

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



ANÁLISIS DE CORTES ELÍPTICOS EN TUBOS DE LUZ PARA SU EXTRACCIÓN.

Por

GUILLERMO EZEQUIEL SÁNCHEZ GUERRERO

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

*Dedicado a mi familia:  
Mamá, papá;  
y a Perla Viera...  
gracias a ustedes aprendí.*

# AGRADECIMIENTOS

Inicialmente quisiera agradecer al Dr. Romeo Selvas por todo el apoyo que me ha brindado a lo largo de mi formación académica y profesional, así como la oportunidad que me ha brindado de trabajar al lado de todo el cuerpo académico.

Al igual agradezco al Dr. Daniel Ceballos Herrera por todos los certeros consejos que aportó en el desarrollo de la tesis.

También agradezco al Dr. Iván Moreno Hernández por la revisión de este trabajo, así como los consejos sobre como utilizar la información obtenida de las simulaciones.

También agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de manutención con la cual fue posible la realización de estudios de maestría.

Además agradezco a la M.A. Patricia Martínez Moreno y al M.T Rogelio J. Sepúlveda Guerrero, ex directora y director de la facultad por el apoyo que en sus respectivas administraciones han dado al posgrado, en especial al programa de Maestría en Ingeniería Física Industrial.

Igualmente a Perla Viera González y a Gustavo Cárdenas Ortiz por el apoyo que me han brindado dentro y fuera del laboratorio.

Por último pero no menos importante, agradezco de manera muy especial a mi familia que estuvieron brindando un apoyo incondicional durante toda la vida y apoyado en mi desarrollo personal y profesional.

# PRÓLOGO

El presente trabajo aborda un tema de óptica anidólica o no formadora de imágenes, en el problema de dispersión de luz. Éste problema ha sido abordado con diferentes técnicas, como el uso de la dispersión de Mie o con cortes de precisión. El problema de extracción de luz o de dispersión de luz se ha desarrollado junto con nuevas tecnologías de iluminación más eficientes dejando de lado el problema de cómo distribuir esta iluminación. Lo que hace distinto este trabajo de los demás es el proceso de extracción, aquí trabajaremos en cómo romper la reflexión total interna mediante una técnica de reflexión y no de dispersión, lo que hace que sea posible controlar la cantidad extraída y la dirección de una manera eficiente, ya que las técnicas de dispersión redirigen la luz en todas las direcciones.

Tanto en Nuevo León como en todo el mundo, el problema de iluminación de interiores se ha abordado extenuantemente, solo basta mencionar la gran cantidad de dispositivos desarrollados a lo largo de la historia como lámparas fluorescentes, lámparas LED, sistemas de automatización para el encendido de la iluminación, sistemas de iluminación utilizando paneles solares, sistemas de iluminación natural como el tragaluz, sistemas reguladores de intensidad. Por ello se decide abordar esta necesidad.

En el presente trabajo se propone un método de extracción de luz mediante un corte elíptico basado en colectores elípticos compuestos, la propuesta se realiza debido a que, en caso de ser posible, será posible utilizar tubos de luz para poder distribuir la luz en interiores independientemente de la fuente de luz, lo que hace que se acople a distintas tecnologías, además de proponer un método replicable y económicamente viable ya que no se reduce la cantidad de otros componentes ópticos. Una dificultad que se encontró en el trabajo fue que existen pocas fuentes relacionadas a este tema, debido a que es un área de aplicación tecnológica y no de aportación científica en su mayoría.

El método que se propone en este trabajo se trabaja a partir del estudio de los colectores compuestos elípticos y aplicar la metodología a las condiciones de un tubo de luz, y al igual que en el colector se puede replicar la superficie longitudinalmente o con simetría de revolución obteniendo resultados aceptables. Para lograr esto, se estudian los colectores elípticos compuestos, se estudia la propagación de luz en tubos de luz, se hace una propuesta a partir de estos dos estudios y se propone una superficie elíptica que sea capaz de extraer la luz del tubo de luz, a partir de aquí se procede a simular en ZEMAX® los diversos modelos para seleccionar un modelo que nos proporcione luz direccional y uniforme.

Las contribuciones más relevantes de este trabajo se enlistan a continuación:

- Se genera una metodología para poder diseñar superficies elípticas para la extracción de luz en tubos de luz.
- Se estudia un problema de iluminación obteniendo resultados teóricos.
- Se obtuvo información teórica para favorecer el desarrollo de tecnologías.

- 
- Se aporta a la comunidad científica información relevante acerca del uso del colector elíptico compuesto dentro de materiales dieléctricos.
  - Aportación en la óptica anidólica en México.

Por último, en México la óptica anidólica es una rama de poco desarrollo por lo cual se contribuye con un aporte de conocimiento para impulsar a la pequeña comunidad mexicana que se dedica al desarrollo de este tema, el cual es de gran interés a nivel internacional.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>II</b>
<b>PRÓLOGO</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Historia . . . . .	1
1.2. Estándares de iluminación . . . . .	1
1.3. Efectos Fisiológicos y Psicológicos de la iluminación de amplio espectro . . . . .	2
1.3.1. Efectos fisiológicos . . . . .	3
1.3.2. Ritmo circadiano . . . . .	3
1.3.3. Glándula Pineal y Pituitaria . . . . .	3
1.3.4. Dolor de cabeza y fatiga visual. . . . .	4
1.4. Estudios Psicológicos . . . . .	4
1.4.1. Disminución de Abstencionismo . . . . .	4
1.4.2. Percepción de la luz solar . . . . .	4
1.5. Problemática . . . . .	5
1.6. Motivación . . . . .	5
1.6.1. Inadaptabilidad de las nuevas fuentes de iluminación. . . . .	5
1.6.1.1. Migración de Tecnología . . . . .	5
1.6.1.2. Tecnología decorativa . . . . .	6
1.7. Antecedentes . . . . .	6
1.7.1. Sollektor . . . . .	6
1.7.2. Sunlight Direct . . . . .	6
1.7.3. Parans . . . . .	7

1.7.4. En México . . . . .	7
1.8. Aportaciones . . . . .	7
1.9. Resumen Capítular . . . . .	7
<b>2. Conceptos Teóricos</b>	<b>13</b>
2.1. El espectro electromagnético . . . . .	13
2.2. Guías de onda . . . . .	14
2.3. Diseño óptico . . . . .	15
2.3.1. Óptica Anidólica . . . . .	15
2.3.2. Principio de rayos marginales . . . . .	15
2.3.3. Colector Elíptico Compuesto . . . . .	17
2.4. Radiometría y Fotometría . . . . .	17
2.4.1. Conceptos geométricos . . . . .	19
2.4.1.1. Ángulo y Ángulo Sólido . . . . .	19
2.4.1.2. Área proyectada y Ángulo Sólido Proyectado . . . . .	19
2.4.2. Radiometría . . . . .	21
2.4.2.1. Energía Radiante . . . . .	21
2.4.2.2. Flujo radiante . . . . .	22
2.4.2.3. Intensidad Radiante . . . . .	22
2.4.2.4. Radiancia . . . . .	23
2.4.3. Propiedades Radiométricas de los materiales . . . . .	23
2.4.3.1. Reflexión . . . . .	23
2.4.3.2. Transmisión . . . . .	24
2.4.3.3. Absorción . . . . .	25
2.4.4. Fotometría . . . . .	26
2.4.4.1. Visión Fotópica y Escotópica . . . . .	26
2.4.4.2. Energía Luminosa . . . . .	28
2.4.4.3. Flujo o potencia luminosa . . . . .	28
2.4.4.4. Intensidad Luminosa . . . . .	28
2.4.4.5. Luminancia . . . . .	28
2.5. Colorimetría . . . . .	29
2.5.1. Observadores colorimétricos . . . . .	29
2.5.2. Derivación del sistema tricromático CIE XYZ a partir del sistema tricromático CIE RGB. . . . .	30

2.5.3.	Derivación del sistema tricromático CIE XYZ . . . . .	32
2.5.4.	Coordenadas de cromaticidad y el diagrama de cromaticidad . . . . .	34
2.5.5.	Fuentes . . . . .	34
2.5.5.1.	Fuente tipo A . . . . .	35
2.5.5.2.	Fuente tipo $D_{65}$ . . . . .	36
2.5.6.	Resumen Capitular . . . . .	38
<b>3.</b>	<b>Análisis de propagación en un tubo de luz.</b>	<b>39</b>
3.1.	Características de simulación ZEMAX® . . . . .	39
3.1.1.	Modo no secuencial . . . . .	39
3.1.2.	Trazado de Rayos . . . . .	40
3.1.3.	Objetos . . . . .	41
3.1.3.1.	Fuentes . . . . .	41
3.1.3.2.	Objeto no secuencial importado . . . . .	42
3.1.3.3.	Detectores . . . . .	42
3.2.	Configuración inicial para los análisis . . . . .	43
3.3.	Análisis de un tubo de luz cilíndrico . . . . .	45
3.4.	Análisis de un tubo de luz mitad de círculo . . . . .	46
3.5.	Análisis de un tubo de luz cuadrado . . . . .	46
3.6.	Análisis de un tubo de luz hexagonal . . . . .	48
3.7.	Diseño de cortes para extracción de luz . . . . .	49
<b>4.</b>	<b>Análisis de los tubos de luz con un corte transversal.</b>	<b>53</b>
4.1.	Configuración inicial de la simulación . . . . .	53
4.2.	Cilíndrico . . . . .	55
4.3.	Mitad de círculo . . . . .	58
4.3.1.	Corte iniciado en plano . . . . .	59
4.3.2.	Corte iniciado en curva . . . . .	60
4.4.	Cuadrado . . . . .	62
4.5.	Hexagonal . . . . .	65
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>68</b>
5.1.	Conclusiones . . . . .	68
5.2.	Contribuciones . . . . .	69
5.3.	Recomendaciones y trabajo futuro . . . . .	69

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>70</b>
<b>A. Tablas Anexas</b>	<b>72</b>
<b>B. Macros de ZEMAX®</b>	<b>78</b>
<b>C. Propagación de los tubos de luz</b>	<b>80</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1.	Factores externos e internos que influyen en la productividad. [18] . . . . .	9
1.2.	El espectro electromagnético del sol (izquierda) contiene las longitudes de onda a las que nos hemos adaptado. En la iluminación artificial como la incandescente (derecha) es muy difícil simular estas condiciones, usualmente carecen o exceden de azul.[12] . . . . .	10
1.3.	Iluminación LED en Almàssera, Valencia. Imagen tomada de [1]. . . . .	10
1.4.	El máximo entre 420nm y 470nm corresponde a un color cercano al azul.[30] . . . . .	11
1.5.	Luminarias comerciales. Imagen obtenida de [33]. . . . .	11
1.6.	Luminaria híbrida adaptada con el sistema Sollektor. Se utilizan manojos de fibra como en la imagen de la derecha.[6] . . . . .	12
1.7.	Dispensador de emisión lateral diseñado por 3M <sup>®</sup> para SunLight Direct.[32] . . . . .	12
1.8.	Sistema completo de iluminación de Parans. Colecta la luz solar la transmite mediante fibra óptica y la entrega dentro del edificio.[2] . . . . .	12
2.1.	El comportamiento de las ondas es acoplado y viajan a una velocidad de $c = 2.998 \times 10^8 m/s$	13
2.2.	La parte visible es una fracción muy pequeña del espectro. . . . .	14
2.3.	Diagrama de rayos representando el fenómeno de refracción que se produce entre dos medios.	14
2.4.	En esta figura describimos el diafragma de apertura, el cual limita la entrada de los haces a nuestra imagen. Podríamos considerar el diafragma de apertura como una nueva fuente, cuyos rayos marginales salen de sus extremos. . . . .	16
2.5.	En esta imagen se describe el principio de los rayos frontera, los cuales en principio son simétricos, es decir, podemos obtener el mismo resultado cambiando la fuente por receptor. .	16
2.6.	En esta imagen vemos el diseño de un CEC, en el cual, rayos que salgan del punto <b>B</b> llegan al punto <b>D</b> directamente, y pasando por algún punto <b>P</b> . Un rayo saliendo de <b>O</b> pasando por un punto <b>P</b> , también es colectado. . . . .	18
2.7.	Imagen del colector elíptico compuesto, eliminando los trazos de la elipse generadora. Se puede construir utilizando un extruido o revolucionando los segmentos de elipse. . . . .	18
2.8.	El concepto geométrico de un radian. En una circunferencia hay $2\pi$ radianes. . . . .	19
2.9.	Representación de un ángulo sólido, relaciona el área de la superficie con el radio de una esfera.	20
2.10.	La sombra gris es el área proyectada de un área. . . . .	20

