir:

$$k_m = \frac{100}{\sum_{\lambda=380}^{780} S_\lambda(\lambda)\bar{y}(\lambda)d(\lambda)}. \quad (3.10)$$

La cromaticidad de una fuente de luz puede ser obtenida a partir de los valores triestímulo. La cromaticidad de un estímulo de color se define mediante las coordenadas cromáticas o coordenadas de cromaticidad, siendo su valor la relación de cada uno de los valores triestímulo y su suma. En el diagrama cromático CIE 1931 las coordenadas cromáticas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son por lo tanto calculadas de esta forma:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (3.11)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (3.12)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}, \quad (3.13)$$

Frente a la necesidad de cuantificar las variaciones de color existen diversos métodos de colorimetría propuestos por la CIE [61] en los que la experimentación psicofísica marca los límites de las escalas en las diferencias y asigna los valores.

Para definir las propiedades del color de las fuentes de luz en el ámbito de iluminación se pueden utilizar diversos métodos [99, 100, 101, 102]. Uno de ellos es el cálculo de la diferencia de color ( $\Delta E_{ab}$ ) entre dos estímulos y es calculado como la distancia Euclídea entre dos puntos de los estímulos perceptuales del color representados en el espacio de color CIELAB. También la Temperatura de Color Correlacionada o *Correlated Color Temperature* (CCT) es comúnmente utilizada como una indicación de la apariencia del color de la luz emitida por una fuente definida por la proximidad de las coordenadas cromáticas de la fuente de luz a la posición del cuerpo negro. Otra medida ampliamente utilizada es el índice de rendimiento de cromático *Color Rendering Index* (CRI) que representa la identidad en coordenadas de color de un test respecto de una referencia.

### 3.3.2. Diferencia cromática entre guías cilíndricas prismáticas y de aluminio

En esta sección, se evalúa la diferencia en contenido espectral y cromático entre la luz transmitida en una guía de luz cilíndrica de aluminio y otra plástica prismática hueca que trabaja óptimamente mediante el principio de la reflexión total interna. Con objeto de evaluar estas diferencias, se ha calculado para cada uno de los dos casos el desplazamiento cromático experimentado por los valores triestímulo asociados a una fuente de luz y aquellos que se obtienen para la distribución espectral resultante después de la transmisión a lo largo de guías de diferentes longitudes [103, 104].

#### 3.3.2.1. Evaluación de la diferencia cromática mediante métodos semiempíricos

En este trabajo se realiza una comparación entre los valores de transmitancia espectral obtenidos en una guía cilíndrica de aluminio y otra recubierta interiormente de una lámina prismática. La comparación se realiza mediante estudios semiempíricos utilizando un modelo de reflexión especular que tiene en cuenta el número de reflexiones dentro de una cilíndrica guía hueca. La guía prismática consta de un tubo cilíndrico con una lámina cuya superficie externa está compuesta por microprismas de  $90^\circ$ , de tal manera que aquellos rayos que entran en la guía con el ángulo adecuado experimentan TIR en su superficie. La reflectancia espectral de la lámina prismática se estima en 99% en la totalidad del espectro, el resto es considerado debido a pérdidas por la absorción del material y a pequeños defectos superficiales de la lámina [105]. En los cálculos se ha empleado la distribución espectral del iluminante

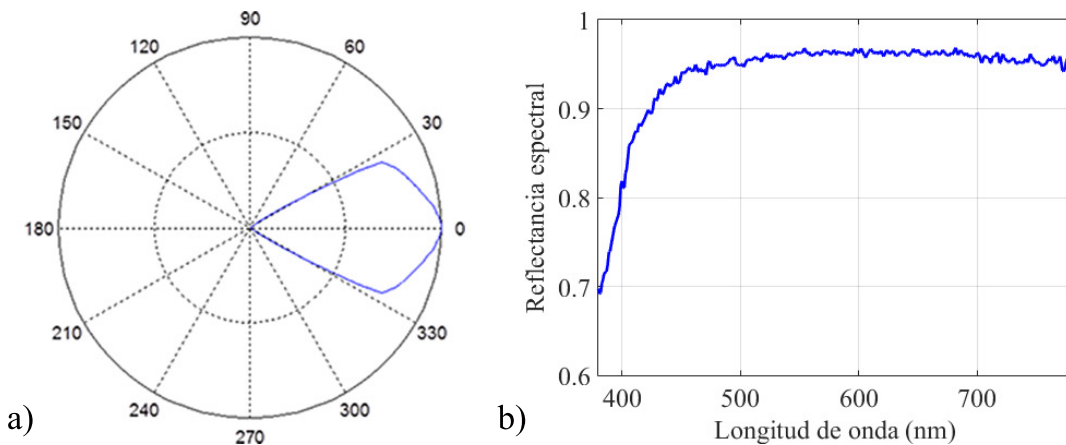


Figura 3.22: Curva polar de emisión de la fuente luminosa (a). Reflectancia espectral del aluminio objeto de estudio (AlanRh) (b)

propuesto por la CIE D65 que describe las condiciones medias de iluminación en un

mediodía en Europa Occidental [61]. La curva de la distribución luminosa de la fuente de luz empleada se muestra en la figura 3.22 (a) y el análisis espectral realizado se ha restringido a un intervalo visual comprendido entre 380 y 780 nm.

La reflectancia espectral del aluminio se considera isótropa a lo largo de la guía y ha sido determinada experimentalmente mediante un espectrofotómetro Hitachi U-3400 con el accesorio para la medida de la reflectancia especular a  $12^\circ$  de incidencia (Fig. 3.22 (b)).

Con objeto de determinar la distribución espectral de la radiación que emerge de la guía, se ha recurrido al modelo desarrollado por S.H.Lin [106], en el que se cuantifica el número de reflexiones  $n$  que un rayo de luz experimenta en el interior de guías cilíndricas huecas según el esquema de la figura 3.23 y viene dado por la siguiente expresión:

$$n = \frac{2(L/R) - Z1}{2\cos\gamma \tan(\pi/2 - \theta)}, \quad (3.14)$$

donde  $L$  es la longitud de la guía y  $R$  el radio.  $Z1$  es la distancia desde la entrada de la guía hasta el primer punto de incidencia del rayo a lo largo del eje  $Z$ . El ángulo que proporciona la distancia desde el eje de referencia  $X$  en el plano  $XY$  es  $\gamma$  y se aproxima a cero con objeto de facilitar los cálculos. El ángulo que subtende el rayo incidente con el eje  $Z$  en el plano  $XZ$  es  $\theta$  y se evalúa en un intervalo angular que varía desde 0 hasta  $\pi/2$ . La fuente  $P$  se sitúa en el origen de coordenadas, considerado el centro geométrico de la apertura de entrada de la guía. Las longitudes de las guías son 5, 10 y 15 m y tienen un diámetro de 1 m.

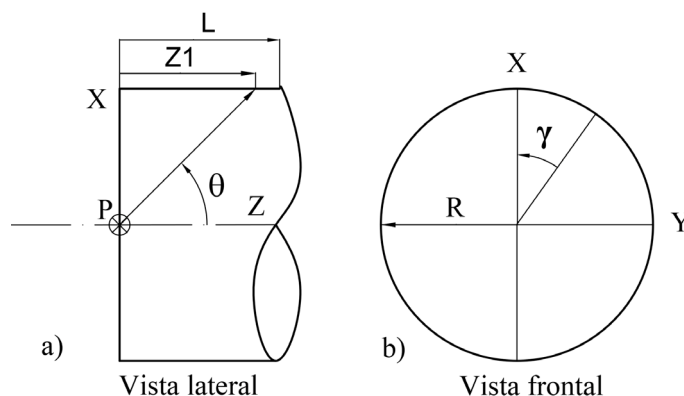


Figura 3.23: Parámetros geométricos que definen el número de reflexiones en la guía cilíndrica. Sección longitudinal (a) y transversal (b)

Teniendo en cuenta el número de reflexiones en el interior de la guía, las propiedades especulares de los materiales y las características de la fuente de luz empleada, es posible estimar las variaciones cromáticas que sufre la luz a la salida de la guía a

partir de la distribución espectral de la radiación  $S'$  calculada de la forma:

$$S'(\lambda, \theta) = S_{D65}(\lambda)R(\lambda)^n\phi(\theta) \Delta \lambda \Delta \theta. \quad (3.15)$$

siendo  $S_{D65}$  la distribución de potencia espectral relativa del iluminante primario,  $R$  la reflectancia espectral del material,  $n$  el número de reflexiones que sufren los rayos en la guía y  $\phi$  el flujo radiante del haz incidente dependiente de  $\theta$ .

Los valores de las coordenadas cromáticas  $x$  e  $y$  correspondientes al espacio CIE1931 obtenidas a partir del espectro transmitido en la guía prismática  $S_{p'}$  difieren respecto de los de la guía de aluminio (d5m, d10m y d15m) como se indica en la figura 3.24. Se observa un desplazamiento de color significativo hacia la zona de los amarillos según aumenta la longitud de la guía. En el caso de la guía prismática, no existen cambios en las coordenadas del espectro de salida  $S_{p'}$ , en los tres casos evaluados, los valores coinciden con los del iluminante D65 debido a que la reflectancia se mantiene constante en todo el espectro.

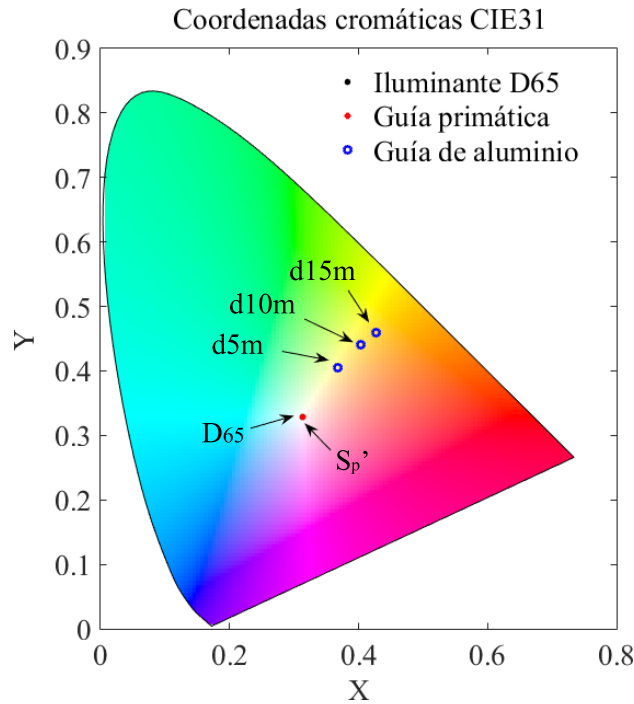


Figura 3.24: Coordenadas cromáticas a la salida de ambos tipos de guías para varias longitudes. Los tres puntos consecutivos d5m, d10m y d15m, representan las longitudes de la guía de aluminio. Los resultados del iluminante D65 se superponen con los de la guía prismática  $S_{p'}$

Posteriormente se han calculado las diferencias de color  $\Delta E$  entre el estímulo de color asociado al iluminante primario D65 y la distribución espectral a la salida de

las guías en el espacio Cielab [100]. Este cálculo se ha realizado para las diferentes longitudes en los dos tipos de guías.

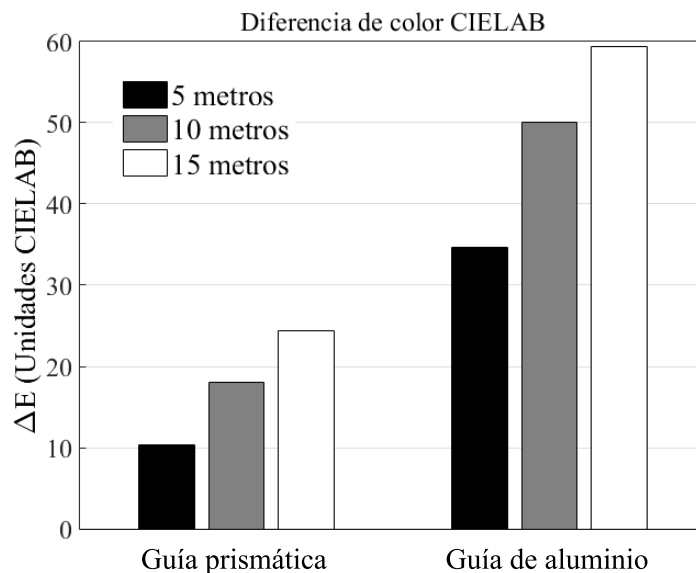


Figura 3.25: Representación gráfica de los índices de la diferencia de color ( $\Delta E$ ) en las guías analizadas con las diferentes longitudes (5, 10 y 15 m)

La figura 3.25 representa las diferencias de color en el espacio de color Cielab. Como se puede observar existe un cambio significativo en la guía de aluminio, presentando menor diferencia en la guía prismática. Las reflexiones totales que tienen lugar en la superficie de la lámina prismática condicionan un mínimo desplazamiento cromático en el espectro de salida resultante. Sin embargo, en la guía de aluminio existe un desplazamiento cromático significativo debido al patrón de reflectancia espectral que tiene lugar en su superficie.

El cálculo de la diferencia de color en los dos tipos de guías muestra la mejora obtenida en la guía prismática, llegando a ser 3.4 veces mayor que la de aluminio en guías de 5 metros de longitud.

Guías de luz de diferentes materiales pueden ser utilizadas para transportar luz solar, adaptando la distribución espectral de la radiación transmitida en beneficio de las necesidades de los espacios iluminados.

### 3.3.2.2. Diferencia de color en guías cilíndricas, montaje experimental

El objetivo de este estudio es analizar la diferencia de color en dos prototipos reales de guías de luz cilíndricas huecas [104], una de aluminio cuya superficie interna se caracteriza por tener una alta reflectancia espectral (Spectralight Infinity) y otra de policarbonato transparente recubierta internamente de una lámina prismática. Para

ello se han comparado experimentalmente las características espectrales existentes en la luz que es transmitida internamente en los dos sistemas. Para llevar a cabo la comparativa, la diferencia de color ( $\Delta E$ ) en el espacio Cielab es evaluado a través de 24 muestras de color Munsell. Las guías empleadas en el montaje se muestran en la figura 3.26.

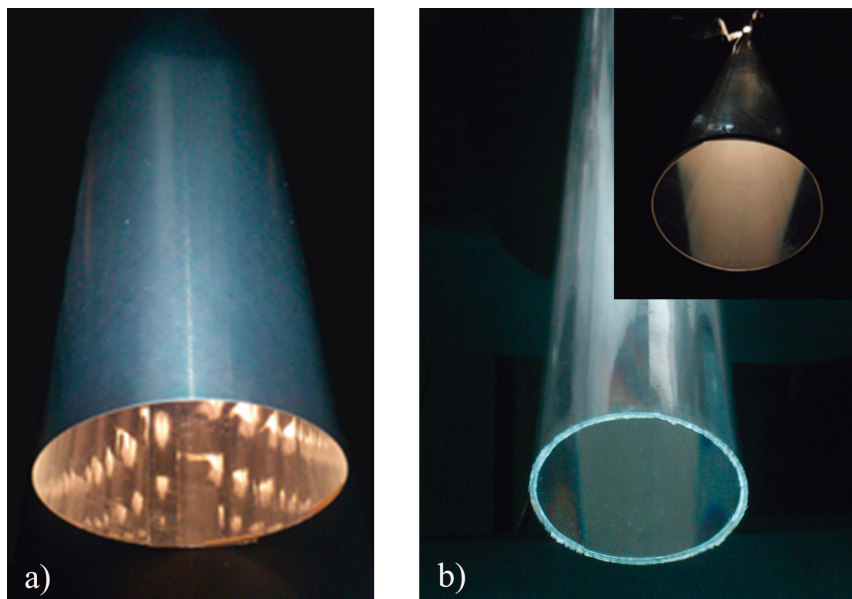


Figura 3.26: Guía hueca de distintas reflectancias: aluminio (a) y prismática hueca (b)

Con objeto de comparar las diferencias cromáticas de la luz a la salida de ambas guías se ha medido la distribución espectral a la entrada  $S(\lambda)$  y a la salida  $S'(\lambda)$  en una esbeltez de guía de 15 con un espectroradiómetro Modelo EPP 2000, StellarNet Inc. En el montaje experimental se ha empleado una fuente de luz LED (Lumileds LXHL-PW01) cuyo semiángulo de emisión es de  $30^\circ$ . La diferencia cromática de los valores en el espacio CieLab se han obtenido experimentalmente mediante el iluminante D65 y a través de muestras estandarizadas de color de la carta Macbeth ColorChecker de 24 colores [107] con el espectroradiómetro Spectrascan PR655.

A partir de los resultados obtenidos de las coordenadas Cielab sobre las muestras consecutivas del Atlas de color Munsell (Fig. 3.27) obtenemos que la diferencia de color en el espacio Cielab en el caso de la guía prismática presenta un valor medio de 1.20 unidades con una desviación estándar de 0.33, en el caso de la guía de aluminio se obtiene experimentalmente una media de 7.44 unidades con una desviación estándar de 2.40. Los valores de diferencia de color Cielab obtenidos con la guía de luz prismática están dentro del rango óptimo de 2 unidades de diferencia cromática Cielab, considerado como el rango de valores en los que la diferencia es imperceptible

para el ojo humano [108].

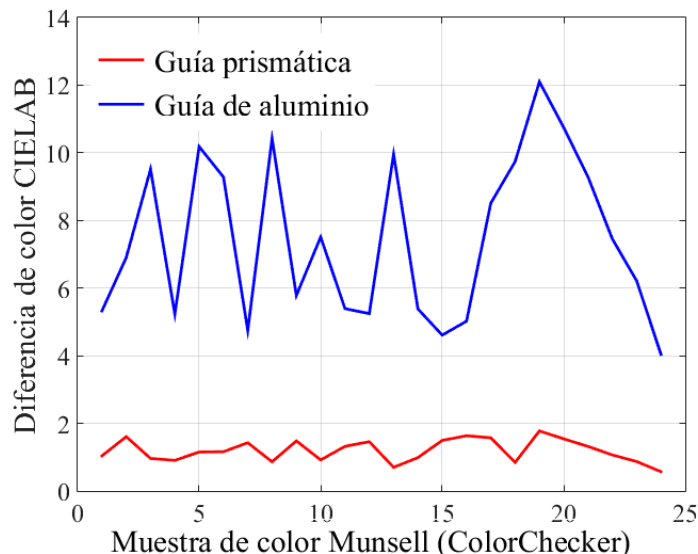


Figura 3.27: Diferencias de color Cielab obtenidas en las diferentes muestras de color del atlas Colorchecker

Los resultados obtenidos de las medidas experimentales indican que las guías prismáticas proporcionan mejor reproductividad cromática con respecto a las guías compuestas de materiales especulares de alta reflectancia.

### 3.3.3. Influencia de la geometría de las guías en la cromaticidad

La forma y el tamaño de la sección de la guía de luz debe de ser configurada con el objeto de obtener una óptima calidad cromática, una distribución luminosa uniforme y una elevada eficiencia con el mínimo uso de material. Por ello, es necesario realizar un estudio de la eficiencia de las guías en función de la geometría [109].

En este apartado se muestran dos análisis, por un lado un cálculo semiempírico de la distribución de energía espectral mediante el software matemático matlab para cuantificar la influencia que tienen las geometrías cilíndrica y rectangular de dos guías huecas, una de aluminio y otra prismática de distintas longitudes, en la temperatura de color correlacionada (CCT) y en el índice de reproducción cromática (CRI). Por otro lado, se realiza un estudio mediante un software de trazado de rayos en el que se compara la eficiencia obtenida en las guías prismáticas cilíndrica y rectangular.

#### 3.3.3.1. Rendimiento de color en guías mediante análisis semiempírico

Para cuantificar la influencia que tienen las geometrías cilíndrica y rectangular de dos guías huecas, una de aluminio y otra prismática en la reproducción cromática se

compara el modelo teórico empleado en los cálculos de sección 3.3.2 para la obtención de la transmitancia espectral de guías cilíndricas, con las condiciones de geometría rectangulares propuestas por el modelo desarrollado por Whitehead [110]. De acuerdo con este modelo el número de reflexiones  $n$  por unidad de longitud  $\Delta z$  de un rayo de luz que incide dentro de una guía está dado por la relación:

$$\frac{\Delta n}{\Delta z} = \frac{\tan \theta}{D},$$

donde  $D$  es la distancia media de la sección transversal y  $\theta$  es el ángulo a través del cual el rayo se desvía del eje de la guía. En el caso de guías rectangulares con dimensiones  $a$  y  $b$  se cumple que:

$$D = (a^{-1} + b^{-1})^{-1}$$

La figura 3.28 muestra un esquema del modelo geométrico rectangular. El área de apertura de las guías cilíndrica y rectangular, es igualado en los cálculos para equiparar las condiciones de flujo radiante incidente. Las longitudes de las guías coinciden con el valor de la relación de aspecto o esbeltez y son 5, 10 y 15 metros.

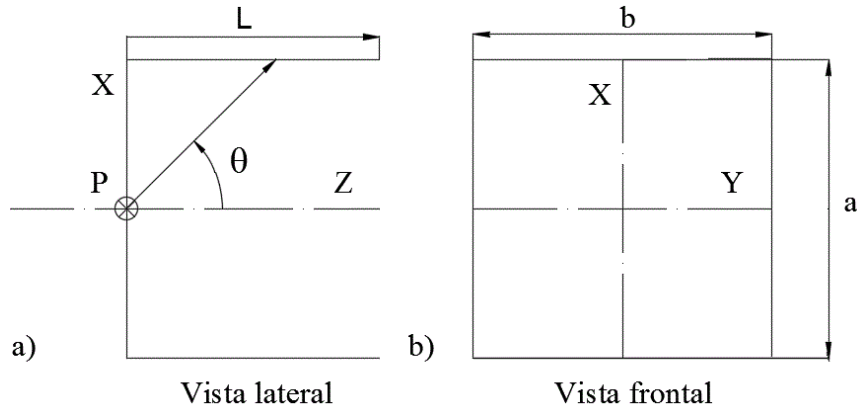


Figura 3.28: Parámetros geométricos de la guía rectangular. Sección longitudinal (a) y transversal (b)

El ratio espectral se calcula como la relación entre la distribución espectral de la guía a la salida respecto a la de entrada (3.16).

$$\eta_\lambda = \frac{S'(\lambda)}{S(\lambda)} \quad (3.16)$$

Como se observa en la figura 3.29 la guía prismática tiene alta transmisión a través del espectro y la potencia es constante. En la la guía de aluminio hay una tendencia

a la baja en la en la energía de longitud de onda corta debido a las características de reflectancia espectral del material.

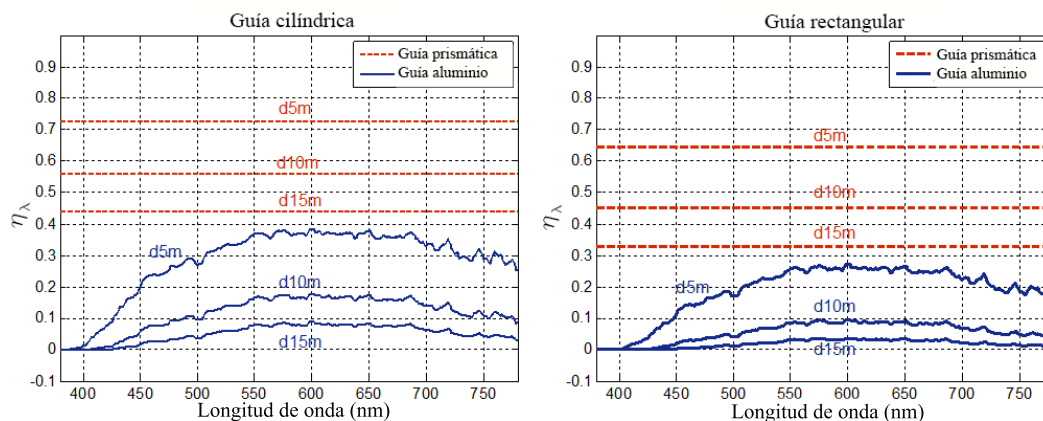


Figura 3.29: Ratio espectral ( $\eta$ ) en los dos tipos de guías cilíndrico (a) y rectangular (b)

Si siguiendo las recomendaciones de la CIE [100] para especificar las propiedades de reproducción cromática de las fuentes de luz, se obtiene la temperatura de color correlacionada (CCT) y el índice CIE de rendimiento de color (CRI) en los dos tipos de guías para diferentes longitudes.

	CCT <sub>cil</sub> (°K)	CRI <sub>cil</sub>	CCT <sub>rect</sub> (°K)	CRI <sub>rect</sub>
Iluminante D65	6503	99.97	6503	99.97
Guía prismática	6503	99.97	6503	99.97
Guía aluminio (5m)	4707	89.81	4407	87.74
Guía aluminio (10m)	4126	85.45	3818	82.39
Guía aluminio (15m)	3781	81.98	3478	78.15

Tabla 3.3: Temperatura de Color Correlacionada (CCT) e Índice de Rendimiento Cromático (CRI) obtenidos a partir de las distribuciones espectrales en los dos tipos de guías (cilíndrico y rectangular) en diferentes longitudes

En la tabla 3.3 se muestran los valores de temperatura de Color Correlacionada (CCT) e Índice de Rendimiento Cromático (CRI) obtenidos a partir de las distribuciones espectrales en los dos tipos de guías (cilíndrico y rectangular) en diferentes longitudes. La temperatura de color correlacionada de la fuente luminosa que proporciona la guía prismática se iguala al valor del iluminante D65 y tiene un valor de 6503K por lo que el cambio obtenido es mínimo. Al analizar los resultados de rendimiento cromático existe un cambio significativo en la guía de aluminio. En el

caso de una guía rectangular de 15 m existe una diferencia de 21,82 % entre la guía de aluminio y la prismática. En el caso de una guía cilíndrica la diferencia entre los dos materiales evaluados es de 17.99 %.

### 3.3.4. Influencia de la geometría de las guías primáticas en la eficiencia

La eficiencia en dos tipos de guías prismáticas cilíndrica y rectangular se estudia mediante software de trazado de rayos tridimensional. La eficiencia se calcula mediante el cálculo del flujo transmitido en relación al flujo de entrada. En la figura 3.30 se representa una vista lateral de las guías prismáticas empleadas en las simulaciones con un detalle ampliado que muestra la superficie prismática. El material plástico de las guías se caracteriza mediante policarbonato transparente con un índice de refracción 1.49. En este caso, no ha sido considerada la influencia debida a la absorción del material que compone la lámina prismática ya que se considera mínima.

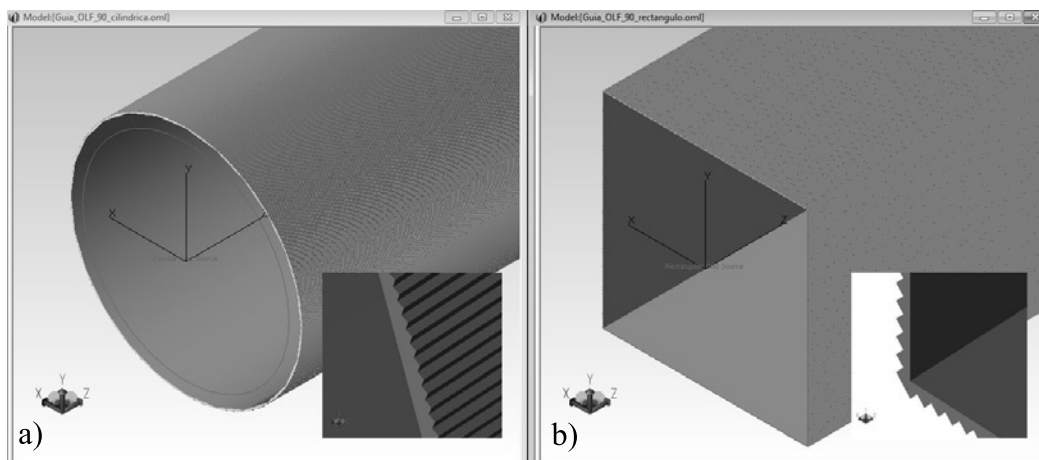


Figura 3.30: Vista en perspectiva de los modelos cilíndrico (a) y rectangular (b) empleados en el trazado de rayos con detalle de la estructura prismática

Las dimensiones de las guías coinciden con las definidas previamente en las simulaciones teóricas y con un factor de escala de los prismas del orden de 10. Una fuente de luz que emite con un cono de un semiángulo  $\theta$  de  $30^\circ$  incide sobre la apertura de entrada de las guías con una longitud de onda de 546 nm. Los resultados de eficiencia calculados mediante la relación entre el flujo de salida respecto del de entrada (eq. 3.5) se muestran en la figura 3.31. La guía cilíndrica proporciona un guiado de luz más colimado que la rectangular, por lo que la eficiencia aumenta. Las diferencias son también debidas a las pérdidas por las esquinas en la guía rectangular, por ejemplo a los 5 m se obtiene una diferencia de 2 %. Las guías de luz prismáticas proporcionan una alta eficiencia. Las formas cilíndricas muestran un leve incremento

en la transmisión respecto de las rectangulares.

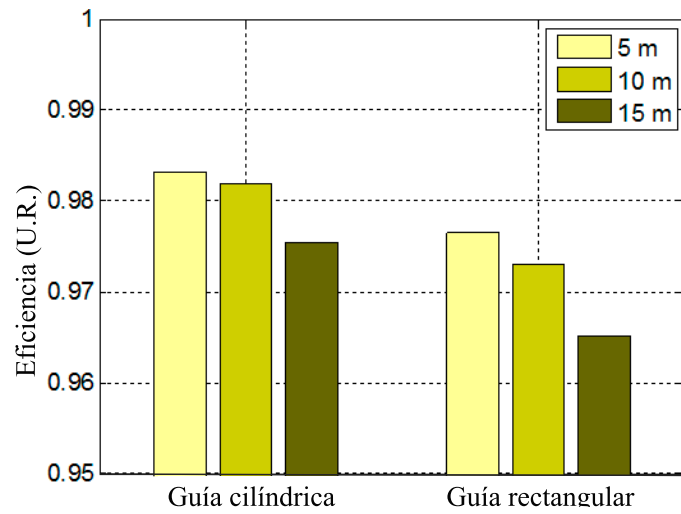


Figura 3.31: Eficiencia en guías prismáticas de geometría cilíndrica y rectangular para una longitud de onda de 546 nm

## Capítulo 4

# Modelo matemático de eficiencia en guías prismáticas huecas

Los requerimientos técnicos exigidos actualmente en la iluminación de edificios, las nuevas capacidades simulación óptica mediante software y las mejoras en los procesos de fabricación, sugieren la necesidad de redefinir modelos de eficiencia ya descritos para predecir el comportamiento de la luz en guías prismáticas evitando las limitaciones tecnológicas anteriores.

El incremento de las guías de luz huecas instaladas en las últimas décadas, y las recientes innovaciones de los materiales que las componen, hacen necesario el desarrollo de métodos predictivos para cuantificar su eficiencia. A pesar de que los procesos de fabricación actuales hacen posible el desarrollo de unas láminas prismáticas de excelente calidad óptica, es importante analizar los fallos que limitan su comportamiento como sistema de guiado óptico como son por ejemplo vértices que no cumplen la relación angular estricta, superficies que no son ópticamente lisas e inhomogeneidades en el material que las compone y actúan sobre la eficiencia.

En este capítulo se presenta un estudio de la influencia que tienen diversos parámetros sobre el funcionamiento de las láminas prismáticas como elemento de guiado de luz, mostrando como afectan a la eficiencia mediante un modelo matemático semiempírico.

### 4.1. Modelos de cálculo de eficiencia

Desde el comienzo del desarrollo de las guías prismáticas huecas en los años 80, varios investigadores han estudiado sus principales características y han mostrado algunos modelos matemáticos para definir su funcionamiento. Por ejemplo, Lorne A. Whitehead junto con otros autores han proporcionado algunos métodos para estimar la eficiencia de las guías prismáticas en función de varios parámetros que pueden

afectar a su comportamiento. En uno de los modelos propuestos [111] se realiza una estimación de pérdidas de luz en función del número de reflexiones teniendo en cuenta la absorción del material, la dispersión y las imperfecciones de los prismas mediante un análisis óptico que emplea el Trazado de rayos de Montecarlo. En este estudio los errores angulares de la superficie se calculan aplicando distribuciones de probabilidad uniforme y gaussiana. También han propuesto métodos de cálculo simplificados [112] que dependen del número de reflexiones y de los diversos elementos que puede contener el sistema óptico. Steven G. Saxe [113] ha proporcionado algunos métodos para estimar la eficiencia o la atenuación en las guías en función de varios parámetros como son la longitud de la guía y el diámetro. Estos estudios muestran la complejidad en la búsqueda de un modelo que determine con exactitud el comportamiento de la luz en estos sistemas. Algunos métodos implican numerosas simplificaciones por lo que en ciertos rangos de medida existe imprecisión en los resultados. Otros métodos tienen el inconveniente de requerir una gran cantidad de información para poder desarrollarlos, pero tienen la ventaja de proporcionar mayor exactitud en los resultados [86, 114].