2.11. Representación del diferencial del ángulo sólido proyectado. . . . .	21
2.12. La intensidad radiante es la cantidad de flujo de radiación por unidad de ángulo sólido. . . .	22
2.13. La radiancia toma a consideración el área proyectada, lo cual lo hace una cantidad direccional. . . .	23
2.14. Representación de la reflexión especular y difusa. . . . .	24
2.15. Representación de la transmisión especular y difusa. . . . .	25
2.16. Funciones espectrales de eficiencia luminosa del CIE [17]. . . . .	27
2.17. Observador colorimétrico estándar 2°. . . . .	30
2.19. Funciones de igualación de color del observador colorimétrico estándar CIE 1931 de acuerdo a [31]. Los lóbulos negativos representan que para una igualación de color, uno de los estímulos igualadores deben ser agregados al estímulo de prueba. . . . .	30
2.18. Experimento de igualación de color. [5] . . . . .	31
2.20. Funciones de igualación de color imaginarias sin lóbulos negativos. . . . .	33
2.21. Diagrama de cromaticidad, no optimizado para su versión impresa. En la zona central del diagrama se encuentra la fuente $D_{65}$ . . . . .	35
2.22. Distribución de potencia espectral, tal como fue publicada en 1933. . . . .	36
2.23. Distribución de potencia Espectral para una fuente de iluminación tipo A de acuerdo a los estándares de la CIE. . . . .	36
2.24. Distribución de potencia espectral de la fuente tipo $D_{65}$ . . . . .	37
2.25. Comparativa de la fuente tipo A y tipo $D_{65}$ , el punto en el que interceptan las curvas es en 550 nm. . . . .	38
3.1. Arreglo de los materiales introducidos para la simulación. . . . .	44
3.2. En esta imagen vemos como la mayor cantidad del flujo está concentrado en el centro. . . .	45
3.3. Distribución de flujo por un plano medio longitudinal sobre todo el cilindro. Como vemos la mayor parte del flujo se concentra en el centro. A la derecha vemos la distribución de flujo del núcleo del tubo de luz. . . . .	45
3.4. En esta imagen vemos como el comportamiento es muy similar al tubo cilíndrico, con la excepción de que en la mitad donde no hay guía de onda, no existe flujo luminoso. . . . .	46
3.5. Distribución de flujo por un plano medio longitudinal sobre todo el cilindro. Como vemos en el comportamiento del núcleo de la figura de la derecha, es el mismo que en un cilindro completo pero con menor intensidad de flujo. . . . .	47
3.6. Aquí vemos que, a diferencia de los anteriores, el flujo luminoso a sobre toda la cara es casi uniforme, lo cual nos será de gran utilidad en la extracción de luz. . . . .	47
3.7. La imagen sugiere que la intensidad de flujo no se concentra en el centro del tubo de luz durante la propagación, si no durante el momento de su salida. Esta es la principal diferencia con los tubos de luz circulares. . . . .	47
3.8. Aquí vemos que, a diferencia de las otras imágenes, el flujo de salida para un tubo de luz hexagonal es más uniforme en toda la cara. El círculo alrededor del hexagono fue dibujado solamente con propósitos aclaratorios, el hexagono fue construido con un círculo de 2.54 cm circunscrito. . . . .	48

3.9.	La imagen sugiere que la intensidad de flujo no se concentra en el centro del tubo de luz durante la propagación si no hasta el momento de su salida. . . . .	48
3.10.	En esta figura vemos como entra un rayo de luz con un ángulo muy grande provocando un ángulo máximo de $42^\circ$ el cual es el ángulo crítico. . . . .	49
3.11.	En esta figura vemos la distribución angular dentro de los tubos de luz. . . . .	50
3.12.	En esta figura vemos los rayos marginales y algunos secundarios, los cuales nos indican la propagación de los rayos dentro del tubo de luz. . . . .	50
3.13.	Del lado izquierdo tenemos el rayo marginal ajustado al rayo deseado de salida, a partir de ahí, construimos una recta normal a una superficie deseada. En la parte de la derecha mostramos que la restricción para ese punto es cuando sobrepasamos el ángulo crítico. . . .	51
3.14.	Representación de la construcción de la elipse mostrando la distancia focal y los rayos que salen del foco a un punto P. . . . .	51
3.15.	A la izquierda vemos la construcción de la elipse para poder coleccionar los rayos de luz. En la derecha se puede ver la misma imagen sin las partes necesarias de la elipse. . . . .	52
4.1.	Como podemos ver, los diseños de los tubos de luz son distintos pero el diseño del corte en todos ellos es el mismo. Al cortar el tubo de luz, no se elimina ninguna superficie excepto en el caso de la forma de mitad de círculo. . . . .	53
4.2.	En la figura se muestra de manera conceptual la posición de los detectores que se utilizaron para la simulación. . . . .	54
4.3.	Como vemos en la imagen, obtenemos 597 lumen totales por la cara. En comparación de los 1320 lumen que obtenemos de un tubo de luz completo. Lo que significa que el resto es extraído o desviado. . . . .	55
4.4.	La propagación total de la cara al salir será poco uniforme. . . . .	56
4.5.	La mayor parte de los rayos que salen provienen de la parte continua del tubo de luz, en esta imagen vemos que son 478 lumen a comparación de los 597 lumen totales de la cara. . . . .	56
4.6.	Como vemos, continúa siendo una propagación poco uniforme, con tendencia en el núcleo, lo cual se aleja del resultado deseado, ya que deseamos que la propagación continúe uniforme en la cara de salida. . . . .	57
4.7.	En la parte izquierda vemos la posición espacial de nuestro detector y como vemos extraemos 455 lumen. . . . .	57
4.8.	Como se propagará la extracción de luz a una distancia aproximada de 50 cm. Solo se hizo con el propósito de visualizar la propagación de la extracción. Esto no se presentará en los siguientes tubos de luz, debido a que carece de relevancia. . . . .	58
4.9.	El corte elíptico iniciando a partir de la parte plana e iniciando en la parte curva es una variación que tenemos para este caso. . . . .	58
4.10.	Como vemos en la imagen, extraemos 174 lumen totales por la cara. Esto debido a un problema de acoplamiento entre la fibra y el tamaño de este cilindro el cual ya habíamos discutido anteriormente. . . . .	59
4.11.	Lo propagación total de la cara al salir será muy uniforme. . . . .	60

4.12. Espacio de posición y angular para un tubo de luz de medio círculo. Como vemos es capaz de extraer 371 lumen de una manera muy direccional. . . . .	60
4.13. Como vemos en la imagen extraemos 147 lumen totales por la cara. Esto es un caso similar al anterior. . . . .	61
4.14. La propagación total de la cara al salir será menos uniforme que en el caso anterior. . . . .	61
4.15. Espacio de posición y angular para un tubo de luz de medio círculo. Como vemos es capaz de extraer 389 lumen de manera poco direccional. . . . .	62
4.16. Como vemos en la imagen, salen 731 lumen totales por la cara. En comparación de los 1321 lumen que obtenemos de un tubo de luz completo. . . . .	62
4.17. La propagación total de la cara tendrá una mayor densidad en el eje -y, lo que significa que se dirigirá en esa dirección. . . . .	63
4.18. La mayor parte de los rayos que salen provienen de la parte continua del tubo de luz, en esta imagen vemos que son 528 lumen a comparación de los 731 que son los totales de la cara con corte. . . . .	63
4.19. Como vemos la mayor parte de la propagación la determina la parte frontal que es continua, posición (2) de los detectores. Se puede ver en la imagen que pierde densidad en la parte de inferior. . . . .	64
4.20. En la parte izquierda vemos la posición espacial de nuestro detector, y como vemos extraemos 425 lumen. En la parte derecha obtenemos la posición angular de la propagación lo que nos indica una buena direccionalidad. . . . .	64
4.21. Mostramos que la posición angular es muy uniforme lo que significa que la propagación en el espacio tendrá una direccionalidad muy definida. . . . .	65
4.22. Como vemos en la imagen, extraemos 623 lumen totales por la cara frontal. En comparación de los 1320 lumen que obtenemos de un tubo de luz completo. El resto se extrae o se desvía. . . . .	65
4.23. La propagación total de la cara al salir es muy similar al caso de un cilindro cuadrado, sin embargo es de menor uniformidad. . . . .	66
4.24. La mayor parte de los rayos que salen provienen de la parte continua del tubo de luz, en esta imagen vemos que son 412 lumen a comparación de los 623 lumen totales de la cara. El resto proviene de luz no colectada por el corte. . . . .	66
4.25. Como vemos, es una distribución muy uniforme, la cual se podría seguir propagando en el interior del tubo si agregamos otra sección. Aquí se muestra como la cara es de cierta uniformidad. . . . .	67
4.26. En la parte izquierda vemos el espacio de posición de nuestro detector y como se puede ver, extraemos 395 lumen. . . . .	67
C.1. Tubo de luz cilíndrico. . . . .	80
C.2. Tubo de luz de medio círculo. . . . .	81
C.3. Tubo de luz cuadrado. . . . .	82
C.4. Tubo de luz hexagonal. . . . .	83

# LISTA DE TABLAS

1.1. Eventos relevantes de fuentes de iluminación. . . . .	1
1.2. Entornos con necesidades de iluminación . . . . .	2
1.3. Vemos en las encuestas que hay una preferencia en la luz solar. . . . .	5
2.1. Clasificación del espectro electromagnético. . . . .	14
4.1. Características de los detectores utilizados para la simulación. . . . .	54
A.1. Distribución espectral de la visión fotópica y escotópica. . . . .	72
A.2. Funciones de igualación de color imaginarias. . . . .	73
A.3. Valores de la potencia relativa para una fuente tipo $D_{65}$ . . . . .	75

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Historia

Desde que el ser humano empezó a utilizar el fuego alimentado por madera luego carbón, ha sido su principal fuente de iluminación durante muchos siglos, sin embargo, desde la creación de la bombilla en el siglo XIX hasta la fecha, es uno de los inventos más utilizados en el mundo. En Tabla 1.1 mostramos una línea de tiempo de fuentes de iluminación en la que podemos ver las algunas fuentes de iluminación hasta nuestro siglo y cómo han crecido en los últimos años debido a los efectos en la comodidad y bienestar.[26]

Tabla 1.1: Eventos relevantes de fuentes de iluminación.

Año	Evento
1860	Lámpara estándar alimentada por aceite de ballena.
1879	Lámpara Incandescente.
1910	Lámpara de Tungsteno.
1927	Primer Diodo Emisor de Luz (LED)[36]
1960	LÁSER
1961	Lámpara de Tungsteno-Halógeno

Antes de 1940, la luz solar fue la principal fuente de iluminación en edificios; la luz artificial era complemento de la luz natural. Y en menos de 20 años, la iluminación eléctrica transformó por completo los espacios de trabajo cumpliendo las necesidades de iluminación de los ocupantes, logrando construcciones con espacios más alejados de ventanas y edificaciones más altas. En consecuencia, la arquitectura de los edificios ha cambiado y de acuerdo a las nuevas necesidades se requirió establecer estándares de iluminación debido a, entre otras cosas, los efectos fisiológicos y psicológicos de los cuales hablaremos en la Sección 1.3.

### 1.2. Estándares de iluminación

Debido a las nuevas arquitecturas y a las diferentes locaciones, surgió la necesidad de crear organizaciones quienes establezcan y vigilen estándares de iluminación, así nace la Sociedad de Ingeniería en Iluminación de Norte América (Illumination Engineering Society of North America o IESNA por sus siglas en inglés) y la Comisión Internacional de Iluminación (Commission internationale de l'éclairage o CIE) en los años

1906 y 1913 respectivamente. Estas organizaciones tienen como objetivos proveer un foro internacional en el cual se discutan los campos de la luz y la iluminación, desarrollar estándares básicos y procedimientos de metrología, preparar y publicar estándares. Entre los estándares establecidos por estas organizaciones se pueden distinguir diversos tipos de entornos generales como vemos en la Tabla 1.2[28]:

Tabla 1.2: Entornos con necesidades de iluminación

Entornos	Área
Oficinas	Abiertas, privadas, salas de conferencia, salas de videoconferencia
Centros Educativos	Salones de clase, corredores, salas de lectura, bibliotecas, gimnasios, laboratorios
Hospitales	Sala de espera, vestíbulos, cocinas, cuartos de pacientes, enfermerías, estaciones de enfermería, salas de emergencia, salas quirúrgica, salas de recuperación.
Espacios e instituciones públicas	Museos, salas de exhibición, Tribunales, edificios correccionales, áreas de congregación como parques.
Centros comerciales	Aparadores, probadores, quioscos, panoramas.
Residencias	General, cocina, área de lectura.
Otros	Industrias áreas recreativas y deportivas, carreteras, transporte, etc.

A lo largo del tiempo estos estándares se han ido modificando conforme la tecnología permite la mejora de la metrología, teniendo como su base la radiometría, que es la rama de la óptica encargada de la medición de la radiación, de la cual hablaremos en el capítulo 2.

### 1.3. Efectos Fisiológicos y Psicológicos de la iluminación de amplio espectro

Vale la pena mencionar que desde el inicio de la humanidad hemos sido expuestos a la luz solar, lo cual generó una adaptación natural, dicho en otras palabras, nos hemos adaptado a longitudes de onda específicas en todo nuestro organismo; esta adaptación tiene modificaciones importantes sobre nuestro organismo, las cuales se interpretan dos maneras:

1. Fisiológica, todo lo relacionado a la función de nuestro organismo
2. Psicológica: todo lo relacionado a nuestras emociones y estados de ánimo

Antes de iniciar de lleno con los efectos de la luz natural vamos a iniciar con algunos de los factores que influyen en la productividad laboral con el esquema de Hunter y Howlett Figura 1.1. Es de suma importancia ya que podremos ver los factores que estaremos abarcando.

Como vemos en la Figura 1.1, en el nivel 3 un factor que influye en la productividad es el entorno interior en el cual incluyen factores de confort conocidos como: calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés), congregación e iluminación. Los sistemas HVAC ya son conocidos y controlados. En la parte de congregación se refiere a la densidad de personas por área, entre mayor sea esta densidad

menor será el confort. Nosotros no nos enfocaremos en estos factores, estaremos trabajando en la iluminación de los entornos el cual dará un confort fisiológico y psicológico los cuales finalmente mencionaremos a continuación.

### 1.3.1. Efectos fisiológicos

Como mencionamos anteriormente, los efectos fisiológicos son todos aquellos que afectan la función de nuestro organismo. El primer efecto fisiológico de la iluminación es muy obvio, sin iluminación no podemos ver, por ello tiene un gran impacto en nuestro confort. En esta sección hablaremos acerca de los efectos fisiológicos que tiene la luz sobre nosotros. Para iniciar, tenemos que comprender lo que es la luz; físicamente la luz solar es solamente una fuente de radiación electromagnética que es absorbida por los receptores del ojo humano, los conos y bastones. En este aspecto es igual que cualquier otra fuente, ya sea de una bombilla de filamento incandescente o un diodo emisor de luz (LED por sus siglas en inglés), sin embargo, lo que la hace distinta a las demás fuentes es el espectro electromagnético que posee, el cual puede variar con el clima, la latitud y la estación del año. Este espectro es en general continuo, lo cual difiere con las otras fuentes de iluminación, que aunque algunas como las fuentes de xenón que poseen longitudes de onda similares no poseen la variabilidad de la iluminación solar. Para apreciar las diferencias entre los espectros electromagnéticos generados por diversas fuentes en la Figura 1.2 podemos ver el espectro del sol comparado con el espectro de una bombilla incandescente. [12]

### 1.3.2. Ritmo circadiano

Existen ritmos que rigen la actividad tanto de animales como de plantas y se clasifican usualmente como diurna o nocturna. Estos ritmos son conocidos como ritmos circadianos que proviene del latín *circa* que significa “en torno de” y de *dies* que significa “día”, es decir, es un ciclo en torno de 24 horas. Algunos de estos ritmos son respuestas pasivas a cambios de iluminación. [10]

El ritmo circadiano humano tiene un periodo normal de inactividad que comienza varias horas después de iniciar la parte oscura del ciclo del día y noche y persiste durante un periodo viable en la parte iluminada del ciclo. Sin los beneficios de la civilización moderna, el ser humano tal vez iría a la cama y se levantaría más temprano de lo que normalmente lo hace; las luces artificiales son utilizadas para retrasar el momento de ir dormir, y las persianas, para prolongar el tiempo de sueño. Cada persona tiene un ciclo diferente, aunque la mayoría de ellas, al encontrarse en una situación de iluminación constante, comenzará a vivir un “día” de aproximadamente 25 horas de duración. Esto funciona bastante bien, porque la simple luz matutina vuelve a poner el reloj en su posición. [10]

El ritmo circadiano es de suma importancia, ya que seremos más productivos cuando estemos en nuestra fase diurna lo cual viene afectado, entre otras cosas, por la iluminación externa. Exponerse a la luz solar es un factor de mayor impacto que con otras fuentes de iluminación, debido a que tiene un mejor efecto en los receptores que modifican el ritmo circadiano.

### 1.3.3. Glándula Pineal y Pituitaria

En 1968 Edwards, L. and Torcellini, P.A relacionaron la secreción de la hormona melatonina debido a la respuesta de la glándula pineal con respecto a la luz entrando por el ojo humano, incrementando de 10 a 20

veces en ausencia de iluminación; esta hormona tiene influencia sobre otras glándulas. Estudios mostraron como la melatonina afecta la salud humana.

*«La energía fotoeléctrica tiene influencia en el funcionamiento de la glándula pituitaria que controla el sistema hormonal y por lo tanto nuestros mecanismos de defensa, relaciones emocionales y de estrés. . . La melatonina es secretada por la glándula en ausencia de luz y donde la luz solar y artificial en el interior de edificios es inadecuada falla la supresión natural de la producción de melatonina y es acompañada por depresión. Estudios ampliamente reconocidos inspirados en la exposición de amplio espectro ha contribuido a la comprensión de cómo el sistema endocrino humano activado por la luz que entra en el ojo humano, regula la química del cuerpo y en particular la secreción o supresión de melatonina. Los niveles de melatonina en el cuerpo determinan el nivel de energía y actividad de una persona. Altos niveles de melatonina provocan somnolencia, mientras que bajos niveles de melatonina corresponden a un estado de conciencia o alerta».*

Fragmento tomado de [14].

### **1.3.4. Dolor de cabeza y fatiga visual.**

Estudios han mostrado que el uso adecuado de la iluminación solar disminuye la incidencia en migraña, dolores de cabeza y fatiga visual. Los dolores de cabeza y migraña están relacionados a niveles insuficientes de luz. Estas enfermedades son reducidas cuando el nivel de iluminación es mejorado usando un espectro adecuado de luz. Sin embargo, el problema principal en oficinas es la fatiga visual. [14]

La fatiga visual está relacionada al espectro de luz presente en el espacio de trabajo y la habilidad del ojo para re-enfocar. La integración propia y el manejo de la iluminación solar en una oficina deben proveer el mejor espectro de luz para el ojo. A su vez cuando al ojo no se le permite re-enfocar a diferentes distancias en periodos largos de tiempo, los músculos dilatadores son acondicionados a un rango limitado de perspectiva, promoviendo la miopía o astigmatismo.

## **1.4. Estudios Psicológicos**

En esta parte solamente mencionaremos algunos de los estudios psicológicos realizados y documentados relacionados con el carácter, comportamientos y estados de ánimo; los cuales son difíciles de establecer debido a la subjetividad de estas variables.

### **1.4.1. Disminución de Abstencionismo**

Las escuelas que han integrado luz fluorescente o natural de amplio espectro mostraron un incremento en la asistencia de maestros y estudiantes comparados con escuelas de iluminación tradicional. Un estudio realizado en escuelas Canadienses muestra un aumento de asistencia de entre 3.2 y 3.8 más días por año que estudiantes en escuelas con iluminación tradicional. [14]

### **1.4.2. Percepción de la luz solar**

La iluminación solar es preferida sobre la iluminación artificial, esto queda demostrado en diversos trabajos, debido a que la luz natural puede, al menos en periodos cortos, mejorar el estado de ánimo. En la Tabla 1.3 vemos las preferencias de iluminación para diversas actividades.[18]

Tabla 1.3: Vemos en las encuestas que hay una preferencia en la luz solar.

Factor	Prefiere luz Solar	Prefiere luz artificial	Es indiferente	Sin opinión
Para confort psicológico	88	3	3	6
Para el aspecto y agrado de la oficina	79	0	18	33
Para la salud	73	3	15	8
Para la salud visual	73	9	9	9
Para el aspecto de las personas y muebles	70	9	9	12
Para el desempeño laboral	49	21	27	3
Para la observación cuidadosa	46	30	18	6

## 1.5. Problemática

Como vimos anteriormente, los beneficios de la luz de amplio espectro son considerables y ésta puede ser transmitida de diversas maneras, mediante ventanas, luces de xenón o iluminación con filtros. Sin embargo, en sitios alejados de las ventanas solo se provee la solución por luces de xenón o iluminación con filtros lo cual necesita una mayor inversión inicial y mantenimiento, además de un consumo continuo de energía que de acuerdo a Evan Mills en 1997 representó una producción de 2016 TWh. [21]

Otro factor importante es que en cada cambio de tecnología hubo la necesidad de cambiar completamente los sistemas de iluminación, generando un gran costo además de la conocida como basura electrónica.

La tecnología de iluminación actual tiene un enfoque en focos LED que son de bajo consumo y espectro controlado pero son en su mayoría de una iluminación direccional lo cual hace necesario un cambio completo en las luminarias debido a una nueva fuente. Aquí estará enfocado nuestro trabajo, diseñar un dispersor de luz capaz de integrarse con otras tecnologías como la LED o solar y además de adaptarse a luminarias cilíndricas actuales.