## 4.2. Caracterización de defectos microprismáticos

Según el modelo ideal, en una guía prismática hueca toda la radiación que entra en el interior y cumple las condiciones de aceptación angular es guiada a lo largo del sistema. La figura 4.1 muestra un esquema del comportamiento de un rayo en el interior de una guía prismática hueca perfecta con detalle de las reflexiones internas que sufre un rayo dentro del material plástico.

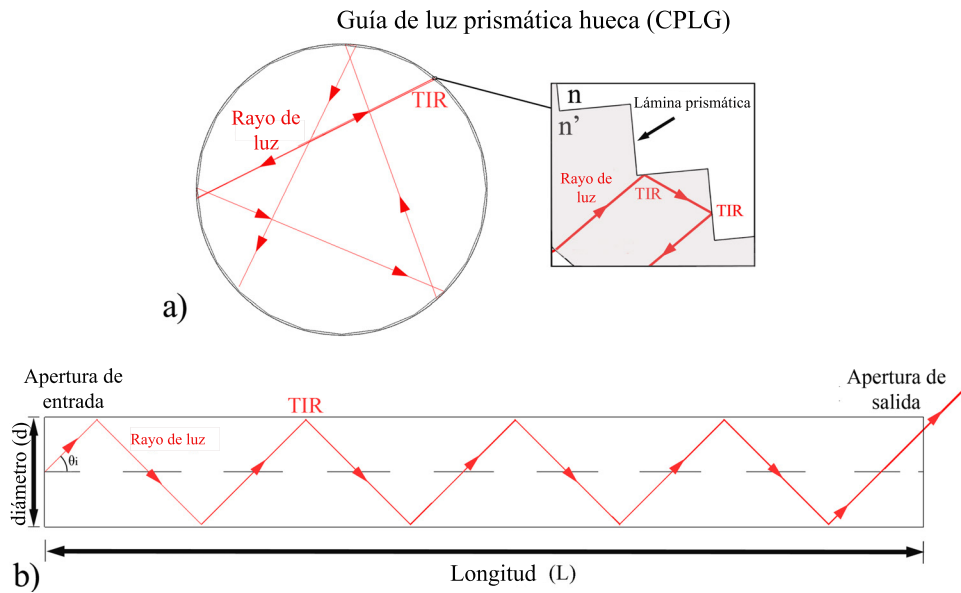


Figura 4.1: Esquema de la trayectoria de un rayo de luz que sufre reflexiones totales internas (TIR) en el interior de una guía prismática. Vista transversal con un detalle de la TIR en el interior la estructura prismática (a). Vista longitudinal (b)

Los defectos de fabricación y del material conllevan irregularidades en la superficie que modifican el comportamiento de los rayos incidentes, produciéndose consecuentemente una disminución progresiva del flujo luminoso que es transmitido en la lámina prismática mediante TIR [115]. Por lo tanto, los defectos de superficie son un importante factor a tener en cuenta para determinar su desarrollo óptico. Con el objeto de conocer las características de las superficies prismáticas, se han estudiado los defectos superficiales a escala micrométrica con microscopía electrónica de barrido (*Scanning Electronic Microscopy SEM*) en combinación con perfilometría óptica topográfica por absorción de líquidos (*Topographic Optical Profilometry by Absorption in Fluids TOPAF*).

El deterioro superficial de la lámina prismática se ha determinado mediante la técnica SEM, para ello, se han recubierto una serie de muestras con una deposición de oro de  $\simeq 8$  nm y posteriormente han sido analizadas con el microscopio óptico electrónico modelo Jeol JSM-6400 a un potencial de aceleración de 25 kV. En la figura 4.2 se representa una imagen realizada mediante SEM que muestra un corte transversal de la lámina prismática.

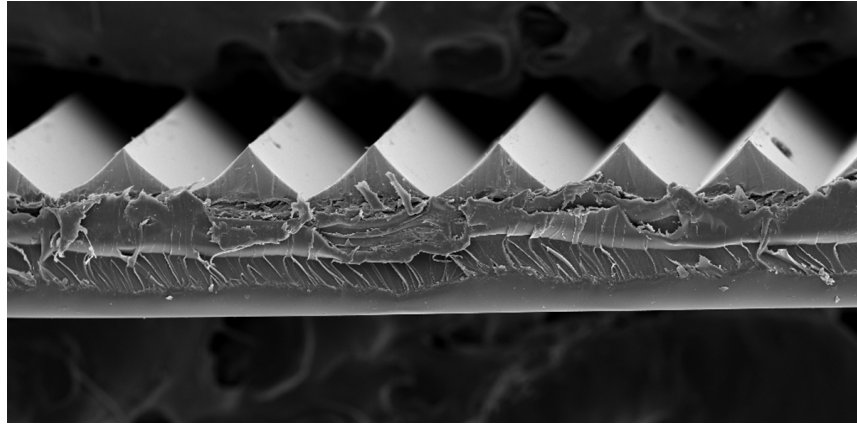


Figura 4.2: Imagen en perspectiva de un corte transversal de la lámina prismática realizada mediante la técnica SEM

En la figura 4.3 se muestra una vista de la superficie prismática obtenida mediante SEM. El vértice exterior del prisma se representa como una línea horizontal central y los valles como dos líneas paralelas situadas superior e inferiormente y marginales al vértice. A partir de las imágenes obtenidas y mediante procesamiento de imagen digital [116] se ha realizado una estimación de defectos de superficie. El análisis mediante procesamiento digital de la imagen muestra las superficies laterales del prisma homogéneas y lisas, sin embargo, áreas blanquecinas muestran pequeñas irregularidades que representan un 1.5% del área total de la superficie prismática. La concentración de defectos aumenta en los vértices (Fig. 4.3 (b)). La anchura media ha sido estimada en  $4.29 \mu m$  con una desviación estándar de  $2.40 \mu m$ . Los resultados obtenidos con esta técnica, proporcionan una estimación basada en datos obtenidos de una imagen bidimensional, por lo que es necesario complementar el análisis SEM con medidas topográficas tridimensionales.

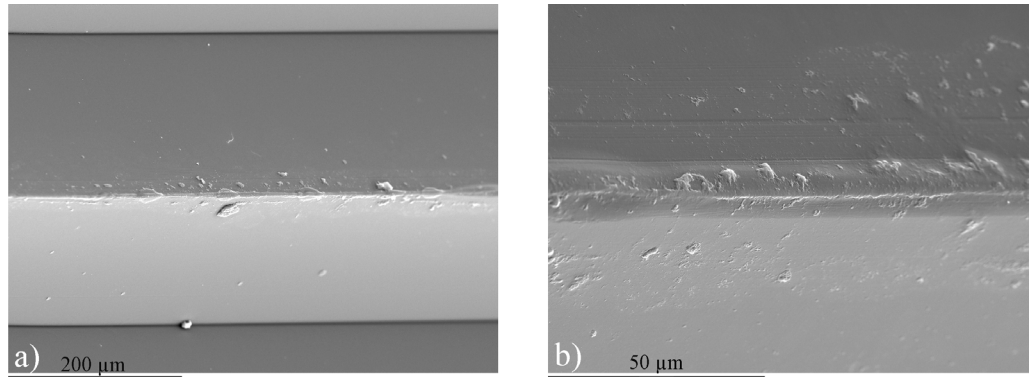


Figura 4.3: Imagen de la superficie prismática realizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) (a) Detalle ampliado del vértice externo (b)

Mediante la técnica de análisis topográfico TOPAF [117, 118, 119], indicada para medir perfiles 3D de superficies complejas y materiales transparentes, se han determinado los defectos de la superficie prismática. La topografía de la lámina prismática se muestran en la figura 4.4 (a). Como muestra la figura 4.4 (b), el valor medio de

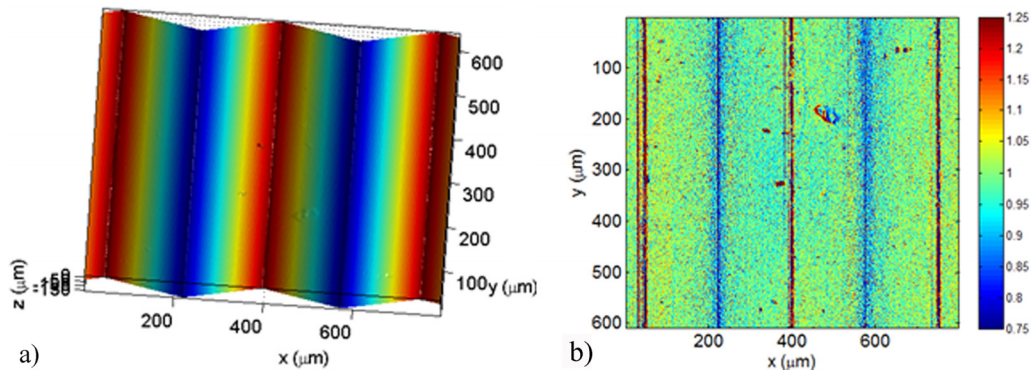


Figura 4.4: Topografía de la película prismática obtenida mediante la técnica microscópica TOPAF (a). Análisis de la pendiente en valores absolutos (b)

la pendiente obtenido es aproximadamente  $\pm 45^\circ$  ya que  $tg(45^\circ) = 1$  exceptuando en los defectos de vértices. Un cálculo de la pendiente absoluta a partir del mapa topográfico, proporciona una estimación del área que está geoméricamente fuera de diseño, es decir, con valores significativamente diferentes de  $\pm 45^\circ$ . Se aprecia un incremento de la pendiente en los vértices externos (escala 1.1-1.25) y un aplanamiento en los internos (escala 0.75-0.95). Los defectos de superficie se delimitan mediante un proceso de análisis con mayor detalle en los vértices externos como muestra la figura 4.5 (a) y (b) y en los vértices internos en la figura 4.5 (c) y (d). A partir del análisis de una serie de imágenes, ha sido caracterizada la lámina prismática y

estimado el área a partir del cual el perfil topográfico discrepa de los valores óptimos de diseño. Este área se puede considerar como una anchura efectiva de pérdidas, en el caso de los vértices externos se ha obtenido un intervalo de anchura de  $3\text{-}7\ \mu\text{m}$  y en los vértices internos un valor de aproximadamente  $2\text{-}4\ \mu\text{m}$ . El valor medio de  $4\ \mu\text{m}$  puede considerarse como el dato representativo de anchura de defectos en los vértices de los prismas.

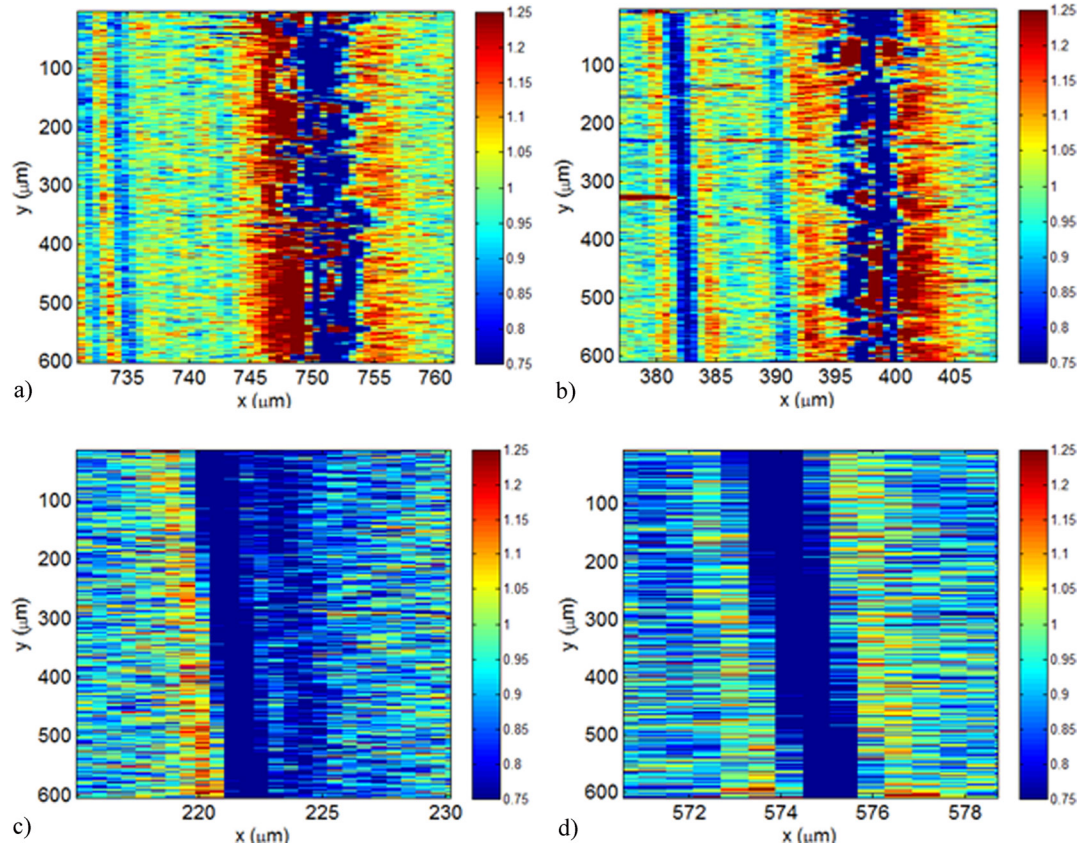


Figura 4.5: Imágenes de vértices superiores (a, b) y vértices inferiores (c, d) obtenidas con TOPAF

### 4.3. Aproximación de defectos en vértices a un radio de curvatura

El cálculo teórico de la irradiancia con software de trazado de rayos [32] permite cuantificar las pérdidas de las guías prismáticas. Para generar un modelo tridimensional válido en las simulaciones, es necesario hacer aproximaciones de los defectos

considerados en el perfil geométrico. Para ello, los vértices han sido equiparados a un radio de curvatura  $r$ , determinado a partir de la relación geométrica:

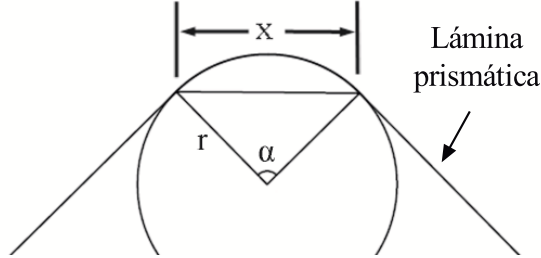


Figura 4.6: Descripción geométrica en sección transversal que determina el radio de curvatura utilizada en el modelo transmitancia ( $\alpha = 90^\circ$ )

donde  $x$  es considerada la longitud del arco que subtiende el arco del vértice (Fig. 4.6),  $\alpha$  es el ángulo subtendido desde el centro del arco y  $r$  es el radio definido por el círculo que lo envuelve. La anchura de defectos  $x$  se relaciona con el radio de la forma:

$$x = 2r \sin(\pi/2). \quad (4.1)$$

De la anchura de defectos obtenida en los análisis microscópicos de los vértices, se ha obtenido una estimación del radio equivalente. Los datos mediante microscopía SEM han proporcionado un radio medio de  $3.03 \mu m$ , mientras que en el caso de la técnica TOPAF el valor es de  $2.83 \mu m$  por lo que existe una gran correspondencia entre los resultados que proporcionan ambas técnicas.

#### 4.4. Modelo matemático para el cálculo de la eficiencia

Para cuantificar las pérdidas de luz en las guías prismáticas se ha desarrollado un modelo matemático [120] que estima la influencia de varios parámetros que condicionan la transferencia de flujo: los defectos en los vértices de los prismas, el coeficiente de absorción del material y los defectos de la lámina. Estos parámetros dependen de la esbeltez  $\rho$ , es decir, de la relación entre la longitud y el diámetro de la guía. Las pérdidas son analizadas a través de la eficiencia  $T_g$ , para evaluar la capacidad del sistema en el guiado de luz. La eficiencia es definida como:

$$T_g = \frac{\phi_d}{\phi_i}, \quad (4.2)$$

donde  $\phi_d$  es el flujo interceptado a diferentes posiciones de la fuente y  $\phi_i$  es el flujo a la entrada de la guía.