## 1.6. Motivación

### 1.6.1. Inadaptabilidad de las nuevas fuentes de iluminación.

#### 1.6.1.1. Migración de Tecnología

Un caso muy particular es el que se está presentando en países como Valencia, en el cual la iluminación pública de algunas provincias ha migrado de luces de sodio de baja presión a LED sin un estudio previo de los efectos en contaminación lumínica o sobre las personas, podemos ver un ejemplo de estas instalaciones en la Figura 1.3. Además de esto, conservan la luminaria y solo cambian la fuente de iluminación, la cual no está adaptada a la fuente, causando sobrecalentamiento de la fuente y reduciendo el tiempo de vida del

sistema. Han tenido inconvenientes al cambiar de tecnología, ya que las fuentes LED, en este caso a los LED SMD5630 de la marca Samsung, cuyo espectro se muestra en la Figura 1.4 tienen una alta cantidad de color azul que afecta en la producción de melatonina.

Si bien la reducción en consumo de energía eléctrica es muy notable, para este país se ha calculado un retorno de inversión de aproximadamente 2 años, sin embargo, los efectos de los focos LED aún necesitan estudiarse.

### 1.6.1.2. Tecnología decorativa

Al ser una tecnología reciente comercialmente, han sido diseñados una cantidad muy limitada de productos que en su mayoría son decorativos como vemos en la Figura 1.5.

Recientemente también se ha diseñado con un propósito más comercial, como las presentadas por 3M<sup>®</sup> en un trabajo para SunLight Direct, podemos verlo en la Subsección 1.7.2.

## 1.7. Antecedentes

En esta sección mostraremos los trabajos relacionados con iluminación solar interior mediante fibras ópticas. Debido a que mucha información pertenece oculta por cuestiones de derechos de autor de las compañías, no se llevará a fondo como se quisiera en cada uno de los antecedentes.

### 1.7.1. Sollektor

Es un proyecto Alemán que tuvo origen en el 2006 con los estudios de Stefanie Gabel que ha ganado diversos premios a lo largo de su desarrollo. El proyecto propone utilizar fibra óptica en bulto, un ejemplo de esta fibra se muestra en la Figura 1.6, con cada punta distribuida en un área para lograr una iluminación uniforme.

Un inconveniente con este trabajo es la necesidad de utilizar fibras individuales, cada sistema de iluminación requiere más de 100 fibras las cuales, hasta el momento, son instaladas a mano. Lo cual requiere una cantidad de trabajo horas hombre en instalación muy por encima de lo que las luminarias convencionales requieren. Como mencionamos, hay poca información pública acerca de este proyecto.

### 1.7.2. Sunlight Direct

Sunlight Direct es una empresa establecida en Estados Unidos de América cuyo primer producto comercial fue introducido en el 2006, inicialmente con un colector de disco parabólico junto con un bulto hexagonal de fibra y actualmente comercializan una matriz con lentes de Fresnel llamado T6. Para el primer producto comercial, la compañía 3M<sup>®</sup> desarrolló para ellos un cilindro de emisión lateral presentado en la Figura 1.7.

El cual tiene una eficiencia de aproximadamente el 58.4%. [27]

La información acerca del dispersor de emisión lateral es muy limitada, en el capítulo 3 podremos realizar una hipótesis acerca del funcionamiento de este dispersor.

### 1.7.3. Parans

Es una empresa Sueca cuyo primer producto comercial fue en el 2004, desarrollado en la Universidad Técnica de Chalmers en Gothenburg. Sus productos son comercializadas en México con precios muy altos comparados con la iluminación convencional. Entre sus productos se encuentra el llamado L2 Híbrido/puro que es una luminaria híbrida utilizando LED e iluminación solar por fibra óptica. En la Figura 1.8 podemos ver imágenes del sistema completo de parans que colecta, distribuye y entrega luz solar al interior de los edificios, cabe mencionar que hasta la fecha no dan información técnica acerca de sus luminarias o sistemas de dispersión, sin embargo se pueden consultar artículos acerca de su sistema de colección y distribución. [20]

### 1.7.4. En México

En México esta tecnología no está siendo desarrollada, solamente distribuida, en especial la tecnología de Parans y por supuesto la tecnología LED. La iluminación es un campo muy amplio como vimos anteriormente tenemos necesidades de iluminación en hogares, pasillos de cualquier edificación, dentro de nuestras aulas, oficinas, laboratorios, restaurantes, hoteles, inclusive tenemos necesidad de iluminación en los faros de los automóviles y dentro de ellos; son tantas las necesidades y México no ha destacado por sus desarrollos en esta área a nivel científico o comercial. Por ello los sistemas de iluminación interior son de suma importancia.

## 1.8. Aportaciones

Se propondrá un diseño para un cilindro capaz de desviar la luz lateralmente de una fuente direccional, LED o de Fibra Óptica, de manera uniforme. En principio este diseño servirá para cualquier simetría, siendo algunas mas eficientes. El cilindro será diseñado en acrílico con un diámetro de 2.54 cm (1 pulgada) con una longitud de 40 cm. El aporte de este trabajo se podrá aplicar a su vez en otros materiales siempre y cuando sean transparentes y exista un contraste en índice de refracción. Ésto último se presta a trabajo a futuro, en el desarrollo de materiales con propiedades distintas.

Los diseños de elementos dispersores se basan en el principio de dispersión[4], este diseño se basará en la reflexión total interna y su desavenencia, que es el principal aporte de este trabajo. Se estudiará la cantidad de luz extraída del material teniendo en cuenta la geometría del cilindro.

En este trabajo usaremos solamente una fuente y tendremos como finalidad la extracción de luz de un cilindro, el cual se podría utilizar para la iluminación de interiores.

## 1.9. Resumen Capitular

En este capítulo, abordamos temas de gran relevancia para los siguientes capítulos, abordamos una motivación importante que es el bienestar de los ocupantes de un edificio, tomando como bases estudios fisiológicos y psicológicos. También vimos que los diseños de dispersores para iluminación de interiores no han sido desarrollados plenamente, o que cuya construcción, como la de 3M<sup>®</sup>, requiere de altos costos y equipo especializado. También, implícitamente, buscamos diseños en el cual la construcción de dicho dispersor sea de bajo costo y que no requiera de equipo altamente especializado, por lo cual se tomará en cuenta en el

desarrollo de la simulación para, en un trabajo a futuro, poder realizar la construcción de un dispersor. A su vez, abarcamos parte de la inadaptabilidad de la tecnología actual para distribuir la luz en el interior de manera eficiente.

Lo anterior es de mucha importancia como una motivación importante de esta tesis.

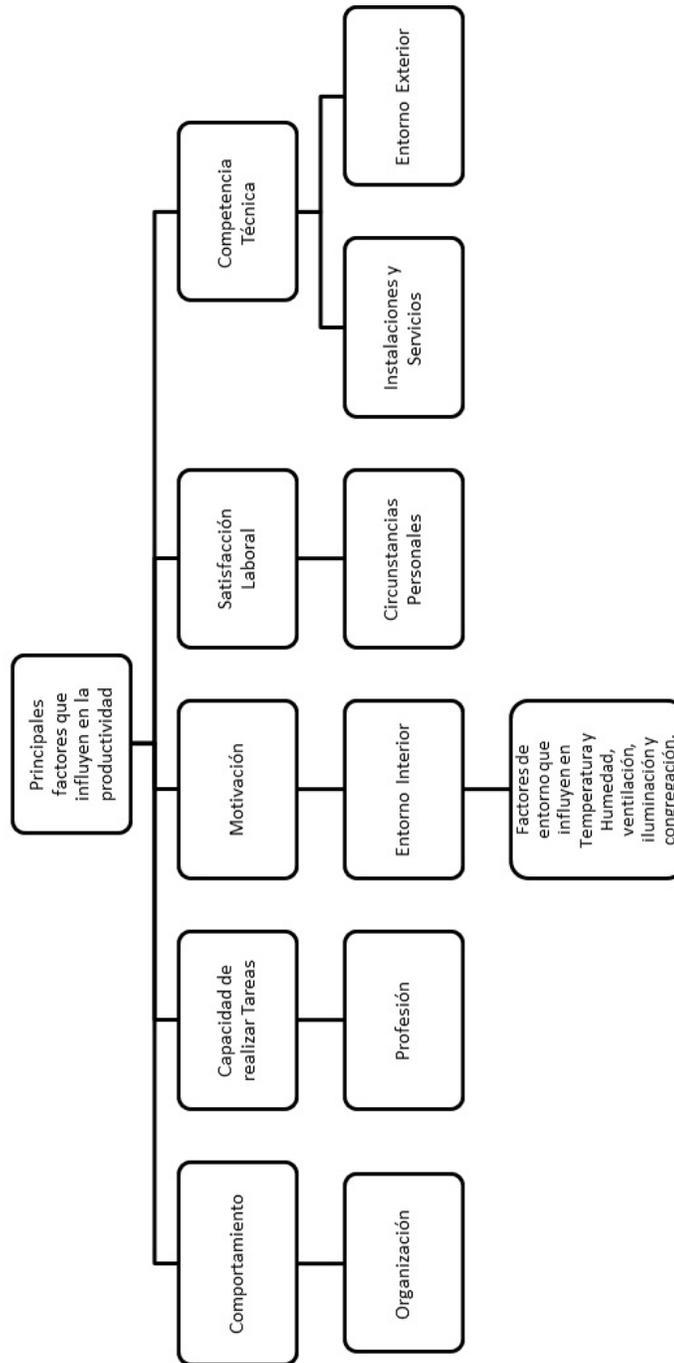


Figura 1.1: Factores externos e internos que influyen en la productividad. [18]

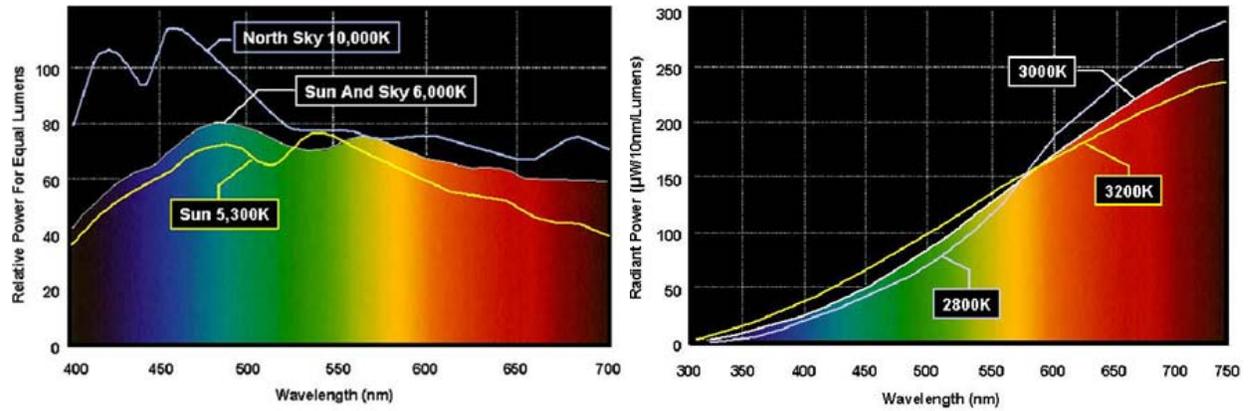


Figura 1.2: El espectro electromagnético del sol (izquierda) contiene las longitudes de onda a las que nos hemos adaptado. En la iluminación artificial como la incandescente (derecha) es muy difícil simular estas condiciones, usualmente carecen o exceden de azul.[12]



Figura 1.3: Iluminación LED en Almàssera, Valencia. Imagen tomada de [1].