Cuando queremos describir un fenómeno físico en el cual la variación de una magnitud disminuye de forma proporcional a su señal, se puede considerar como un

modelo exponencial negativo. Podemos por lo tanto asimilar el fenómeno de atenuación de la transmitancia en las guías prismáticas, al proceso de decrecimiento que sufre la intensidad luminosa de un haz que se propaga en un medio absorbente y así modelar la eficiencia. Es necesario que la expresión exponencial que describe el fenómeno contenga varios términos independientes englobando todas las fuentes de pérdidas, por lo tanto, proponemos definir el modelo de transmitancia  $T_g$  como:

$$T_g(r, \mu, \rho) = e^{-\rho(k_1 r + k_2 \mu + k_3)}, \quad (4.3)$$

donde  $r$  es el radio de los vértices de los prismas,  $\mu$  es el coeficiente de absorción de la lámina prismática y  $\rho$  es la esbeltez de la guía de luz. El radio  $r$  es considerado como la principal fuente de pérdidas debido a la mayor concentración de defectos superficiales localizados en los vértices de los prismas de la lámina prismática. La absorción  $\mu$  es el segundo término de la ecuación, aunque son mínimas las pérdidas debido al pequeño espesor de la lámina, su contribución es importante para incrementar la precisión de los resultados y mejorar el ajuste. En el tercer término son incluidos varios factores que engloban pérdidas residuales relacionadas con defectos de la lámina prismática: estrías, inhomogeneidades del material y otras causas no medidas de forma independiente.  $k_1$ ,  $k_2$  y  $k_3$  son los parámetros de ajuste de cada término que se obtienen mediante cálculos teóricos y experimentales. Para obtener el ajuste en los parámetros independientes  $k_1$  y  $k_2$  de la ecuación 4.3 se llevan a cabo simulaciones mediante el software de trazado de rayos Tracepro 7.4 [32] en guías cilíndricas prismáticas con radio en prismas desde 0 hasta 9  $\mu m$ . En el caso de la absorción, el análisis es sobre el rango de 0 a 0.1  $mm^{-1}$ . El tercer término  $k_3$  es obtenido a partir de datos obtenidos experimentalmente. A partir de los resultados obtenidos en las medidas de las simulaciones tridimensionales y el modelo experimental, se ha utilizado un procedimiento de ajuste con el algoritmo de optimización Simplex [121] para obtener los valores de los parámetros de ajuste en la ecuación.

## 4.5. Cálculo de la eficiencia con aproximación de defectos mediante software

En esta sección se muestran diversos análisis de eficiencia mediante la reproducción de modelos de guías prismáticas a escala real y que han sido realizados con software de trazado de rayos. La apertura angular de la luz de entrada en la guía influye de manera directa en la eficiencia, por ello se analiza en primer lugar este parámetro. En segundo lugar se ha evaluado la eficiencia dependiendo de las dimensiones de la guía. La lámina prismática del sistema óptico ha sido modelada con un software 3D CAD reproduciendo las dimensiones reales: una base de 356  $\mu m$  y una altura de vértices en prismas de 178  $\mu m$ . Las guías cilíndricas prismáticas huecas se han caracterizado con un material plástico de policarbonato y con un índice de refracción de 1.59. Para evaluar la influencia de los defectos de los vértices, se han

diseñado diferentes guías con distintos radios en los vértices de 0, 3, 6 y 9  $\mu m$ . En las simulaciones, las pérdidas por difracción no han sido cuantificadas ya que son consideradas mínimas [122].

La distribución angular de la luz que incide en el sistema es un parámetro crítico que condiciona la eficiencia a lo largo del sistema [31]. Por lo tanto, la influencia de perfil del irradiancia del haz de luz incidente ha sido evaluado para especificar el rango angular de aceptación óptima en el sistema prismático mediante una guía de esbeltez 30, uniformemente iluminada con una fuente de luz lambertiana de 8 mm y semiángulos de incidencia entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  en pasos de  $10^\circ$  [123].

La figura 4.7 (a) muestra como la eficiencia disminuye con el incremento del cono angular. El gradiente de la curva aumenta cuando el semiángulo está fuera del rango dentro del cual la lámina prismática sufre mayores reflexiones totales internas en su superficie ( $\approx 0^\circ$ -  $30^\circ$ ), en este caso las pérdidas son de 4.9% en la guía perfecta y 29.2% en la guía con un radio en vértices de 3  $\mu m$ .

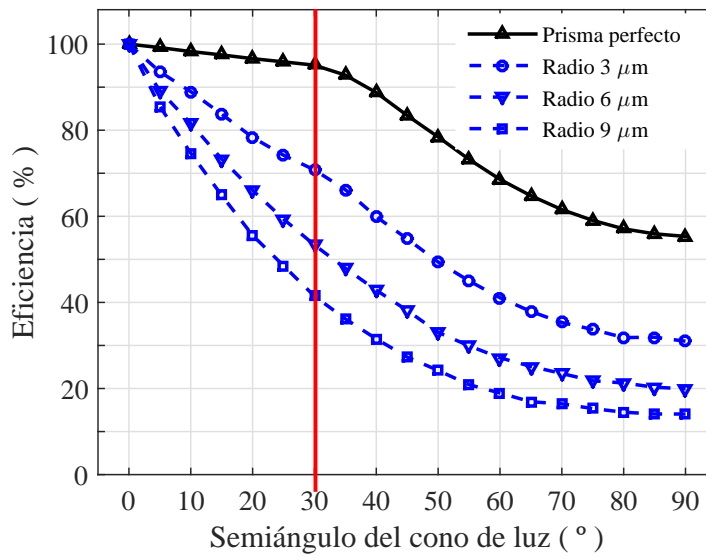


Figura 4.7: Influencia de la fuente de emisión en una CPLG con esbeltez de 30 y diversos radios en vértices

Debido a los resultados obtenidos, el análisis de eficiencia se ha realizado con una fuente emisora cuyo semiángulo de aceptación es de  $30^\circ$ . El coeficiente de absorción del material se ha estimado en  $1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$  aunque se ha analizado su influencia en el rango de 0 a  $0.1 \text{ mm}^{-1}$ . Las guías evaluadas tienen 100 mm de diámetro y diversas longitudes llegando a los 4.8 m.

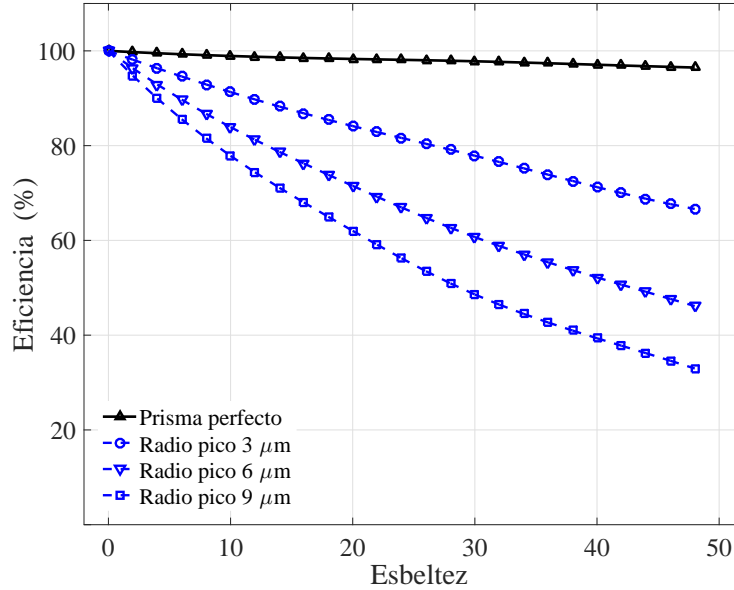


Figura 4.8: Eficiencia obtenida con diversos radios en vértices en diversas longitudes de guía manteniendo un cono angular de  $30^\circ$

Los resultados de eficiencia se presentan en la figura 4.8, en la que se aprecia el decrecimiento altamente relacionado con los defectos en los vértices. Su influencia es un parámetro crítico principalmente cuando la esbeltez de la guía es alto, por ejemplo, cuando la esbeltez es 49 y el radio de curvatura en el vértice de  $3 \mu\text{m}$ , las pérdidas serán cercanas a 33.4%. En el prisma perfecto cuyo radio en vértices de prismas es 0, la transmitancia a lo largo de la guía no es 100% debido a las pérdidas por absorción del material. En una esbeltez de 49, las pérdidas por absorción del material son de 3.5%.

## 4.6. Modelo experimental para el cálculo de la eficiencia

En esta sección se presenta un análisis de la eficiencia en CPLGs mediante un sistema de medida experimental que se caracteriza por tener propiedades análogas a las de las guías empleadas en las simulaciones mediante software, el esquema del montaje se muestra en la figura 4.9. Con los resultados obtenidos se realizarán ajustes en relación a los datos teóricos para cuantificar pérdidas residuales. En el montaje, una guía de policarbonato es recubierta internamente de una lámina prismática cuya cara externa está compuesta de una estructura micropismática de  $90^\circ$  [105]. La guía tiene un diámetro de 96 mm y una longitud total de 3 m dentro de la cual, una fuente de luz es desplazada para realizar el análisis de la eficiencia en intervalos

de 50 mm obteniendo un muestreo preciso. Un LED se sitúa en el interior de una esfera integradora caracterizada por tener una superficie de reflectancia lambertiana para asegurar las mismas condiciones de emisión de las simulaciones realizadas previamente mediante software. Una apertura de 8 mm de diámetro y tres diafragmas circulares localizados coaxialmente, restringen la emisión de salida de la esfera integradora y reproducen una emisión lambertiana con un semiángulo de  $30^\circ$ . La fuente emisora es un LED Luxeon LXHL-PL01 con un pico de emisión cuya longitud de onda es de 590 nm, este valor coincide con el empleado en las simulaciones de trazado de rayos. El flujo radiante es medido con una cámara calibrada (Monocromo CMOS DMK 72BC02, Imaging Source) que recoge el mapa de irradiancia obtenido en una pantalla lambertiana colocada al final de la guía.



Figura 4.9: Esquema del montaje experimental para el cálculo de la irradiancia

El mapa de irradiancia obtenido a la entrada de la guía prismática ( $\rho = 0$ ) y a la salida ( $\rho = 30$ ) se representan en la figura 4.10 (a) y (b).

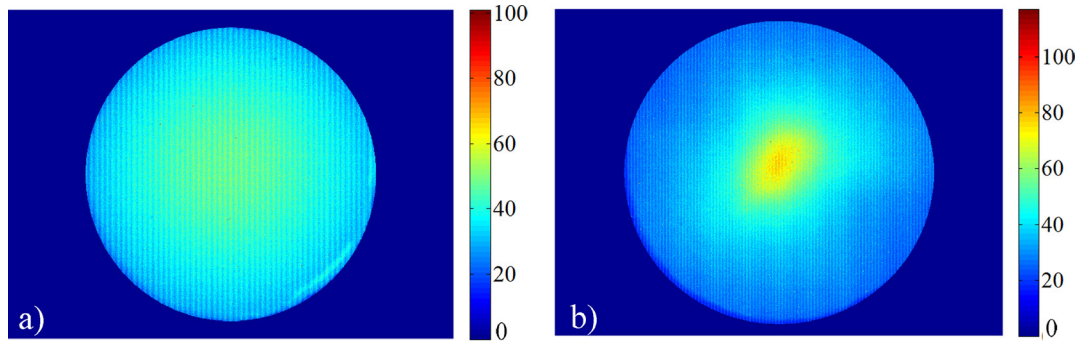


Figura 4.10: Mapa de irradiancia obtenido a la entrada (a) y a la salida (b) de la guía prismática en el montaje experimental ( $\rho = 30$ )

La figura 4.11 muestra el decrecimiento en los resultados de eficiencia en relación con la esbeltez de la guía. Por ejemplo, las medidas experimentales han revelado una eficiencia de 73.79% en la esbeltez de 30, lo que en la figura 4.8 equivaldría a un radio en pico entre 3 y 6  $\mu m$ , valor relacionado con el obtenido en las de medidas microscópicas y determinado mediante el proceso de aproximación de defectos en

picos explicado en la sección 4.3.

La curva de eficiencia es comparable con los resultados obtenidos con las simulaciones mediante software. Las simulaciones mediante software tienen en cuenta los defectos de los vértices y la absorción del material, pero no tienen en cuenta algunas imperfecciones de la lámina como estrías, juntas de unión, recubrimientos de la lámina, suciedad, etc... debido a los elevados requerimientos en el procesamiento de datos y la dificultad de realizar aproximaciones.

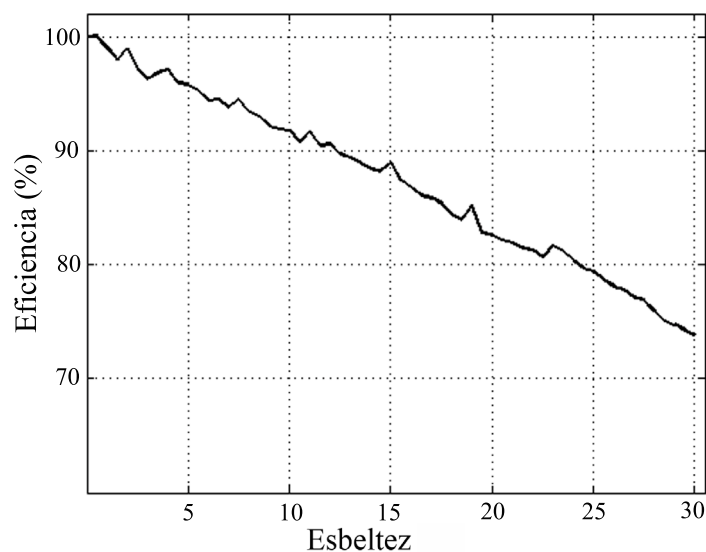


Figura 4.11: Eficiencia medida experimentalmente a lo largo de una guía prismática de esbeltez 30

## 4.7. Ajuste del modelo de eficiencia

Como resultado de los datos obtenidos de las simulaciones tridimensionales mediante software y utilizando el algoritmo de optimización simplex de Nelder [121] se fija el valor de los parámetros  $k_1$  y  $k_2$ . A partir de los datos experimentales se obtiene el término  $k_3$ .

$$T_g(r, \mu, \rho) = e^{-k_1 r \rho} e^{-k_2 \mu \rho} e^{-k_3 \rho}. \quad (4.4)$$

Los parámetros de ajuste finales son identificados como:  $k_1 = 2.6 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$ ,  $k_2 = 5.8 \cdot 10^3 \text{ m}$  y  $k_3 = 1.3 \cdot 10^{-3}$ . En la figura 4.12 se muestra la contribución de cada uno de los términos de la ecuación 4.4 de manera independiente: el radio en vértices de  $3 \mu\text{m}$  (línea continua), la absorción (línea punteada) y las pérdidas residuales (línea punteada con guión). Este radio ha sido determinado mediante las medidas realizadas a microescala con las técnicas SEM y TOPAF. De los datos obtenidos, podemos

concluir que las pérdidas debidas a defectos en los vértices, calculados mediante una aproximación al radio del vértice, es aproximadamente cinco veces mayor que otros factores de pérdidas. Concluimos por lo tanto que el decrecimiento en transmitancia de CPLGs está altamente relacionado con los defectos en los vértices, condicionado por las limitaciones de fabricación.

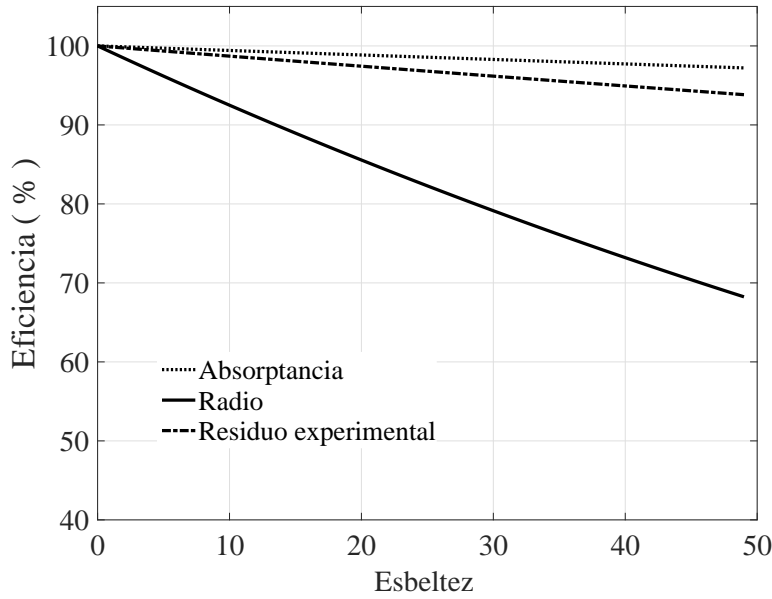


Figura 4.12: Eficiencia de cada uno de los tres parámetros del modelo teórico evaluados de manera independiente en diversas relaciones de aspecto y con un radio en vértices de  $3 \mu m$

Los resultados de eficiencia del modelo semiempírico se han contrastado con los resultados de las simulaciones y las medidas experimentales (Fig. 4.13). Los resultados de las medidas experimentales (línea continua negra) se superponen al ajuste del modelo de la ecuación 4.4, que se muestra mediante una línea continua roja y tiene en cuenta todos los factores de pérdidas definidos, es decir, los tres términos. El ajuste con los dos primeros términos de la ecuación teniendo en cuenta los defectos en vértices y la absorptancia se representa en línea discontinua roja, en este caso también se obtiene una elevada correlación con el valor obtenido con simulaciones mediante software representado en línea discontinua azul.