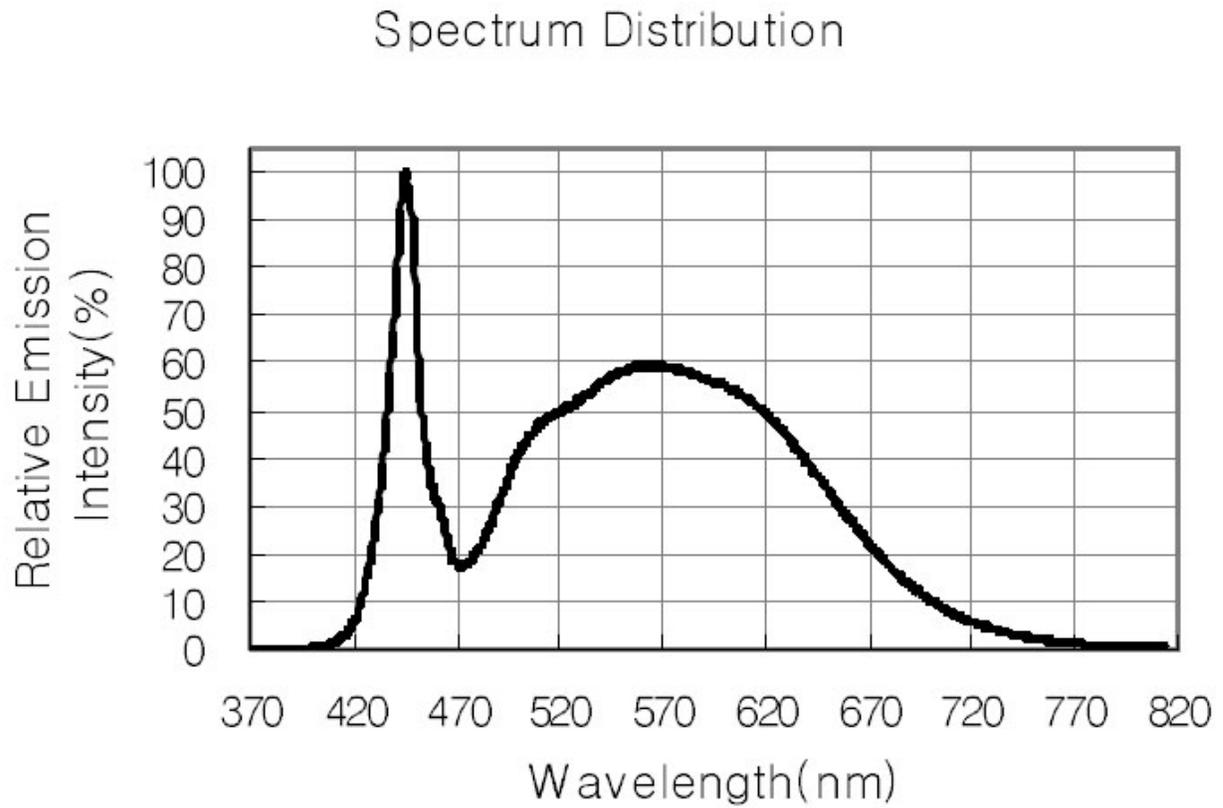


Figura 1.4: El máximo entre 420nm y 470nm corresponde a un color cercano al azul.[30]



Figura 1.5: Luminarias comerciales. Imagen obtenida de [33].

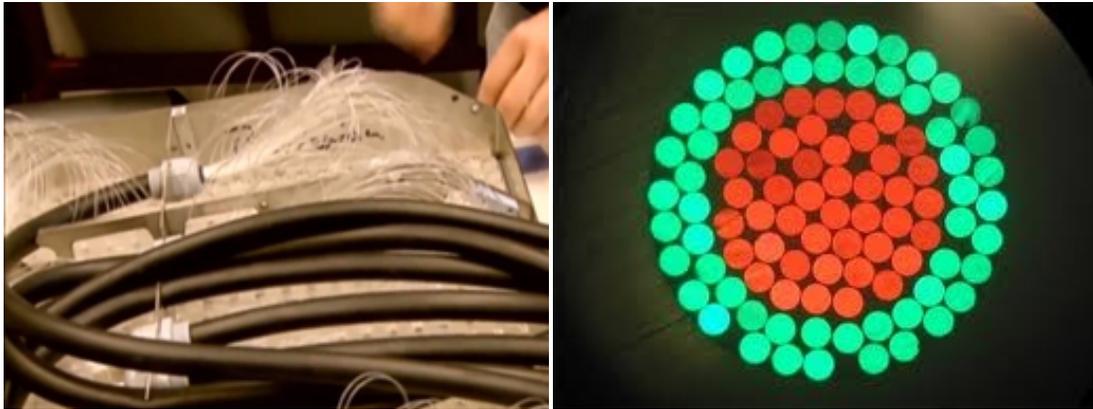


Figura 1.6: Luminaria híbrida adaptada con el sistema Sollektor. Se utilizan manojos de fibra como en la imagen de la derecha.[6]



Figura 1.7: Dispensador de emisión lateral diseñado por 3M® para SunLight Direct.[32]



Figura 1.8: Sistema completo de iluminación de Parans. Colecta la luz solar la transmite mediante fibra óptica y la entrega dentro del edificio.[2]

# Capítulo 2

## Conceptos Teóricos

### 2.1. El espectro electromagnético

Para iniciar el estudio de la luz, necesitamos conocerla con detalle, para ello es muy importante conocer el espectro electromagnético. Una onda electromagnética es un par de oscilaciones magnéticas y eléctricas acopladas que se propagan a la velocidad de la luz y exhiben un comportamiento de onda típico como vemos en la Figura 2.1. [8]

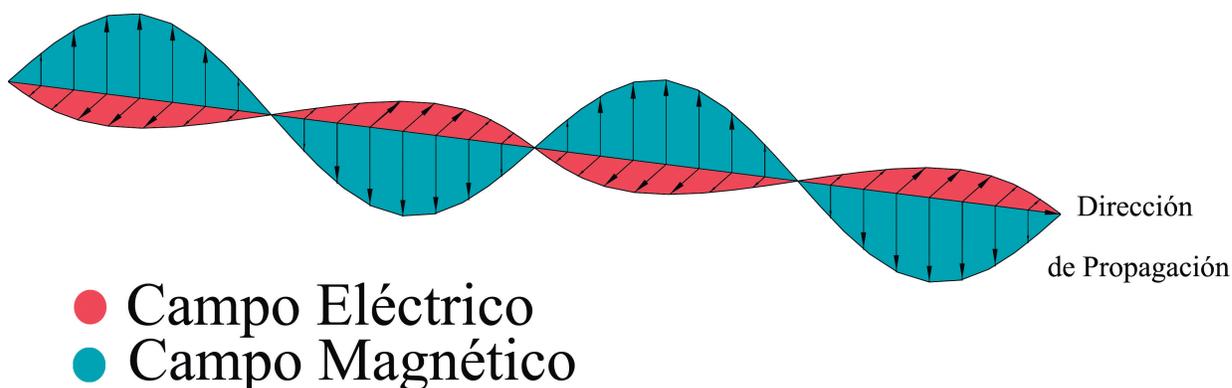


Figura 2.1: El comportamiento de las ondas es acoplado y viajan a una velocidad de  $c = 2.998 \times 10^8 m/s$

Ya que poseen un comportamiento de una onda típica, tienen propiedades como longitud de onda que se mide en metros que representa la distancia que existe entre dos puntos consecutivos de la onda que poseen la misma fase y frecuencia que es medida en Hertz que representa la cantidad de oscilaciones que ocurren en 1 segundo, representadas por las letras griegas  $\lambda$  y  $\nu$  respectivamente. Se pueden clasificar todas las ondas electromagnéticas de acuerdo a cualquiera de estas dos propiedades, lo cual da origen al espectro electromagnético como vemos en la Figura 2.2.

Como vemos en la Tabla 2.1 la clasificación del espectro es muy amplia, sin embargo, en esta tesis nos interesa en particular una pequeña porción del espectro electromagnético que es la parte visible que abarca desde 360 nm hasta 780 nm.

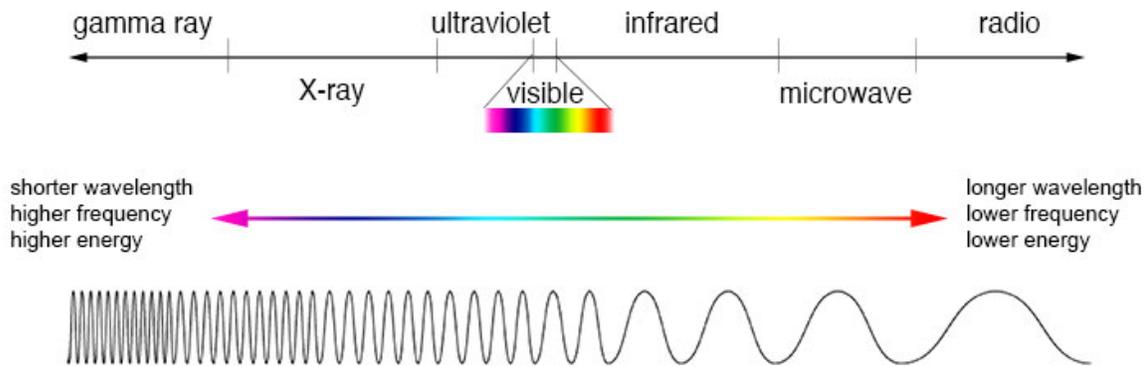


Figura 2.2: La parte visible es una fracción muy pequeña del espectro.

Tabla 2.1: Clasificación del espectro electromagnético.

Longitud de Onda	Desde	Hasta
Ultra Violeta C-B y A	200 nm	400 nm
Visible	360 nm	780 nm
Infrarrojo Cercano	$0.78 \mu m$	$1.1 \mu m$
Infrarrojo de onda corta	$1.1 \mu m$	$2.5 \mu m$
Infrarrojo de onda media	$2.5 \mu m$	$7 \mu m$
Infrarrojo de onda larga	$7 \mu m$	$15 \mu m$

## 2.2. Guías de onda

Son muy conocidas las propiedades de la luz, sabemos que es una forma de radiación electromagnética que se puede propagar en el vacío a una velocidad de  $c = 2.99792458 \times 10^8 m/s$  [16] y que en un material reduce su velocidad; la medida de esta reducción de velocidad se le conoce como índice de refracción y viene dado por  $n = c/v_m$  en donde  $v_m$  es la velocidad de la luz en el medio. Al tener un cambio de velocidad también se tiene un cambio de dirección como muestra la Figura 2.3

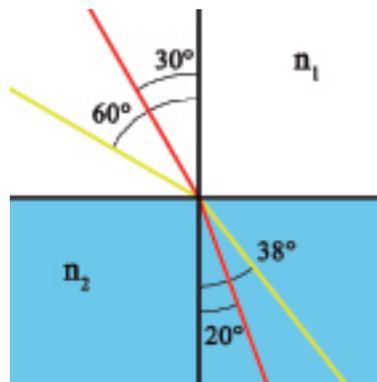


Figura 2.3: Diagrama de rayos representando el fenómeno de refracción que se produce entre dos medios.

El cambio de dirección viene dado por la ley de Snell propuesta por Willebrord Snell van Royen (1580-1626) como [16]:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

Cabe notar dos aspectos muy importantes de la ecuación Ecuación 2.1. Si el haz de luz pasa a un medio más denso el haz refractado se acerca a la normal de la interface. Y si pasa a un medio menos denso, se aleja de ésta. Existe un ángulo máximo de refracción, el cual es conocido como el ángulo crítico el cual existe cuando  $\theta_2 = \theta_{max} = 90^\circ$  lo que hace que  $\sin \theta_2 = 1$  con lo cual la ecuación Ecuación 2.1 nos queda

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$

Lo que implica que

$$n_2 \leq n_1$$

La interpretación que le damos a esto es que, la luz tiene que viajar de un medio menos denso a uno más denso, al cumplirse esta condición los haces pueden tener un comportamiento de reflexión en lugar de refracción; cuando este fenómeno ocurre, se le conoce como reflexión total interna, la cual es la base de las guías de onda.

## 2.3. Diseño óptico

### 2.3.1. Óptica Anidólica

En el marco de este trabajo haremos uso de la óptica anidólica, una rama de la óptica geométrica con poco uso en español, por ello definiremos algunos términos muy utilizados en la literatura anglosajona que no tienen un término en español.

El objetivo de la óptica geométrica es la formación de la imagen de un objeto, en cambio, en la óptica anidólica se usa una fuente de iluminación en lugar de un objeto y un receptor en lugar de una imagen, lo cual provoca que los diseños ópticos sean distintos, ya que el objetivo es la transferencia de energía radiante de la fuente al receptor. [13]

La óptica anidólica se encarga de sistemas ópticos que no forman la imagen de un objeto, sin embargo estos no quedan excluidos; la palabra anidólica proviene del griego *an eidolon* cuyo significado literal es “sin imagen”. [11]

### 2.3.2. Principio de rayos marginales

En un sistema óptico, necesitamos determinar la cantidad de luz que se propaga dentro del sistema y llega a la imagen. Se le conoce diafragma de apertura al elemento que limita el haz luminoso en el sistema. Ejemplos

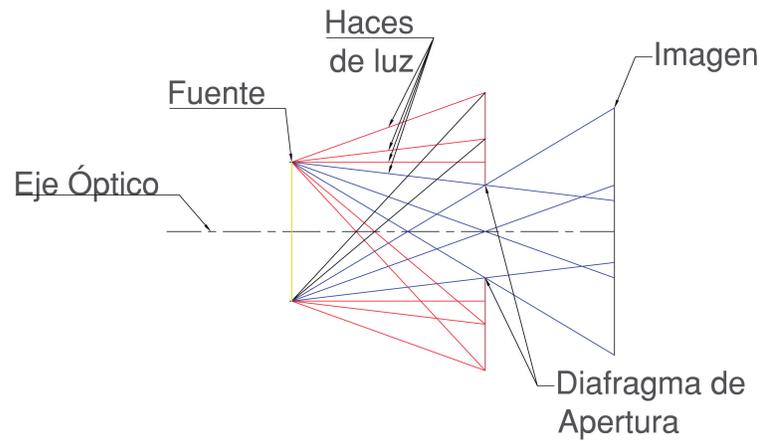


Figura 2.4: En esta figura describimos el diafragma de apertura, el cual limita la entrada de los haces a nuestra imagen. Podríamos considerar el diafragma de apertura como una nueva fuente, cuyos rayos marginales salen de sus extremos.

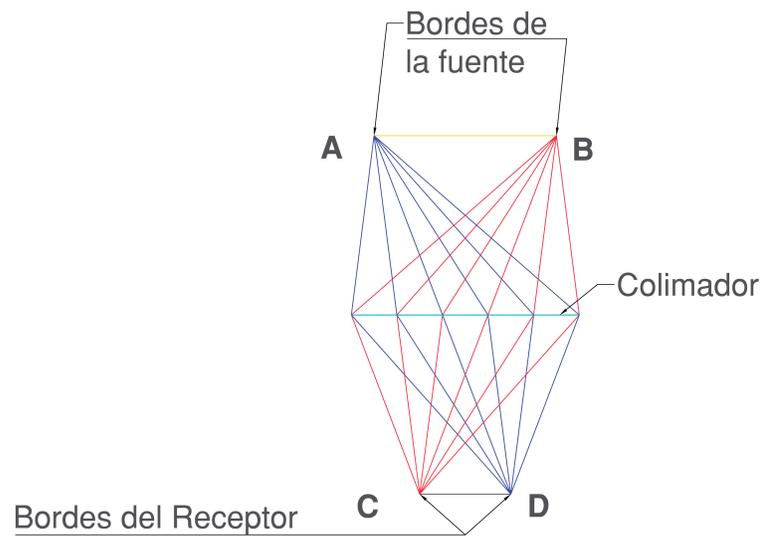


Figura 2.5: En esta imagen se describe el principio de los rayos frontera, los cuales en principio son simétricos, es decir, podemos obtener el mismo resultado cambiando la fuente por receptor.

de este diafragma de apertura pueden ser el mismo ancho de una lente o el elemento ajustable de la lente de una cámara compuesta. [16]

El principio de rayos frontera nos dice que los rayos provenientes de la frontera de una fuente  $\overline{AB}$  deben dirigirse a la frontera del receptor  $\overline{CD}$ . Los rayos frontera son los definidos como los rayos que pasan por la frontera o son tangentes a la superficie de la fuente. [29]

El principio de rayos frontera ha sido utilizado ampliamente, sin embargo, una formulación general o una prueba rigurosa no ha sido desarrollada.[29]

El uso de los rayos frontera, en nuestro caso, es el que determina el tamaño de la fuente sobre la cual estaremos trabajando, ya que haremos uso de una fuente principal transmitida a una guía de onda.

### 2.3.3. Colector Elíptico Compuesto

Entre la diversidad que existe de elementos anidólicos, seleccionaremos el que nos será de utilidad en esta tesis, el colector elíptico compuesto. Cabe mencionar que existe el colector parabólico compuesto, que es un caso particular de éste, pero del cual no entraremos en detalle. A continuación vamos a describir el proceso para la construcción *intuitiva* del colector elíptico compuesto. Este tipo de diseño será la base para el análisis de los rayos en el diseño del difusor de luz.

El principio de rayos frontera establece que los rayos saliendo del punto **A** y **B** deben de colectarse en los puntos **C** y **D**, además de ser capaces de colectar los rayos que pasen por un punto **P**. Como podemos ver en la Figura 2.6 la curva que cumple que estas condiciones es la elipse que tiene focos en los puntos **A** y **C** respectivamente. O incluso desde un punto de vista geométrico, es la definición de la elipse. Esta construcción nos asegura que cualquier rayo saliendo de un punto **O** de la fuente y reflejada por el espejo en un punto **P**, será colectado en algún punto del receptor. Como es una construcción simétrica debemos agregar un segundo espejo para que los rayos frontera de **B** sean colectados en **D**. Además debemos recortar la elipse de tal manera que los rayos frontera de la fuente entren al colector y lleguen al receptor. Este diseño es el conocido como Colector Elíptico Compuesto (Compound Elliptical Concentrator por sus siglas en inglés).

En el capítulo 3 hablaremos de cómo el diseño nos ayuda a dirigir la luz, en nuestro caso de un punto **B** a un punto **D**, con algunas otras restricciones.

## 2.4. Radiometría y Fotometría

Como objetivo principal de este capítulo se encuentra diferenciar una parte esencial del diseño óptico la cual se encarga del estudio de la propagación de la radiación. Además de explicar detalladamente las cantidades que ambas ramas utilizan para no hacer abuso de los términos utilizados, como comúnmente se ha realizado.[25]

Otro objetivo es conocer las herramientas necesarias para poder desarrollar un estudio de color, que es uno de los objetivos de esta tesis, ya que el confort en las personas depende de esto además de la intensidad. Para ello, tendremos que profundizar el conocimiento del funcionamiento de las células fotorreceptoras del ojo humano, las cuales son conocidas como conos y bastones.

Antes de iniciar con el estudio de radiometría y fotometría es importante repasar algunos conceptos geométricos.

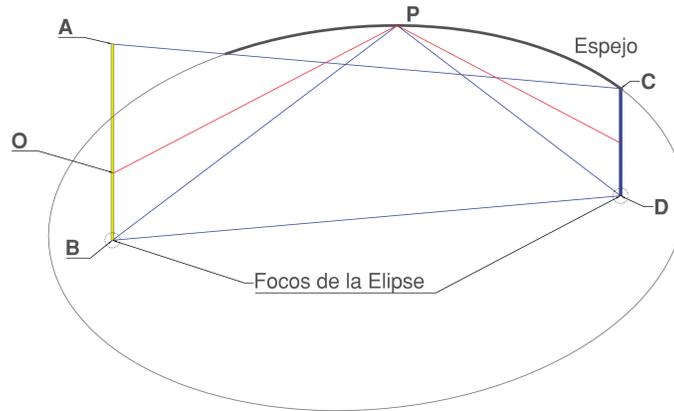


Figura 2.6: En esta imagen vemos el diseño de un CEC, en el cual, rayos que salgan del punto **B** llegan al punto **D** directamente, y pasando por algún punto **P**. Un rayo saliendo de **O** pasando por un punto **P**, también es colectado.

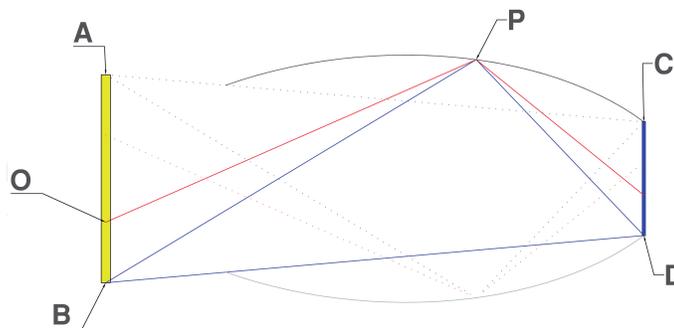


Figura 2.7: Imagen del colector elíptico compuesto, eliminando los trazos de la elipse generadora. Se puede construir utilizando un extruido o revolucionando los segmentos de elipse.

## 2.4.1. Conceptos geométricos

En la siguiente sección repasaremos un par de conceptos geométricos básicos en radiometría y fotometría, esto con el objetivo de eliminar ambigüedad encontrada usualmente en los conceptos utilizados y establecer los símbolos utilizados para cada concepto.

### 2.4.1.1. Ángulo y Ángulo Sólido

El ángulo lineal es definido como la longitud de arco de un círculo, dividido entre su radio y su unidad es el radian.[35]

$$\theta = \frac{s}{R}$$

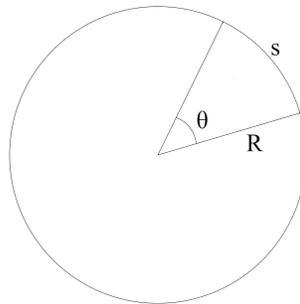


Figura 2.8: El concepto geométrico de un radian. En una circunferencia hay  $2\pi$  radianes.

Se puede extender este concepto a 3 dimensiones utilizando un área en el lugar de la longitud de arco y el radio al cuadrado en lugar del radio. Este concepto es conocido como ángulo sólido y se aplica sobre una esfera de radio R; su unidad es el estereorradián y se define como:

$$\omega = \frac{A}{R^2}$$

### 2.4.1.2. Área proyectada y Ángulo Sólido Proyectado

El área proyectada es la proyección rectilínea de una superficie de cualquier forma en un plano. La expresión matemática en forma diferencial es:

$$dA_{proyectada} = \cos \theta dA$$

Donde  $\theta$  es el ángulo entre la línea de observación y la normal a la superficie.

Integrando sobre toda el área, obtenemos:

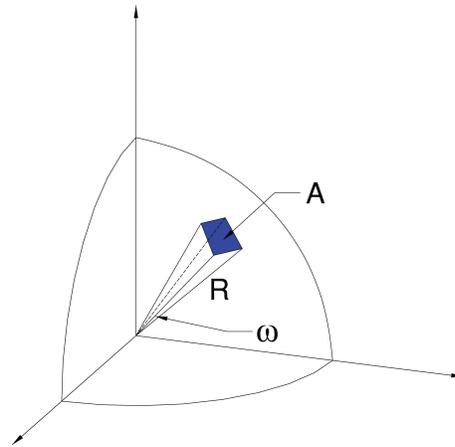


Figura 2.9: Representación de un ángulo sólido, relaciona el área de la superficie con el radio de una esfera.

$$A_{proyectada} = \int_A \cos \theta dA$$

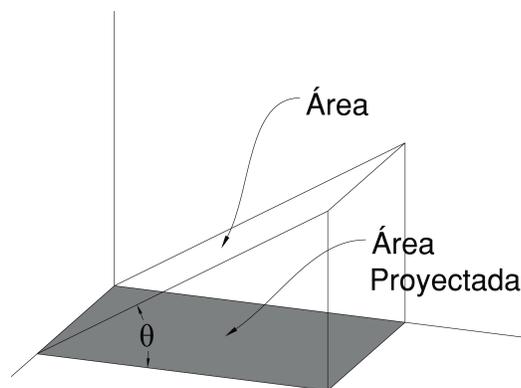


Figura 2.10: La sombra gris es el área proyectada de un área.