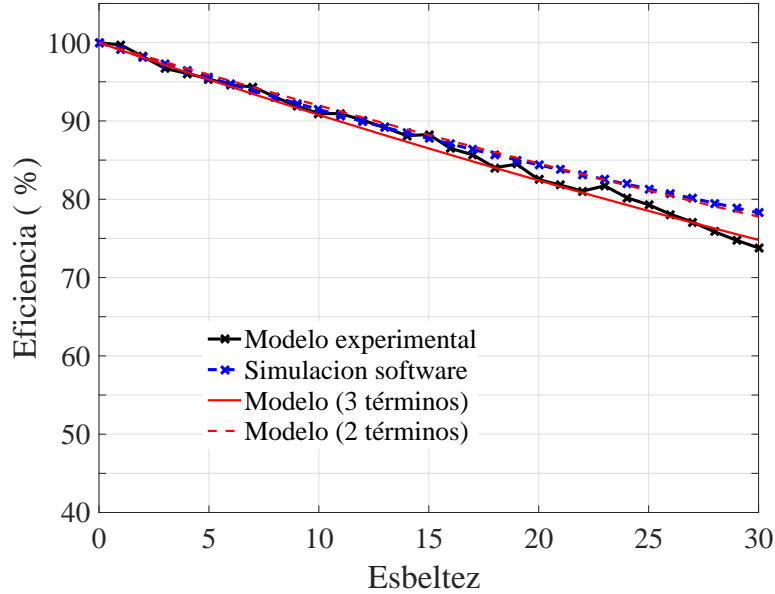


Figura 4.13: Resultados del modelo matemático de ajuste de la eficiencia, los resultados obtenidos en las simulaciones y los obtenidos en las medidas experimentales

## 4.8. Influencia del tamaño de la fuente emisora en la eficiencia

El tamaño de la fuente de luz que incide en la guía es un parámetro que condiciona la cantidad de flujo a la salida del sistema. Por ello, en la ecuación 4.4 puede ser añadido un cuarto término, que implica la influencia del área de la fuente  $A$  cuando se evalúa en función del diámetro:

$$T_g(A, \rho) = e^{-k_4 A \rho}, \quad (4.5)$$

de tal forma que la ecuación completa se define de la forma:

$$T_g(r, \mu, \rho, A) = e^{-k_1 r \rho} e^{-k_2 \mu \rho} e^{-k_3 \rho} e^{-k_4 A \rho}. \quad (4.6)$$

Para definir el valor del parámetro de ajuste, la influencia del tamaño de la fuente en la eficiencia es evaluada mediante simulaciones de software con trazado de rayos. La eficiencia se analiza en cinco tamaños de fuente emisora normalizadas en área respecto del área máxima de la apertura (0.01-1), con un radio en vértices de  $3 \mu m$ , sin considerar la absorción y para distintas longitudes de guía. La fuente es

considerada un emisor circular lambertiano que se situa en el centro geométrico de la entrada de la guía emitiendo con un semiángulo de  $30^\circ$ .

La figura 4.14 muestra los resultados de la eficiencia para distintas áreas de fuente emisora y con diversas esbelteces. Al aumentar el diámetro, varía el camino óptico que recorren los rayos e incrementa el número de reflexiones que se producen en la superficie, disminuyendo el flujo de luz que es guiado debido a la dispersión por defectos prismáticos. Por ejemplo, en una esbeltez de 30 hay una diferencia de 5.81 % en los valores extremos del área evaluada, siendo de menor valor la eficiencia obtenida con la fuente de área máxima. Con los resultados obtenidos el valor del parámetro de ajuste  $k_4$  obtenido mediante un algoritmo de optimización [121] ha sido estimado en  $2.55 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-2}$ .

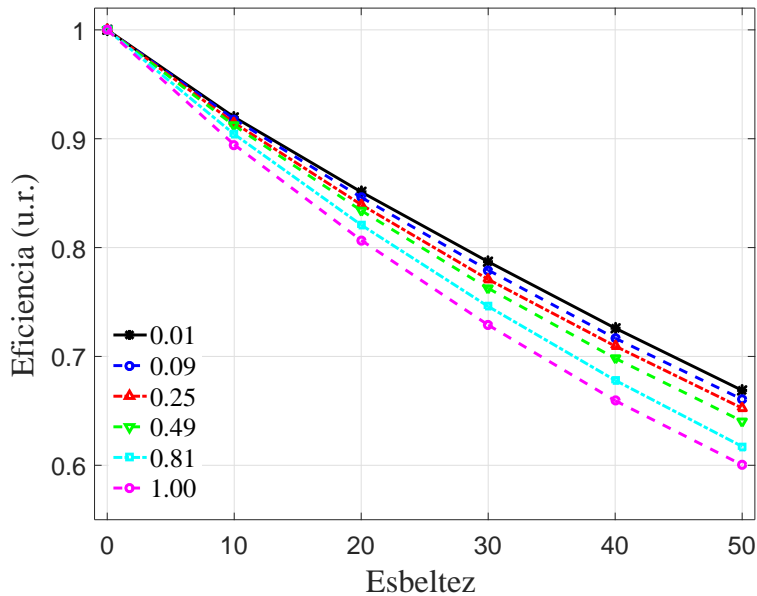


Figura 4.14: Influencia del tamaño de la fuente de iluminación, normalizada a la unidad, en la eficiencia de las CPLGs



## Capítulo 5

# Método de caracterización de la deformación por curvatura de láminas prismáticas

Como se ha demostrado en el capítulo anterior, la eficiencia en la propagación de luz mediante guías prismáticas está altamente influida por las imperfecciones que existen en la lámina que las compone, como por ejemplo desviaciones del ángulo prismático respecto del idóneo, inhomogeneidades en el material y la existencia de irregularidades en los vértices prismáticos que modifican el comportamiento de los rayos [124, 120]. En determinadas aplicaciones, la lámina prismática debe de ser curvada para adaptarse al sistema óptico de guiado, lo que puede provocar cambios geométricos de los prismas con las consecuentes pérdidas en el guiado de la luz.

En este capítulo, se proporciona un método de caracterización de la deformación producida en una lámina prismática inducida por cambios en la curvatura de la guía. Este método está basado en procedimientos de reconocimiento y análisis de imagen. También se cuantifican experimental y teóricamente las pérdidas de luz debidas a estos cambios mediante análisis de transmitancia óptica [125, 126].

### 5.1. Método de caracterización de la deformación en la lámina prismática

Existen diversos métodos para medir la curvatura que se produce en una lámina sometida a tensiones [127]. El método más común se basa en el principio de flexión de sustrato, en el que se mide la deformación debida a la tensión producida en una microestructura a través del estudio del desplazamiento que sufre un disco circular o mediante una barra delgada sometida a flexión. También existen métodos más sofisticados que emplean herramientas analíticas como rayos-x, acústica, espectroscopia

Raman, espectroscopia infrarroja y técnicas de difracción electrónica. Dentro de los métodos empleados, las técnicas ópticas proporcionan información del desplazamiento, la tensión y el estrés, con ventajas como la posibilidad de abarcar un amplio campo de visión sin la necesidad de que exista contacto con el material [128].

Las propiedades mecánicas del policarbonato del que está compuesta la lámina prismática tienen gran importancia porque condicionan el rendimiento óptico del sistema. Los policarbonatos son polímeros termoplásticos que tienen un comportamiento de la deformación en función de la tensión, que es lineal en valores bajos y está descrito por la Ley de Hooke [129], sin embargo, la respuesta mecánica es más sensible al aumentar la tensión. Tales consideraciones ponen de relieve el hecho de que la variación en el diámetro de las guías pueda condicionar las deformaciones mecánicas en la lámina prismática. Por lo tanto, es importante evaluar dichas deformaciones y la influencia que tienen sobre la eficiencia de las guías prismáticas. Cuando un cuerpo plástico se somete a deformaciones (Fig. 5.1), sufre tensiones interiores que en ocasiones generan cambios en la forma. Para evaluar los cambios de forma, el estudio teórico de la elasticidad proporciona soluciones valiosas en el análisis de estructuras simples, pero los cálculos se complican en estructuras complejas, por lo que en estos casos es conveniente emplear técnicas experimentales para caracterizar las deformaciones debidas a las tensiones.



Figura 5.1: Guía prismática que muestra la lámina prismática curvada en su interior

Con el fin de medir la deformación de los prismas que componen la lámina bajo

la influencia de las tensiones producidas en distintas curvaturas, se ha llevado a cabo un procedimiento experimental. A partir de imágenes de la lámina curvada, se ha realizado la detección del contorno mediante técnicas de procesado de imagen digital, determinando los cambios que se producen en la geometría prismática. Posteriormente, se ha cuantificado el ángulo definido en el contorno prismático en función de la curvatura inducida. El ángulo definido por el vértice prismático, es un parámetro clave que indica el correcto funcionamiento de la lámina prismática como sistema de guiado.

En este estudio, se ha analizado la deformación de una lámina prismática abarcando un amplio rango de curvaturas, desde la superficie plana hasta 30 mm de diámetro. El parámetro que determina la curvatura de la lámina  $K$  es definido como la inversa del radio  $R$  ( $K = \frac{1}{R}$ ). Las curvaturas evaluadas son 0 (plano), 6.67, 10.00, 20.00, 40.00, 57.14 y 66.67  $m^{-1}$ .

Para analizar las modificaciones en el perfil prismático, se ha realizado una sección transversal mediante un corte de precisión en una lámina cuya base tiene una anchura típica de 356  $\mu m$  y una altura de 178  $\mu m$ . Posteriormente, la muestra ha sido recubierta con una evaporación de óxido de magnesio para mejorar el contraste de la imagen y eliminar reflejos parásitos que puedan inducir errores. Las imágenes del perfil se han realizado con un Microscopio Óptico (Motic SMZ-143) equipado con una cámara digital (Moticam 2000).

La figura 5.2 muestra la sección transversal de la lámina prismática empleada para analizar la deformación del contorno con una curvatura de 57.14  $mm^{-1}$ .

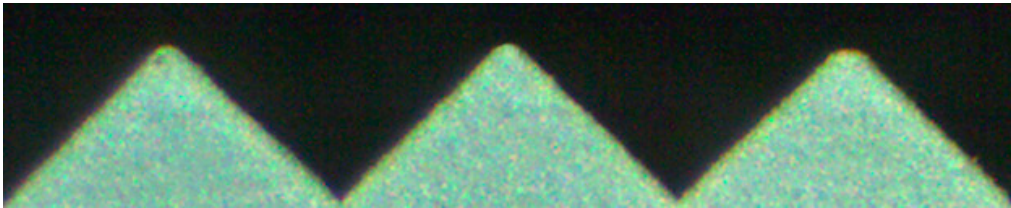


Figura 5.2: Imagen de la sección transversal de la lámina prismática con una curvatura de 57.14  $m^{-1}$  empleada para analizar la deformación del contorno (100 X)

El perfil del borde se ha obtenido mediante el operador de Canny [130], que encuentra las fronteras buscando los máximos locales del gradiente de una imagen binaria. La función empleada en la búsqueda, calcula el gradiente usando la derivada de un filtro gaussiano y utiliza dos umbrales, uno superior que marca los píxeles con valor mayor identificándolos como bordes fuertes y otro inferior que identifica los píxeles cuyo valor es mayor como bordes débiles. Posteriormente se ha aplicado la Transformada de Hough (HT) [131], una técnica de segmentación de imagen que emplea la detección de bordes del contorno de la imagen para generar una imagen en el dominio Hough. Esta técnica determina el conjunto de rectas encontrando puntos alineados que satisfagan la ecuación de la recta. La HT se emplea para identificar

los parámetros de la línea utilizando la representación paramétrica de la recta  $Y = mX + b$ , donde  $m$  es la pendiente de la línea,  $b$  es el punto de intersección de la línea con el eje  $Y$  y  $X$  es la variable independiente de la función  $Y = f(X)$ .

El método de detección de bordes mediante el operador de Canny y de líneas mediante agrupaciones de puntos con el algoritmo de análisis automatizado de Hough, resuelve los inconvenientes que existen en la detección de figuras debidos a ruido en la imagen, detectando los bordes de la estructura prismática con elevada precisión.

La figura 5.3 representa la imagen de la lámina prismática con una curvatura de  $20 \text{ m}^{-1}$ , en la que han sido marcadas las líneas identificadas mediante HT en color rojo y el borde del contorno de la figura en color blanco. El valor escalar que especifica la distancia entre dos segmentos de línea asociados a la misma HT puede ser modificado en función del tamaño de la imagen y de la resolución de los valores requeridos.

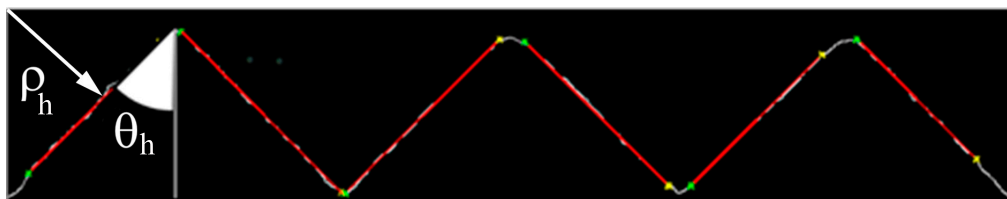


Figura 5.3: Mapa de bordes de una lámina prismática (línea blanca) con las líneas de Hough identificadas en una curvatura de  $20 \text{ m}^{-1}$  (líneas rojas)

Para evitar los inconvenientes que surgen al emplear la representación paramétrica de la recta en la diferenciación de líneas verticales y horizontales, la HT utiliza la representación polar:  $\rho_h = X \cos(\theta_h) + Y \sin(\theta_h)$ . Rho ( $\rho_h$ ) indica la distancia perpendicular desde el origen de la imagen a la línea a través del vector perpendicular a la línea y theta ( $\theta_h$ ) indica el ángulo entre el vector perpendicular a la recta que pasa por el origen de coordenadas y el eje  $X$  positivo. La HT toma como entrada la imagen binaria y produce como salida, una imagen que muestra las posiciones de las discontinuidades en intensidad. El resultado de la HT se almacena en una matriz que es considerada un acumulador. Cada celda del acumulador representa una línea cuyos parámetros se pueden obtener a partir de la posición de la celda. La HT determina las características del contorno a la vez que las cuantifica.

La matriz acumuladora que representa la transformación de una lámina con curvatura  $20 \text{ m}^{-1}$  se representa en la figura 5.4. En el eje horizontal se muestra el ángulo  $\theta_h$  en radianes y en el eje vertical la distancia  $\rho_h$  en píxeles. Cada elemento de la matriz contiene el valor de los píxeles que están situados en la línea con los parámetros  $(\rho_h, \theta_h)$ . El valor más alto marcado con un cuadrado rojo (pico), indica la línea más representada de la imagen de entrada y muestra el valor del ángulo de inclinación de la pendiente predominante. Cada pico corresponde a la pendiente de un prisma, el ángulo negativo corresponde a las aristas de pendiente negativa de la imagen y el

ángulo positivo corresponde a las aristas de pendiente positiva. La detección de la línea está condicionada por una variable que define el salto entre dos píxeles consecutivos establecido en 0.4 y otra que condiciona el espaciado de la transformada de Hough a lo largo del eje  $\theta_h$  fijado en 0.05.