$\Omega$  es el ángulo sólido  $\omega$  proyectado en un plano del observador. Puede visualizarse como la proyección del diferencial  $d\omega$  en una base del hemisferio unitario. Incorpora un término coseno adicional debido a la definición de ángulo sólido.

$$d\Omega = \cos \theta d\omega = \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

Integrando sobre un cono circular como en la Figura 2.11

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\Phi_{1/2}} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi \sin^2 \Phi_{1/2}$$

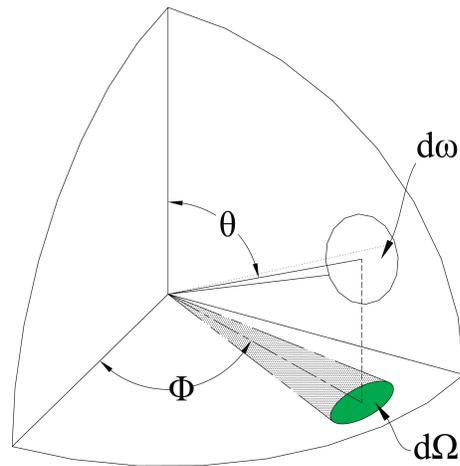


Figura 2.11: Representación del diferencial del ángulo sólido proyectado.

## 2.4.2. Radiometría

La Radiometría es la rama de la óptica encargada de la medición de la energía radiante. Proviene del latín *radius* que significa rayo o con forma de rayo y del Griego *metrón* que significa medir.[7]

En radiometría se incluye el estudio de todo el espectro electromagnético, inclusive la parte no visible del mismo. Para entender la fotometría, la cual es la rama de nuestro interés, es necesario introducir los términos radiométricos.

Para iniciar el estudio de la radiometría necesitamos definir algunas cantidades de uso común en radiometría, como son:

- Energía Radiante
- Flujo o Potencia Radiante
- Intensidad Radiante
- Radiancia

Cabe notar que en cada nombre se incluye un término relacionado con la raíz latina *radius* que significa rayo.

### 2.4.2.1. Energía Radiante

En el estudio de la física conocemos diversos tipos de energía, todos ellos representados por la letra E, sin embargo, ésta se presta a confusión con el campo eléctrico  $\vec{E}$ , en radiometría se utiliza la letra Q y al igual que las demás se mide en Joules. [35]

La energía radiante es generada por ondas electromagnéticas y puede ser propagada a través del vacío. Esta cantidad es medida en Joules y debido a esto, es de poca utilidad ya que no nos proporciona ninguna información de la dirección de la energía, sin embargo es la cantidad radiométrica básica.

Como la energía radiante Q, es la energía total entregada por una fuente, podemos definir una densidad de energía como :

$$u = dQ/dV$$

Donde  $dQ$  es la energía contenida en un elemento de volumen  $dV$  del campo de radiación. [9]

### 2.4.2.2. Flujo radiante

El flujo radiante es muy similar a lo que conocemos como potencia en otras ramas de la física, por ello también se le conoce como potencia radiante; se denota por la letra griega  $\Phi$  (*phi*, de *phlux*, *flux* o *Flux*) y se define como [35]:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Se mide en Watts y nos proporciona información de la cantidad de energía radiante que se transfiere de una región a otra por el campo de radiación. [9]

### 2.4.2.3. Intensidad Radiante

El flujo radiante que es emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección específica se le conoce como intensidad radiante. Usualmente se denota por la letra  $I$  y se expresa como:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Tiene unidades de watt sobre estereorradián [ $W/sr = W \cdot sr^{-1}$ ]. Es utilizada frecuentemente cuando se describe la intensidad de una fuente puntual isotrópica como se puede apreciar en la Figura 2.12

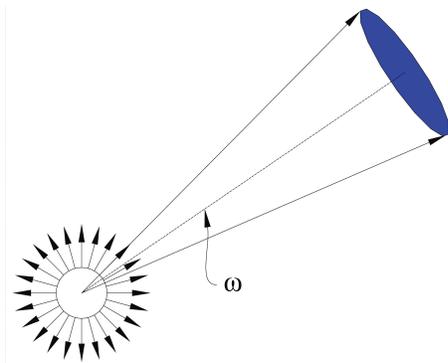


Figura 2.12: La intensidad radiante es la cantidad de flujo de radiación por unidad de ángulo sólido.

La intensidad es uno de los términos más usados erróneamente y la cantidad radiométrica más problemática conceptualmente, ya que es utilizada para conceptos distintos dependiendo del campo. Por ejemplo, es utilizada en el campo de láseres como el cuadrado del campo eléctrico con unidades de  $W/m^2$ . A veces es utilizada incorrectamente para representar cantidades como densidad de flujo y radiancia. Para terminar con esta ambigüedad retomaremos el concepto utilizado por el sistema internacional [ $W/m^2$ ] y cualquier otro uso del término incompatible con el SI será erróneo. [26, 25]

#### 2.4.2.4. Radiancia

A pesar de ser descrita como una unidad fundamental de radiometría, se presenta en la última parte de cantidades radiométricas para familiarizarnos con los términos para una mejor comprensión. [26, 15]

La radiancia se define como el flujo radiante por unidad de área de la superficie por unidad de ángulo sólido proyectado. La radiancia es una unidad direccional, se mide en watt sobre metro cuadrado por estereorradián [ $W/m^2 \cdot sr$ ] [15], su símbolo es L. Está representado en Figura 2.13.

$$L = \frac{d^2\phi}{dA_s d\Omega} = \frac{d^2\Phi}{dA_s \cos\theta d\omega} = \frac{d^2\Phi}{dA_p d\omega}$$

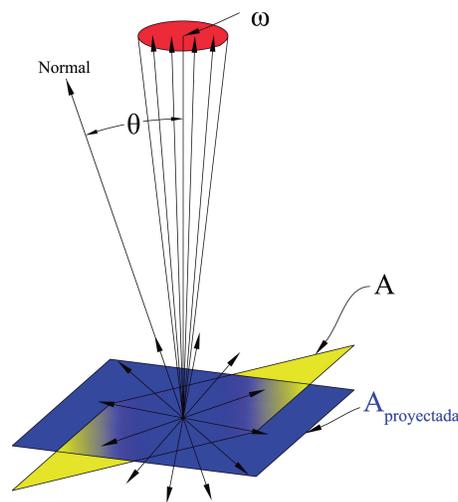


Figura 2.13: La radiancia toma a consideración el área proyectada, lo cual lo hace una cantidad direccional.

### 2.4.3. Propiedades Radiométricas de los materiales

En esta sección hablaremos de las propiedades de los materiales que son usualmente debido a superficies rugosas o impurezas en el material.

Cabe señalar que los términos a continuación descritos han sido de un extenso debate [34] e incluso los han intercambiado con los términos reflectividad, transmitividad o absorptividad [35]. Sin embargo, utilizaremos el siguiente acuerdo; los conceptos terminados en *ión* serán utilizados para la descripción de un proceso [35], los conceptos terminados en *ividad* serán utilizados para muestras puras [35, 34, 26, 15] y los terminados en *ancia* serán utilizados para muestras específicas. [26, 35]

#### 2.4.3.1. Reflexión

En la reflexión, una fracción del flujo radiante incidente  $\Phi_i$  a la superficie de un material, regresa al hemisferio que contiene la fuente de radiación.

De acuerdo a la superficie de material, pueden existir: reflexión especular, difusa o una combinación de ambas. Como podemos ver en la Figura 2.14.

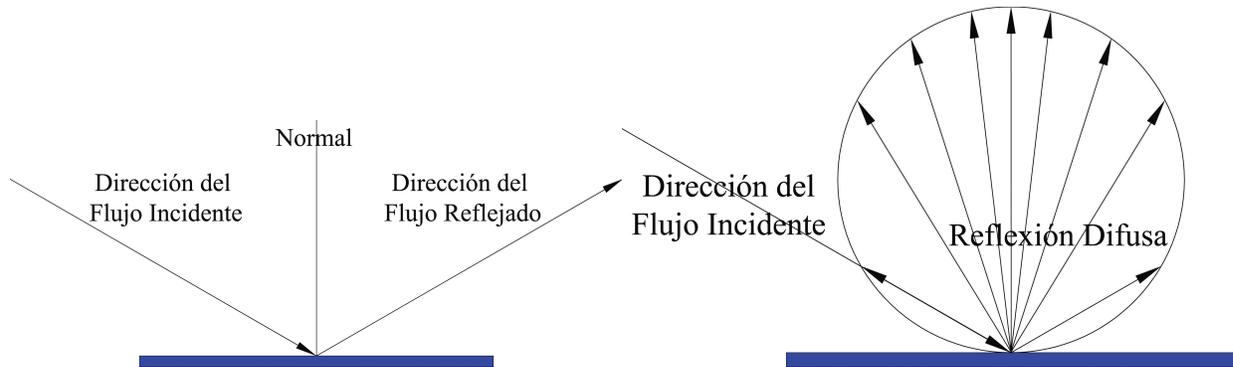


Figura 2.14: Representación de la reflexión especular y difusa.

La *reflectancia espectral* se define como la reflexión de un material a una longitud de onda específica  $\lambda$ , es decir, la fracción de flujo radiante reflejado a una longitud de onda entre el flujo radiante incidente a una longitud de onda y se representa como:

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda r}}{\Phi_{\lambda i}}$$

Siendo la *reflectancia total*  $\rho$  la fracción de flujo radiante reflejado entre el flujo radiante incidente.

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} = \frac{\int_0^{\infty} \rho(\lambda) \Phi_{\lambda i} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda i} d\lambda}$$

Esta cantidad es para todo el espectro. A partir de ahora utilizaremos el término reflectancia para referirnos a la reflectancia total a menos que sea especificado de otra manera.

La reflexión, reflectancia y reflectividad son de consideración en conceptos de iluminación de interiores que no se abarcarán en esta tesis, sin embargo, es de gran valor mencionarlo. De acuerdo al manual de iluminación de la IESNA, estos términos ocupan un papel en: los estándares para sistematizar la comparación de luminarias, el confort visual, el deslumbramiento, la reflectancia de las superficies como paredes, suelo y otros. [28]

### 2.4.3.2. Transmisión

El proceso de transmisión es cuando el flujo incidente a una superficie lo atraviesa, pasando al lado de la superficie que no contiene a la fuente de radiación.

Al igual que con la reflexión, dependiendo del tipo de superficie pueden existir transmisión: especular, difusa. Como podemos ver en la Figura 2.15.