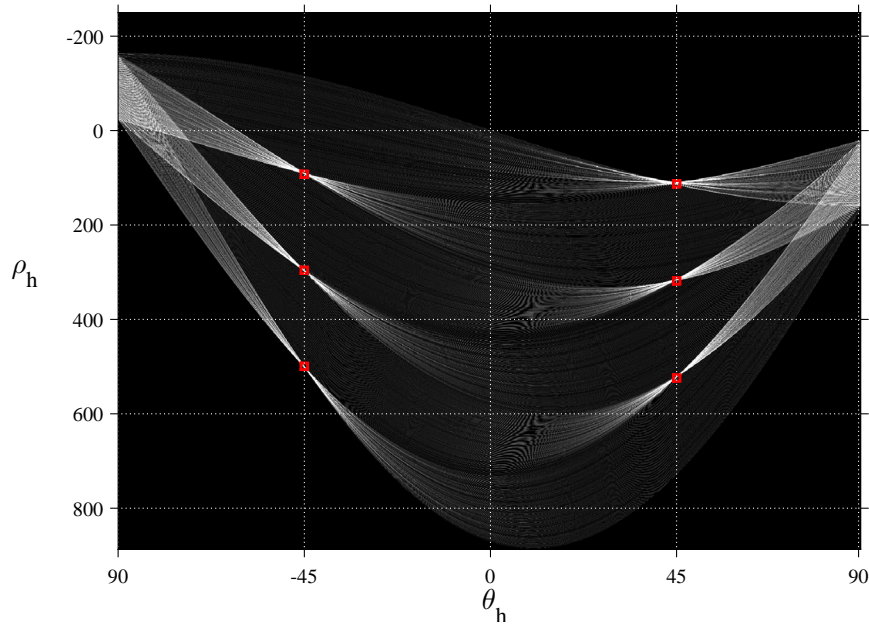


Figura 5.4: La matriz de la HT de la imagen con curvatura  $20 \text{ m}^{-1}$  muestra los picos de Hough identificados con un cuadrado rojo

La figura 5.5 representa los valores de los picos de Hough obtenidos con las distintas curvaturas. El ángulo del vértice prismático, es decir  $2 \times \theta_h$ , es determinado como la media de la suma de las pendientes positivas y negativas correspondientes a cada medida. Se puede observar que el ángulo más representativo de las estructuras analizadas permanece estable desde la lámina plana, referenciado en la figura como curvatura cero, hasta la curvatura de  $20 \text{ m}^{-1}$ . Posteriormente existe un incremento de  $2.5^\circ$  (desde  $89.5^\circ$  hasta  $92^\circ$ ) en el intervalo de  $20.00 \text{ m}^{-1}$  a  $57.14 \text{ m}^{-1}$ . En el último tramo, el ángulo permanece estable en  $\simeq 92^\circ$ .

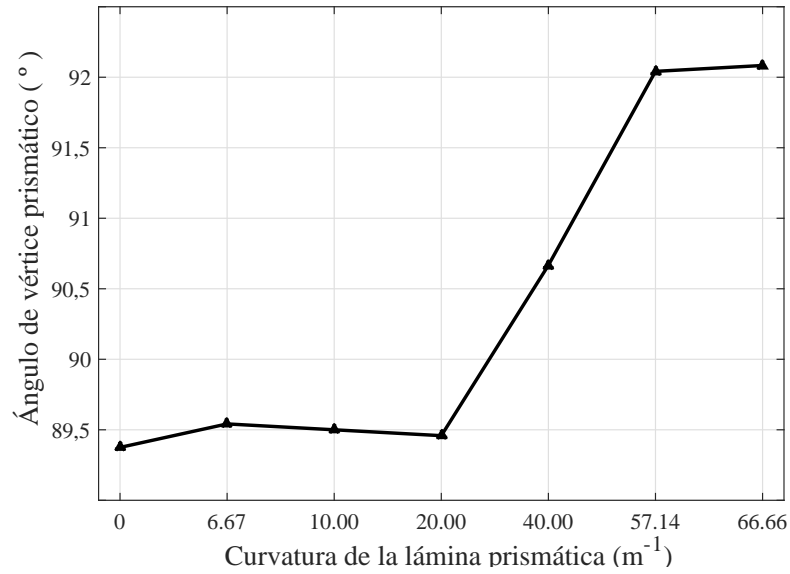


Figura 5.5: Ángulo representativo del vértice prismático obtenido mediante la HT en cada curvatura

Los cambios angulares en cada posición del contorno de las curvaturas extremas del rango evaluado, es decir, en la lámina plana y en la curvatura de  $66.67 m^{-1}$ , se muestran mediante un histograma tridimensional de Hough en las figuras 5.6 y 5.7. En la figura 5.7 se observa un incremento de valores en el entorno de los picos máximos respecto de la lámina plana (Fig. 5.6), lo cual representa el aumento de la deformación del contorno.

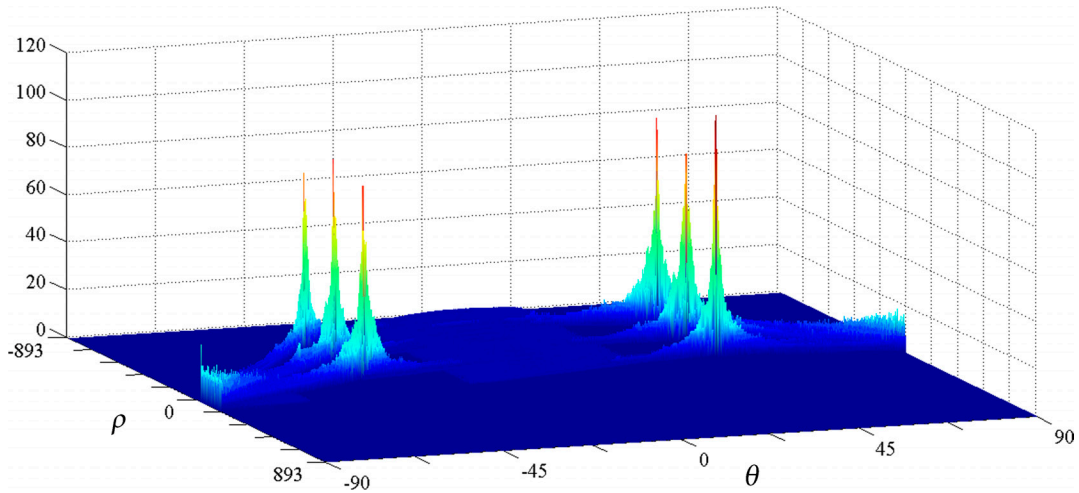


Figura 5.6: Histograma tridimensional de Hough con los valores de seis pendientes de los prismas en la lámina plana

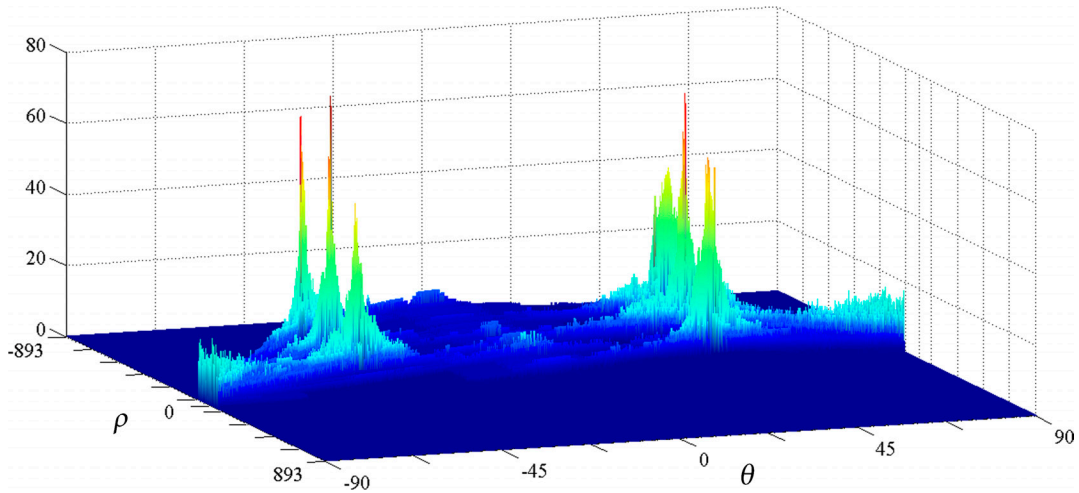


Figura 5.7: Histograma tridimensional de Hough que los valores de seis pendientes de los prismas en la lámina prismática con curvatura de  $66.67 \text{ m}^{-1}$

La figura 5.8 representa la media del desplazamiento angular obtenido en cada curvatura respecto de la lámina prismática plana. Existe un aumento de la deformación angular al cambiar la curvatura en las pendientes de los prismas ( $\pm 45^\circ$ ) y en los extremos de los vértices ( $0^\circ$ ) que varía notablemente cuando la curvatura es mayor a  $20 \text{ m}^{-1}$ .

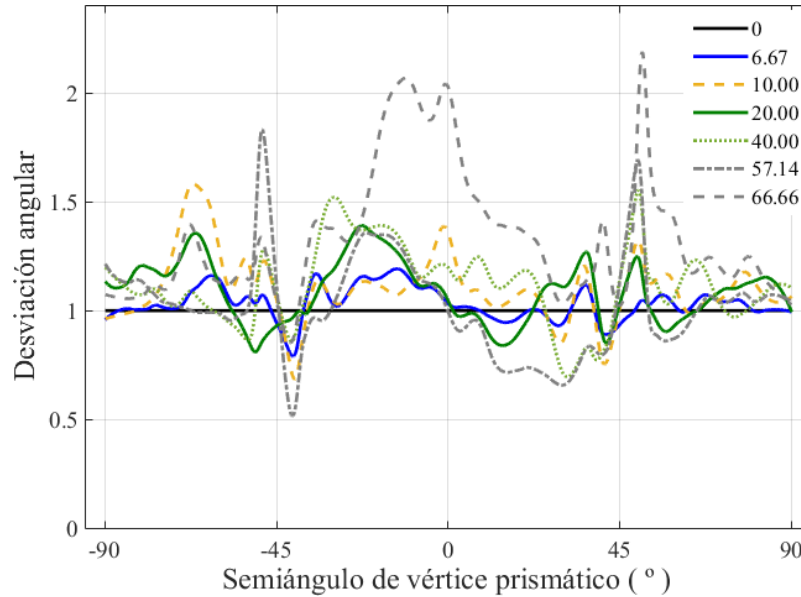


Figura 5.8: Desviación angular obtenida mediante la HT respecto de la posición plana en las distintas curvaturas

De acuerdo con el análisis realizado, podemos concluir que la deformación debida a la curvatura tiene mayor influencia en guías de luz con diámetros desde 0.1 m hasta 0.03 m que corresponden con curvaturas desde  $20 \text{ m}^{-1}$  hasta  $66.67 \text{ m}^{-1}$ .

## 5.2. Cálculo experimental de eficiencia en guías prismáticas curvadas

Mediante un procedimiento experimental, se han cuantificado las pérdidas asociadas a los cambios de curvatura de las guías cilíndricas prismáticas huecas con diversos ángulos de incidencia de la luz.

El montaje experimental consta de un láser He-Ne (JDS Uniphase 1508), cuyo haz de luz incide sobre la superficie plana de una lámina prismática de diversas curvaturas, desde la forma plana hasta la curvatura de  $57.14 \text{ m}^{-1}$ . El láser de He-Ne proporciona un haz de luz colimado con una longitud de onda de  $632.8 \text{ nm}$  y un diámetro de  $4.8 \text{ mm}$ . A pesar de que la lámina prismática produce cambios espectrales mínimos, mediante el uso de una sola longitud de onda, los resultados resultan independientes de las respuestas espectrales debidas a la lámina. El flujo de luz que atraviesa la lámina ha sido evaluado con ángulos de incidencia en el rango de  $15^\circ$  a  $45^\circ$  y en pasos de  $5^\circ$ , un rango suficientemente grande para abarcar el ángulo nominal de aceptación de la lámina prismática ( $\simeq 30^\circ$ ) y poder conocer su influencia. El ángulo de incidencia  $\theta$  se ha determinado respecto al eje de la guía

como se puede observar en el esquema del montaje experimental representado en la figura 5.9 y coincide con el eje de los prismas. La figura 5.10 representa una imagen de la vista superior del montaje experimental. Los resultados obtenidos en las distintas posiciones han sido registrados con un fotómetro (FlexOptometer, Gamma Scientific) situado junto a la superficie prismática cuyo cabezal es un detector de silicio.

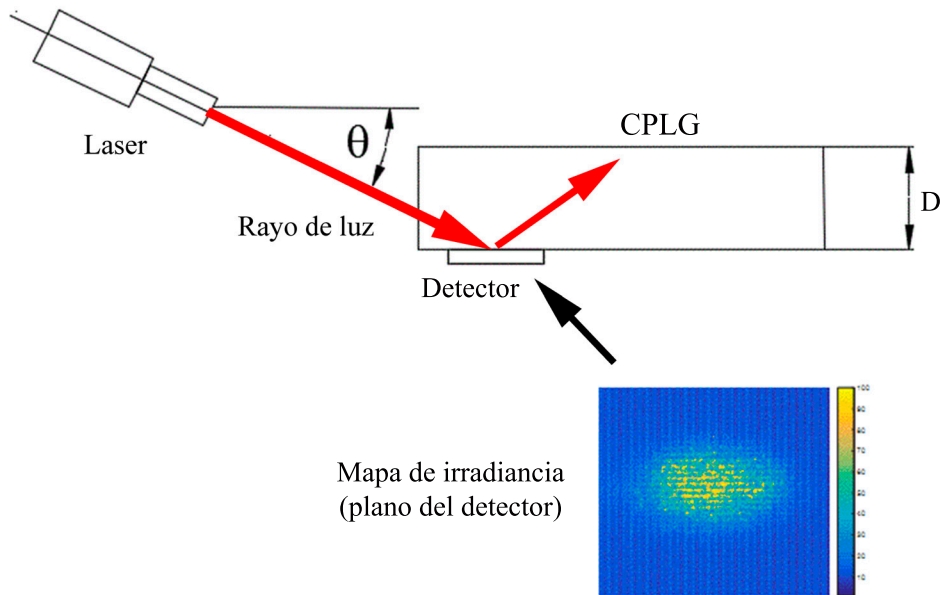


Figura 5.9: Vista lateral del esquema del montaje experimental empleado en el cálculo de la transmitancia óptica a través de la lámina prismática

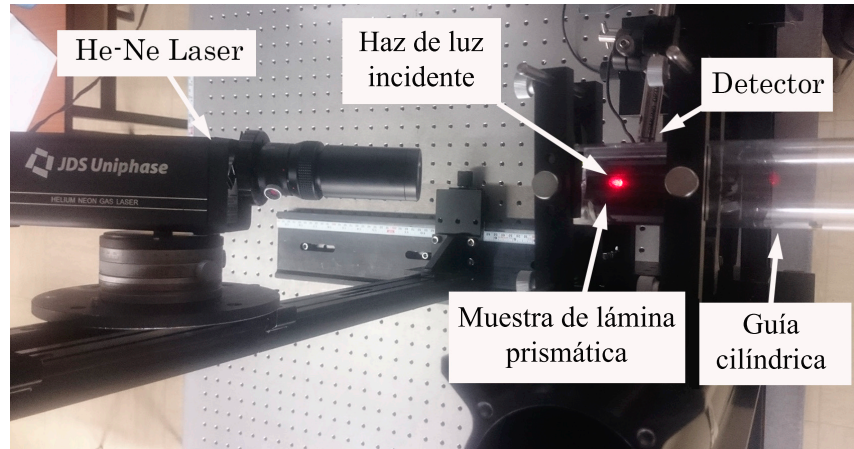


Figura 5.10: Vista superior del montaje experimental empleado en el cálculo de la transmitancia óptica a través de la lámina prismática

El flujo de luz que atraviesa la lámina, representa la cantidad de flujo que no será guiado en el sistema, constituyendo las pérdidas de luz  $\phi_{pt}$ . La transmitancia óptica  $\phi_p$  que define las pérdidas es la relación entre el flujo transmitido a través de la lámina  $\phi_{pt}$  y el flujo incidente  $\phi_{pi}$  en cada curvatura y para cada ángulo de incidencia.

$$\phi_p(\theta, K) = \frac{\phi_{pt}(\theta, K)}{\phi_{pi}(\theta, K)}. \quad (5.1)$$

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.11 donde se puede observar una fuerte dependencia entre la transmitancia óptica y la curvatura. En curvaturas superiores a  $20 \text{ m}^{-1}$  se ha obtenido una transmitancia media que está entre 1.5% y 3.2% aumentando en los ángulos de incidencia más altos. Por ejemplo, en el ángulo de incidencia de  $30^\circ$ , que constituye aproximadamente el ángulo límite para el guiado mediante reflexión total interna, existe un aumento en las pérdidas de hasta 2%. Las pérdidas se intensifican en las curvaturas superiores a  $33 \text{ m}^{-1}$  debido a modificaciones en el recorrido de los rayos, inducidas por la curvatura.

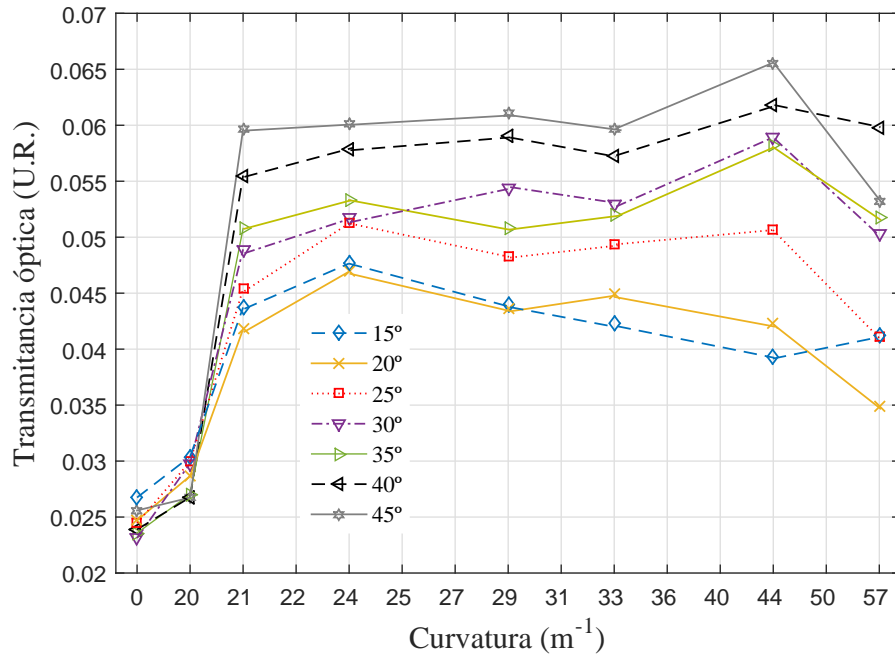


Figura 5.11: Transmitancia óptica (escala de 0 a 1) en función de la curvatura para diversos ángulos de incidencia

### 5.3. Cálculo teórico de eficiencia en guías prismáticas curvadas

Las herramientas de simulación mediante software, permiten evaluar de forma teórica las pérdidas debidas a los cambios morfológicos de los prismas inducidos por la curvatura en la lámina.

Para cuantificar estas pérdidas, se han realizado simulaciones con el programa de trazado de rayos TracePro 7.6 con la configuración del montaje experimental de guías cilíndricas prismáticas de policarbonato mostrada en el apartado 5.2.

En las simulaciones se ha reproducido una lámina prismática cuya base del prisma tiene una anchura de 356  $\mu\text{m}$  y una altura de 178  $\mu\text{m}$ .



Figura 5.12: Diversas curvaturas de lámina prismática reproducidas mediante software de modelado 3D

Para estimar los defectos en la lámina prismática, se han realizado dos aproximaciones. La primera hace referencia a las irregularidades en los vértices de los prismas y es llevada a cabo mediante el redondeo en los vértices prismáticos con un radio del vértice del prisma de  $3 \mu\text{m}$  según el modelo de aproximación descrito en la sección 4.3 del capítulo 4, la segunda aproximación se refiere al aumento angular que se produce entre los prismas al variar la curvatura. El cambio producido en el intervalo total evaluado es de  $\simeq 1.13^\circ$ .

El índice de refracción de la guía ha sido fijado en 1.59 determinado por el uso de un polímero de policarbonato cuyo coeficiente de absorción lineal es de  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$  de acuerdo con las características técnicas de la lámina. La fuente de luz empleada es un laser con diámetro de 4.8 mm y una longitud de onda de 632.8 nm que incide con un ángulo de  $30^\circ$  en la superficie plana de la lámina prismática. Los vértices externos de los prismas se han situado sobre un detector, que recoge el flujo transmitido a través de la lámina.

Los resultados obtenidos con curvaturas de  $8.00 \text{ m}^{-1}$  a  $57.14 \text{ m}^{-1}$  se presentan en la figura 5.13. La transmitancia óptica obtenida en la lámina con curvatura  $8.00 \text{ m}^{-1}$  es de 1.3% y en la de curvatura  $57.14 \text{ m}^{-1}$  de 1.5% resultando un porcentaje de variación entre ambas simulaciones de 15% debido al aumento angular que se produce entre prismas ( $1.13^\circ$ ) al aumentar la curvatura.

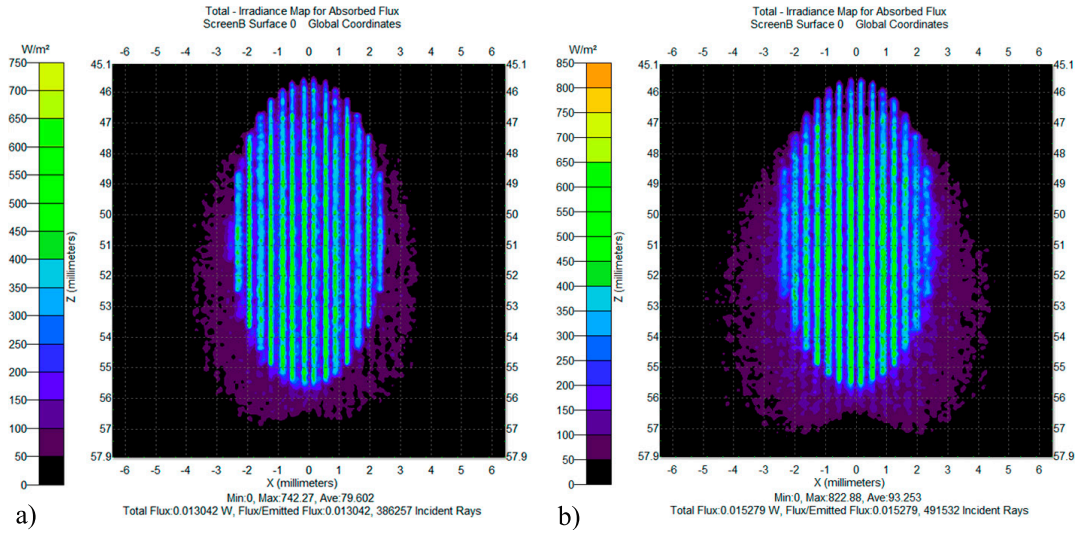


Figura 5.13: Distribución de flujo obtenido en simulaciones tridimensionales con curvaturas de  $8.00 \text{ m}^{-1}$  (a) y  $57.14 \text{ m}^{-1}$  (b)

En la lámina plana se obtienen experimentalmente el doble de pérdidas respecto de las calculadas mediante simulación de software, lo que proporciona una estimación de la influencia de factores como las deformaciones de la superficie, arañazos, grietas, polvo, falta de homogeneidad en el material y errores de medida. Estos resultados teóricos de transmitancia, indican la necesidad de profundizar en el estudio del sistema para poder determinar con precisión el comportamiento óptico.



## Capítulo 6

# Conclusiones

La creciente consideración de la investigación y el desarrollo tecnológico en campos como la energía, el medioambiente y la salud hace que sea de gran interés la integración de la iluminación natural en la arquitectura. El análisis detallado del comportamiento de la luz en sistemas ópticos como las guías prismáticas huecas, junto con la elaboración de nuevos modelos de guiado y metodologías que faciliten la predicción del flujo transportado, permite optimizar su funcionamiento mejorando la eficiencia en sus aplicaciones.

En base a los resultados de los estudios realizados se puede concluir que:

1. Se ha presentado el diseño de un sistema óptico de extracción y guiado de luz de grandes dimensiones aplicado a la edificación, que permite una extracción de luz natural de manera controlada hacia el interior de las construcciones en un amplio rango de posiciones solares, equilibrando el flujo de luz en los distintos espacios. Se ha obtenido un ratio entre 23 y 64 veces mayor con el sistema de extracción en las plantas intermedias de un edificio de cuatro plantas.
2. Se ha desarrollado un sistema óptico basado en óptica anidólica que permite el guiado de luz en los giros de las guías huecas con una elevada eficiencia respecto del diseño estándar, haciendo posible su empleo en edificación de una forma más global y eficiente. Se ha obtenido un 50% del flujo saliente dentro de los 5° centrales siendo por lo tanto la salida de luz más colimada.
3. Se ha comprobado que las reflexiones totales internas que tienen lugar en la lámina plástica prismática empleada en las guías de luz huecas producen un cambio cromático mínimo en el espectro de salida. Sin embargo, para el conjunto de longitudes y esbelteces empleados en arquitectura, en guías de aluminio existe un desplazamiento cromático significativo que se dirige hacia la zona de los amarillos debido al patrón de reflectancia espectral que tiene lugar en su superficie. Por ejemplo, la diferencia de color es 3.4 veces menor en guías prismáticas respecto de guías de aluminio para una esbeltez de 5.

4. Se ha comprobado experimentalmente que las guías prismáticas proporcionan mejor reproductividad cromática con respecto a las guías compuestas de materiales especulares de alta reflectancia. La diferencia de color obtenida en el espacio Cielab de las guías prismáticas presenta una media de 1.20 unidades con una desviación estándar de un 0.33 %; sin embargo la guía de aluminio presenta una media de 7.44 % con una desviación estándar de 2.40 %. Los valores de diferencia de color Cielab obtenidos con la guía de luz prismática evaluados a través de 24 muestras de color Munsell, están dentro del rango óptimo de 2 unidades de diferencia cromática Cielab.
5. Se ha analizado teóricamente la distribución de energía espectral de dos guías huecas con geometrías cilíndrica y rectangular, una de aluminio y otra prismática. Se han cuantificado diversas propiedades del color en los sistemas como la temperatura de color correlacionada (CCT) y el índice de reproducción cromática (CRI), obteniéndose mejoras en la guía prismática. Al analizar los resultados de rendimiento cromático, existe un cambio significativo en la guía de aluminio. En el caso de una guía rectangular de 15 m existe una diferencia de 21,82 % entre la guía de aluminio y la prismática. En el caso de una guía cilíndrica la diferencia es de 17.99 %.
6. Se ha comparado teóricamente la eficiencia de guías prismáticas cilíndrica y rectangular demostrándose que las guías cilíndricas prismáticas, muestran un leve incremento de eficiencia respecto de las rectangulares debido a la ausencia de esquinas y a un guiado de luz más colimado. Por ejemplo, se ha obtenido una diferencia en eficiencia de un 2 % a los 5 m con una longitud de onda de 546 nm.
7. Se ha demostrado que la distribución angular de la luz que incide en el sistema de guiado prismático hueco está altamente condicionado por los defectos de superficie y es un parámetro crítico que determina la eficiencia a lo largo del sistema. Las pérdidas laterales son mayores cuando el semiángulo es superior a  $30^\circ$ , disminuyendo en un orden de un 30 % en una guía de esbeltez de 30 para una estimación de defectos en vértices de prismas de un radio de  $3 \mu m$ , valor cuantificado experimentalmente mediante técnicas microscópicas.
8. Se ha propuesto un modelo matemático de eficiencia en guías prismáticas huecas que muestra la influencia que tienen diversos parámetros en el guiado de la luz. Estos parámetros son los defectos en los vértices de los prismas, el coeficiente de absorción del material, defectos residuales de la lámina y el tamaño de la fuente de luz. Este modelo muestra cómo los defectos en los vértices de la lámina prismática son considerados como la principal fuente de pérdidas. Para una aproximación de defectos de un radio en vértices de  $3 \mu m$ , valor determinado mediante medidas realizadas a microescala con las técnicas SEM y

TOPAF, podemos concluir que las pérdidas debidas a defectos en los vértices es aproximadamente cinco veces mayor que otros factores de pérdidas. Dicho modelo permite una simulación precisa a la vez que no requiere gran capacidad de procesado y es por tanto fácilmente aplicable.

9. Se ha elaborado un método de caracterización de la deformación inducida por cambios en la curvatura en una lámina prismática, y se han evaluado experimental y teóricamente las pérdidas de luz asociadas mediante análisis de transmitancia óptica, comprobándose que existe un aumento de la deformación angular en curvaturas mayores de  $20 \text{ m}^{-1}$ , lo que se corresponde con un diámetro menor de 0.05 m. Los resultados teóricos obtenidos en transmitancia indican la necesidad de profundizar en el estudio del sistema para poder determinar con precisión el comportamiento óptico.



# Publicaciones generadas

- [91] D. Vázquez-Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, B. García-Fernández and E. Bernabeu, High efficiency 90 elbow for light guides. In *Proceedings of SPIE, Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems V*, page 70590S, International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [88] A. Álvarez Fernández-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, B. García-Fernández, L. García-Rodríguez, and T. Galán-Cañestro, T. Daylight Illumination system by vertical transparent prismatic lightguide for an office building. *Colour and Light in Architecture First International Conference 2010 Proceedings*, pages 360–365, 2010.
- [103] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena and J. Zoido Chamorro. Alteraciones cromáticas en diversos tipos de guías de luz, *IX Congreso Nacional del Color, Alicante*, pag. 54–57, Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones, 2010.
- [109] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena Lighting quality for aluminum and prismatic light guides. In *SPIE Optical Systems Design*, pages 81700T–81700T, International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [115] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena and E. Bernabeu, Light output losses of prism light guides. In *SPIE Optical Systems Design*, pages 85502Z–85502Z-7, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [89] A. Álvarez Fernández-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, B. García-Fernández System for natural lighting by optical waveguiding and light extraction, applied to buildings. May 18, 2012, WO Patent App. WO2012062941 A1.
- [124] D. Vázquez-Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena and B. García-Fernández D. *Natural Lighting Systems Based on Dielectric Prismatic Film*, Dielectric Material, InTech, 2012.

- [104] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena Evaluación de la calidad cromática en guías de luz prismáticas y de aluminio. *X Congreso Nacional del Color, Valencia*, pag. 361, Comité Español del Color, SEO 2013.
- [120] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena, A. García-Botella and J.C. Martínez Antón, Light losses in hollow, prismatic light guides related to prism defects: a transmittance model. *Chinese Optics Letters*, 13,(9):092201, 2015.
- [125] B. García-Fernández, A. Álvarez Fernández-Balbuena and D. Vázquez-Moliní, Analytical method to measure bending deformations in prismatic optical films. *Chinese Optics Letters*, 14(4):042201, 2016.
- [126] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena, An improved analytical technique for determining bending deformations in prismatic optical films, In *LICHT2016 Karlsruhe*, 293–300, LiTG, 2016.
- [123] B. García-Fernández D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena. Mathematical Model Applied To Improve The Natural Lighting Design *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12,(2): 273–282, 2017.

# Bibliografía

- [1] C.J. Cleveland and C.G. Morris. *Handbook of Energy: Chronologies, Top Ten Lists, and Word Clouds*, volume 2. Elsevier, 2013.
- [2] K. Butti and J. Perlin. *A golden thread: 2500 years of solar architecture and technology*. Cheshire books, 1980.
- [3] M.V. Polión. *Los diez libros de arquitectura*, volume 2. Ediciones Akal, 1992.
- [4] M. García Heras and M. Á. Villegas Broncano. Notas para el estudio científico del vidrio antiguo. *Zephyrus: Revista de prehistoria y arqueología*, 57:377–390, 2004.
- [5] D. Phillips. *Daylighting: natural light in architecture*. Routledge, 2004.
- [6] R.P. Leslie. Capturing the daylight dividend in buildings: why and how? *Building and Environment*, 38(2):381–385, 2003.
- [7] G. Kopp and J.L. Lean. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1), 2011.
- [8] C. Fröhlich and J. Lean. Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 12(4):273–320, 2004.
- [9] D.Y. Goswami, F. Kreith, and J.F. Kreider. *Principles of solar engineering*. CRC Press, 2000.
- [10] S.K. Solanki and Y.C. Unruh. A model of the wavelength dependence of solar irradiance variations. *Astronomy and Astrophysics*, 329:747–753, 1998.
- [11] A. Nabil and J. Mardaljevic. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology*, 37(1):41–57, 2005.
- [12] R.S. Vose, R.L. Schmoyer, P.M. Steurer, T.C. Peterson, R. Heim, T.R. Karl, and J. Eischeid. *The Global Historical Climatology Network: Long-term monthly temperature, precipitation, sea level pressure, and station pressure data*, volume 3912. Oak Ridge National Laboratory Oak Ridge, Tennessee, 1992.

- [13] M. DeKay and G.Z. Brown. *Sun, wind, and light: Architectural design strategies*. John Wiley & Sons, 2013.
- [14] L. Edwards and P.A. Torcellini. *A literature review of the effects of natural light on building occupants*. National Renewable Energy Laboratory Golden, CO, 2002.
- [15] P. Boyce, Claudia H., and O. Howlett. The benefits of daylight through windows. *Troy, New York: Rensselaer Polytechnic Institute*, 2003.
- [16] K.M. Farley and J.A. Veitch. A room with a view: A review of the effects of windows on work and well-being. *NRC Institute for Research in Construction*, 136, 2001.
- [17] R.G. Rodriguez, J.A. Yamín Garretón, and A.E. Pattini. Glare and cognitive performance in screen work in the presence of sunlight. *Lighting Research and Technology*, 48:221–238, 2016.
- [18] N. Ruck, O. Aschehoug, S. Aydinli, J. Christoffersen, I. Edmonds, R. Jakobiak, M. Kischkoweit-Lopin, M. Klinger, E. Lee, G. Courret, et al. Daylight in buildings—a source book on daylighting systems and components. Technical report, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley (USA), 2000.
- [19] P.J. Littlefair. Review paper: Innovative daylighting: Review of systems and evaluation methods. *Lighting Research and Technology*, 22(1):1–17, 1990.
- [20] E.J. Gago, T. Muneer, M. Knez, and H. Köster. Natural light controls and guides in buildings. energy saving for electrical lighting, reduction of cooling load. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:1–13, 2015.
- [21] E.F. Schubert and J.K. Kim. Solid-state light sources getting smart. *Science*, 308(5726):1274–1278, 2005.
- [22] M.S. Mayhoub. Innovative daylighting systems challenges: A critical study. *Energy and Buildings*, 80:394–405, 2014.
- [23] V.R. Garcia-Hansen. *Innovative daylighting systems for deep-plan commercial buildings*. Phd thesis, Queensland University of Technology, 2006.
- [24] P.J. Littlefair et al. *Designing with innovative daylighting*. Building Research Establishment Garston, England, 1996.
- [25] J.T. Kim and G. Kim. Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment*, 45(2):256–269, 2010.

- [26] J. Schuman, F. Rubinstein, K. Papamichael, L. Beltran, E.S. Lee, and S. Selkowitz. Technology reviews: Daylighting optical systems. *DOE Report under Contract DE-AC03-76SF00098 (September 1992)*, 1992.
- [27] W. Wheeler. Apparatus for lighting dwellings or other structures, September 20 1881. US Patent 247,229.
- [28] G. Oakley, S.B. Riffat, and L. Shao. Daylight performance of lightpipes. *Solar Energy*, 69(2):89–98, 2000.
- [29] J. Mohelnikova. Tubular light guide evaluation. *Building and environment*, 44(10):2193–2200, 2009.
- [30] D.J. Carter. The measured and predicted performance of passive solar light pipe systems. *Lighting Research and Technology*, 34(1):39–51, 2002.
- [31] L.A. Whitehead. Simplified ray tracing in cylindrical systems. *Applied Optics*, 21(19):3536–3538, 1982.
- [32] Lambda research corporation. <http://www.lambdares.com/>, 2016.
- [33] J.I. Beare. *Greek theories of elementary cognition from Alcmaeon to Aristotle*. Clarendon Press, 1906.
- [34] D.C. Lindberg. *Theories of Vision from al-Kindi to Kepler*. University of Chicago Press, 1981.
- [35] I. Newton. *Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. London : Printed for William Innys at the West-End of St. Paul’s, 1730.
- [36] C. Huygens and M. Blay. *Traité de la lumière*, volume 13. Gauthier-Villars Paris, 1920.
- [37] T. Young. The bakerian lecture: Experiments and calculations relative to physical optics. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 94:1–16, 1804.
- [38] J.W. Goethe and M. Wenzel. *Zur Farbenlehre*. Deutscher Klassiker Verlag, 1991.
- [39] J.C. Maxwell. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pages 459–512, 1865.
- [40] W.K.H. Panofsky and M. Phillips. *Classical electricity and magnetism*. Courier Corporation, 2005.

- [41] T. Young and P. Kelland. *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts: pt. I. Mechanics. pt. II. Hydrodynamics. pt. III. Physics*, volume 1. Taylor and Walton, 1845.
- [42] F. Hauksbee. A description of the apparatus for making experiments on the refractions of fluids: With a table of the specifick gravities, angles of observations, and ratio of refractions of several fluids. by mr fra. hauksbee, frs. *Philosophical Transactions (1683-1775)*, 27:204–207, 1710.
- [43] J.H. Poynting. On the transfer of energy in the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, pages 343–361, 1884.
- [44] M.K.E.L. Planck. Zur theorie des gesetzes der energieverteilung im normalspectrum. *Verhandl. Dtsc. Phys. Ges.*, 2:237, 1900.
- [45] R.L. Pandey Vimal, J. Pokorny, V.C. Smith, and S.K. Shevell. Foveal cone thresholds. *Vision Research*, 29(1):61–78, 1989.
- [46] N. Bohr. I. on the constitution of atoms and molecules. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 26(151):1–25, 1913.
- [47] L. De Broglie. XXXV. a tentative theory of light quanta. *Philosophical Magazine Series 6*, 47(278):446–458, 1924.
- [48] A. Einstein. On a heuristic point of view about the creation and conversion of light. *Annalen der Physik*, 17(6):132–148, 1905.
- [49] A. Einstein et al. On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, 17(10):891–921, 1905.
- [50] R.A. Millikan. A direct determination of "h.". *Physical Review*, 4(1):73, 1914.
- [51] R.A. Millikan. A direct photoelectric determination of planck's "h". *Physical Review*, 7(3):355, 1916.
- [52] L. De Broglie. *Recherches sur la théorie des quanta*. PhD thesis, Migration-université en cours d'affectation, 1924.
- [53] G.N. Lewis. The conservation of photons. *Nature*, 118:874–875, 1926.
- [54] C. Roychoudhuri, A.F. Kracklauer, and K. Creath. *The nature of light: what is a photon?* CRC Press, 2008.
- [55] M.M. Freundlich. Origin of the electron microscope. *Science*, 142(3589):185–188, 1963.
- [56] F.E. Nicodemus. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Applied Optics*, 9(6):1474–1475, 1970.

- [57] J.R. Meyer-Arendt. Radiometry and photometry: Units and conversion factors. *Applied Optics*, 7(10):2081–2084, 1968.
- [58] CIE Colorimetry. Official recommendations of the international commission on illumination. *Paris: Commission Internationale de l'Éclairage [International Commission on Illumination]*, 1976.
- [59] M.S. Rea. *The iesna lighting handbook: reference & application*. 2000.
- [60] W.R. McCluney. *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House, 2014.
- [61] J. Schanda. *Colorimetry: understanding the CIE system*. John Wiley & Sons, 2007.
- [62] M. Born and E. Wolf. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge university press, 1999.
- [63] A. Ghatak. *Contemporary optics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [64] P.A. Tipler and G. Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología*, volume 2. Reverté, 2005.
- [65] M.S. Mahoney. *The mathematical career of Pierre de Fermat, 1601-1665*. Princeton University Press, 1994.
- [66] S. Juds. *Photoelectric sensors and controls: selection and application*, volume 63. CRC Press, 1988.
- [67] A. Rosemann and H. Kaase. Lightpipe applications for daylighting systems. *Solar Energy*, 78(6):772–780, 2005.
- [68] CIE 173 : 2012. Tubular daylight guidance systems (including erratum 1). *International Commission on Illumination*, 2012.
- [69] M. Mayhoub and D. Carter. Hybrid lighting systems: A feasibility study for europe. *Proceeding of the 11th LuxEuropa*, pages 265–272, 2009.
- [70] M.S. Mayhoub and D.J. Carter. Towards hybrid lighting systems: A review. *Lighting Research and Technology*, 2009.
- [71] Y.T. Chen, K.K. Chong, T.P. Bligh, L.C. Chen, J. Yunus, K.S. Kannan, B.H. Lim, C.S. Lim, M.A. Alias, N. Bidin, et al. Non-imaging, focusing heliostat. *Solar Energy*, 71(3):155–164, 2001.
- [72] L.M. Fraas, W.R. Pyle, and P.R. Ryason. Concentrated and piped sunlight for indoor illumination. *Applied optics*, 22(4):578–582, 1983.

- [73] I. Wong and H.X. Yang. Introducing natural lighting into the enclosed lift lobbies of highrise buildings by remote source lighting system. *Applied Energy*, 90(1):225–232, 2012.
- [74] I. Edmonds. Transmission of mirror light pipes with triangular, rectangular, rhombic and hexagonal cross section. *Solar Energy*, 84(6):928–938, 2010.
- [75] I.R. Edmonds, G.I. Moore, G.B. Smith, and P.D. Swift. Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels. *Lighting Research and Technology*, 27(1):27–35, 1995.
- [76] A. Álvarez Fernández-Balbuena. *Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. Phd thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2012.
- [77] A.A. Elmualim, S. Smith, S.B. Riffat, and L. Shao. Evaluation of dichroic material for enhancing light pipe/natural ventilation and daylighting in an integrated system. *Applied Energy*, 62(4):253–266, 1999.
- [78] M. Kocifaj. Efficient tubular light guide with two-component glazing with lambertian diffuser and clear glass. *Applied Energy*, 86(7):1031–1036, 2009.
- [79] W.K. Osterhaus. Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments. *Solar Energy*, 79(2):140–158, 2005.
- [80] I.R. Edmonds, J. Reppel, and P. Jardine. Extractors and emitters for light distribution from hollow light guides. *Lighting research and Technology*, 29(1):23–32, 1997.
- [81] J.C. Knight and P. S. J. Russell. New ways to guide light. *Science*, 296(5566):276–277, 2002.
- [82] D. Colladon. On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream. *Comptes Rendus*, 15:800, 1842.
- [83] D. Liang, L.F. Monteiro, M.R. Teixeira, M.F. Monteiro, and M. Collares-Pereira. Fiber-optic solar energy transmission and concentration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 54(1):323–331, 1998.
- [84] J. Hecht. *Understanding fiber optics*. Jeff Hecht, 2015.
- [85] P.D. Swift and G.B. Smith. Cylindrical mirror light pipes. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36(2):159–168, 1995.
- [86] D. Jenkins and T. Muneer. Light-pipe prediction methods. *Applied energy*, 79(1):77–86, 2004.

- [87] RLA. <http://ruizlarrea.com/sistema/pozo-de-luz>, 2016.
- [88] A. Álvarez Fernández-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, B. García-Fernández, L. García-Rodríguez, and T. Galán-Cañestro. Daylight illumination system by vertical transparent prismatic lightguide for an office building. *Colour and Light in Architecture First International Conference 2010 Proceedings*, pages 360–365, 2010.
- [89] A. Álvarez Fernández-Balbuena, D. Vázquez-Moliní, and B. García-Fernández. System for natural lighting by optical waveguiding and light extraction, applied to buildings, May 18 2012. WO Patent App. WO2012062941 A1.
- [90] I.R. Edmonds. Transmission of light through right-angle corners in hollow light guides. *Applied optics*, 34(28):6522–6526, 1995.
- [91] D. Vázquez-Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, B. García-Fernández, and E. Bernabeu. High efficiency 90 elbow for light guides. In *Proceedings of SPIE, Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems V*, page 70590S. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [92] R. Winston, J.C. Miñano, P.G. Benitez, et al. *Nonimaging optics*. Academic Press, 2005.
- [93] J.T. Remillard, M.P. Everson, and W.H. Weber. Loss mechanisms in optical light pipes. *Applied optics*, 31(34):7232–7241, 1992.
- [94] G.B. Smith and C.G. Granqvist. *Green nanotechnology: solutions for sustainability and energy in the built environment*. CRC Press, 2010.
- [95] K.G. Kneipp. Use of prismatic films to control light distribution. In *International Lighting in Controlled Environments Workshop*, volume 1, pages 307–318, 1994.
- [96] N. Ohta and A. Robertson. *Colorimetry: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, 2006.
- [97] D.H. Brainard. Color appearance and color difference specification. *The science of color*, 2:191–216, 2003.
- [98] CO Munsell Color. *Munsell soil color charts*. Gretabacbeth, 2000.
- [99] CIE Technical Report:15.2004. Colorimetry. *CIE Central Bureau, Vienna*, 2004.
- [100] CIE Publication:13.3. Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources. *Commission Internationale de l'Éclairage*, 1995.

- [101] A.R. Robertson. Historical development of cie recommended color difference equations. *Color Research & Application*, 15(3):167–170, 1990.
- [102] M.D. Fairchild. *Color appearance models*. John Wiley & Sons, 2013.
- [103] B. García-Fernández, D. Vázquez Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, and J. Zoido Chamorro. Alteraciones cromáticas en diversos tipos de guías de luz. In *IX Congreso Nacional del Color, Alicante*, pages 54–57. Universidad de Alicante. Servicio de Publicaciones, 2010.
- [104] B. García-Fernández, D. Vázquez Moliní, and A. Álvarez Fernández-Balbuena. Evaluación de la calidad cromática en guías de luz prismáticas y de aluminio. In *X Congreso Nacional del Color, Valencia*, page 361. Comité Español del Color, SEO, 2013.
- [105] 3M. <http://multimedia.3m.com/mws/media/11326830/3mtm-optical-lighting-film-2405.pdf>.
- [106] S.H. Lin and E.M. Sparrow. Absorption characteristics of a specularly reflecting cylindrical cavity irradiated by an obliquely inclined ray bundle. *Applied Optics*, 4(3):277–283, 1965.
- [107] C.S. McCamy, H. Marcus, and J.G. Davidson. A color-rendition chart. *J. App. Photog. Eng*, 2(3):95–99, 1976.
- [108] M.D. Fairchild and R.L. Alfvín. Precision of color matches and accuracy of color-matching functions in cross-media color reproduction. In *Color and Imaging Conference*, volume 1995, pages 18–21. Society for Imaging Science and Technology, 1995.
- [109] B. García-Fernández, D. Vázquez-Moliní, and A. Álvarez Fernández-Balbuena. Lighting quality for aluminum and prismatic light guides. In *SPIE Optical Systems Design*, pages 81700T–81700T. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [110] L.A. Whitehead. Prism light guide having surfaces which are in octature, April 7 1981. US Patent 4,260,220.
- [111] L.A. Whitehead, R.A. Nodwell, and F.L. Curzon. New efficient light guide for interior illumination. *Applied Optics*, 21(15):2755–2757, 1982.
- [112] L.A. Whitehead and K. Hoffmann. Method for estimating the efficiency of prism light guide luminaires. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 27(2):13–20, 1998.
- [113] S.G. Saxe. Prismatic film light guides: Performance and recent developments. *Solar Energy Materials*, 19(1):95–109, 1989.

- [114] J.Y. Shin, G.Y. Yun, and J.T. Kim. Evaluation of daylighting effectiveness and energy saving potentials of light-pipe systems in buildings. *Indoor and Built Environment*, 21(1):129–136, 2012.
- [115] B. García-Fernández, D. Vázquez-Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, and E Bernabeu. Light output losses of prism light guides. In *SPIE Optical Systems Design*, pages 85502Z–85502Z–7. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [116] N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *Automatica*, 11(285-296):23–27, 1975.
- [117] J.C. Martínez Antón, J. Alonso, J.A. Gómez Pedrero, and J.A. Quiroga. Optical method for the surface topographic characterization of fresnel lenses. In *SPIE Optical Systems Design*, pages 816910–816910. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [118] J.C. Martínez Antón, J.M. Plaza Ortega, and J. Alonso. 3d-form metrology of arbitrary optical surfaces by absorption in fluids. In *SPIE Optifab*, pages 888413–888413. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [119] J.C. Martínez Antón, J. Alonso, J.A. Gómez Pedrero, and J.A. Quiroga. Topographic optical profilometry by absorption in liquids. *Optics express*, 20(27):28631–28640, 2012.
- [120] B. García-Fernández, D. Vázquez-Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, A. García-Botella, and J.C. Martínez Antón. Light losses in hollow, prismatic light guides related to prism defects: a transmittance model. *Chinese Optics Letters*, 13(9):092201, 2015.
- [121] J.A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4):308–313, 1965.
- [122] L.A. Whitehead, W. Su, and D.N. Grandmaison. Evaluation of diffraction loss in prism light guides by finite-difference time-domain field modeling. *Applied optics*, 37(25):5836–5842, 1998.
- [123] B. García-Fernández, D. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena. Mathematical model applied to improve the natural lighting design. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(2):273–282, 2017.
- [124] D. Vázquez-Moliní, A. Álvarez Fernández-Balbuena, and B. García-Fernández. *Natural Lighting Systems Based on Dielectric Prismatic Film*. Dielectric Material, InTech, 2012.

- [125] B. García-Fernández, A. Álvarez Fernández-Balbuena, and D. Vázquez-Moliní. Analytical method to measure bending deformations in prismatic optical films. *Chinese Optics Letters*, 14(4):042201, 2016.
- [126] D. García-Fernández, B. Vázquez-Moliní and A. Álvarez Fernández-Balbuena. An improved analytical technique for determining bending deformations in prismatic optical films. In *LICHT2016 Karlsruhe*, pages 293–300. LiTG, 2016.
- [127] M.J. Madou. *Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization*. CRC press, 2002.
- [128] J.E. Field, S.M. Walley, W.G. Proud, H.T. Goldrein, and C.R. Siviour. Review of experimental techniques for high rate deformation and shock studies. *International Journal of Impact Engineering*, 30(7):725–775, 2004.
- [129] J. Margolis. Engineering thermoplastics: properties and applications. *Plast. Eng.*, 41(11):63, 1985.
- [130] J. Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6):679–698, 1986.
- [131] P.V.C. Hough. Method and means for recognizing complex patterns. Technical report, 1962.