Similarmente a la reflectancia espectral, la *transmitancia espectral* se define como la transmisión de un material a una longitud de onda específica  $\lambda$ , es decir, la fracción del flujo radiante transmitido a una longitud de onda entre el flujo radiante incidente a una longitud de onda y se define como:

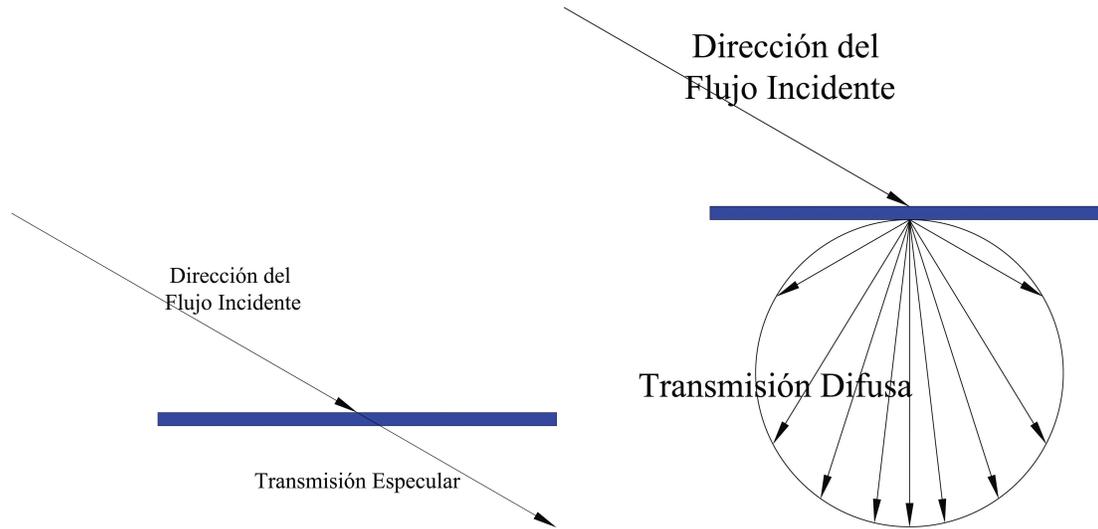


Figura 2.15: Representación de la transmisión especular y difusa.

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda t}}{\Phi_{\lambda i}}$$

Siendo la transmitancia total  $\tau$  la fracción del flujo radiante transmitido entre el flujo radiante incidente.

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \frac{\int_0^{\infty} \tau(\lambda) \Phi_{\lambda i} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda i} d\lambda}$$

El papel que juega la transmisión en iluminación es relevante, ya que gracias a este concepto se toman en cuenta factores como la transmisión de la radiación UV por el cristal que rodea un filamento de una bombilla, el cambio de tonalidad de luz al transmitirla por una película o la transmisión de la luz a través de una fibra óptica plástica. Sin embargo estas aplicaciones no serán utilizadas rigurosamente en esta tesis. [28]

### 2.4.3.3. Absorción

El proceso de absorción se da cuando el flujo incidente a una superficie es convertido a otra forma de energía. Similarmente a las propiedades anteriores, la absorbancia espectral se define como la absorción de un material a una longitud de onda específica  $\lambda$ , es decir, la fracción del flujo radiante absorbido por el material a cierta longitud de onda, expresado matemáticamente es:

$$\alpha(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda a}}{\Phi_{\lambda i}}$$

Siendo la absorbancia total  $\alpha$  definida como:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_i} = \frac{\int_0^\infty a(\lambda)\Phi_{\lambda_i}d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_{\lambda_i}d\lambda}$$

Existe una relación entre las propiedades mencionadas anteriormente, la cual se deriva directamente de la ley de la conservación de la energía, por lo tanto, la suma del flujo radiante absorbido, transmitido y reflejado debe ser igual al flujo radiante incidente, matemáticamente se puede expresar como:

$$\tau + \alpha + \rho = 1$$

Esta ecuación no considera otros efectos como la fotoluminiscencia, los cuales no son de nuestro interés.

#### 2.4.4. Fotometría

Para el estudio de los tubos de luz es necesario conocer lo que es la radiometría y la fotometría que son dos puntos de vista del mismo fenómeno, la radiación. La radiometría toma en cuenta todas las radiaciones emitidas, en cambio, la fotometría toma en cuenta solamente aquellas radiaciones percibidas por el ojo humano, siendo entonces la fotometría un subconjunto de la radiometría. A las cantidades fotométricas se les coloca el subíndice *v* (por *visual*) para diferenciarlo de cantidades radiométricas. [15]

Esta sección es de suma importancia para diferenciar la radiometría de la fotometría ya que estos conceptos serán de mucha utilidad en los siguientes capítulos.

Debido a esta nueva restricción, debemos de conocer cómo se comporta el ojo humano al estímulo de radiación para poder establecer lo que es una cantidad fotométrica.

##### 2.4.4.1. Visión Fotópica y Escotópica

Iniciaremos con una definición de la visión fotópica y escotópica que tomada de Schanda J. sin abordar el ojo humano, ya que su funcionamiento, queda fuera de los objetivos de esta tesis. [31]

- **Visión Fotópica:** Es la visión de un ojo normal en la cual los conos son los principales fotorreceptores activos. La visión fotópica normalmente ocurre cuando el ojo está adaptado a los niveles de luminancia de al menos 10 candelas por metro cuadrado.
- **Visión Escotópica:** Es la visión de un ojo normal en la cual los bastones son los principales fotorreceptores activos. La visión escotópica normalmente ocurre cuando el ojo está adaptado a los niveles de luminancia de menos de algunas milésimas de candelas por metro cuadrado.

La CIE se ha encargado de generar tablas con las eficiencias luminosas fotópicas y escotópicas del ojo humano, han sido publicadas y utilizadas extensamente, estas gráficas serán de mucha ayuda para relacionar los conceptos posteriores con los conceptos presentados de radiometría. Usualmente son presentadas en forma de tabla como la mostrada en la Tabla A.1 anexada en el apéndice.

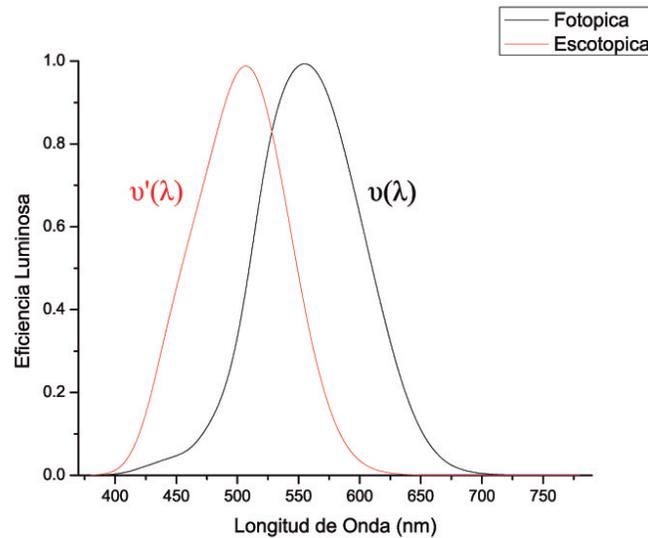


Figura 2.16: Funciones espectrales de eficiencia luminosa del CIE [17].

En resumen, el ojo humano normal responde solo a cierta radiación electromagnética, lo cual quiere decir que existe mucha radiación que no podemos ver y además, que de toda la radiación colectada, algunas tendrán mayor peso que otras, proporcionando una visión selectiva en colores. En el caso de la visión fotópica, existe un pico en 550nm [28] que corresponde a un color verde - amarillento, lo cual quiere decir que nuestro ojo, bajo condiciones de iluminación de al menos 10 candelas por metro cuadrado, tendrá mayor sensibilidad al color verde que a los demás. Lo mismo sucede para la visión escotópica a 507 nm [28] que corresponde a un color verde – azulado.

A continuación se presentan algunas cantidades fotométricas utilizadas y sus unidades, se relacionan con las cantidades radiométricas mediante la relación [22]:

$$\text{Cantidad Fotométrica} = K(\lambda) \times \text{Cantidad Radiométrica}$$

En donde:

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda)$$

o

$$K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda)$$

El valor de  $K_m$  es conocido como la *eficacia luminosa* y su valor es  $683 \text{ lm/W}$  a 555 nm para la visión fotópica y un valor de  $1700 \text{ lm/W}$  para la visión escotópica. [15]

### 2.4.4.2. Energía Luminosa

La energía que el ojo es capaz de detectar, tiene relación con la energía radiante de la fuente, mediante la siguiente función podemos medir cuanta energía es capaz de detectar.

$$Q_v = K_m \int V(\lambda) Q(\lambda) d\lambda$$

Se le conoce como energía luminosa y sus unidades son [lm.s], que también se le conoce como *talbot*. [15]

### 2.4.4.3. Flujo o potencia luminosa

La unidad de flujo o potencia luminosa es el *lumen*, el cual se define como los watt efectivos del ojo humano [35]. Matemáticamente se representa como:

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} = K_m \int \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Esta cantidad es de suma importancia en los capítulos siguientes, por lo tanto hay que tomarlo en cuenta, ya que la simulación nos proporciona datos en lumen. Que como veremos mas adelante, usamos detectores cuya función es obtener el resultado del flujo total que pasa a través de él.

### 2.4.4.4. Intensidad Luminosa

Al igual que la intensidad radiante, esta es una cantidad direccional, sus unidades son lumen por estereorradián, que precisamente es la definición de *candela* [cd] que es una las 7 magnitudes básicas del SI.

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega} = K_m \int I(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

También será de mucha utilidad en esta tesis, debido a que también deseamos conocer la direccionalidad de la salida de la fuente, por ello debemos de saber interpretarlo.

### 2.4.4.5. Luminancia

Similar a la radiancia, se define como el flujo luminoso por unidad de área de la superficie por unidad de ángulo sólido proyectado. La luminancia es una unidad direccional, se mide en candela sobre metro cuadrado. [15]

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{dA\omega\cos\theta}$$

## 2.5. Colorimetría

El objetivo de la colorimetría es la igualación del color, sin embargo, este objetivo es muy ambiguo, debido a la medición de un sistema fisiológico como es la percepción de color, la cual cambia dependiendo del observador. La colorimetría ha sido un tema de mucha tensión y discusión, sin embargo, actualmente es aceptada por el largo trayecto, los extensos experimentos y ajustes que ha tenido desde su creación. En esta sección hablaremos de la colorimetría como un sistema de metrología el cual es mensurable.

Para iniciar con esta sección, debemos de establecer lo que se conoce como la sensación de luz. La sensación de luz es producida por la radiación electromagnética entre las longitudes de onda de 380nm y 780nm, estos límites fueron estandarizados por la CIE por valores promedio de una población de observadores. Sin embargo, reportan que existen observadores capaces de ver hasta 360nm y 850nm, los límites del rango ultra violeta e infrarrojo respectivamente. [31]

Una vez conocida la sensación de luz, debemos saber cómo producir un estímulo de color, para esto existen dos métodos y nosotros nos concentraremos en el primero [31]:

- El método de mezcla aditiva de colores; donde la sensación de color es producida por la luz, que al llegar a los receptores del ojo, es incapaz de distinguir espacialmente la fuente y vemos la mezcla de los colores.
- El método de mezcla de sustractiva de colores; donde la sensación de color es producida por pigmentos cuya función es remover una parte del espectro. Superponiendo diversos pigmentos en diferentes concentraciones, cambiaremos el color en el que la luz es transmitida.

La descripción de los experimentos de igualación de colores está basada en el método de mezcla aditiva de colores, debido a que sus leyes son más sencillas que las del método sustractivo. Las leyes empíricas de igualación de color de mezclas aditivas son las siguientes:

1. Para especificar la igualación de color, tres variables independientes son necesarias y suficientes.
2. Para una mezcla aditiva de estímulo de color, solo los valores de tres variables independientes son relevantes y no su composición espectral.
3. En una mezcla aditiva de estímulo de color, si uno o más de los componentes de su mezcla se cambia gradualmente, los valores de las tres variables independientes resultantes también cambian gradualmente.

### 2.5.1. Observadores colorimétricos

Desde su origen, los observadores colorimétricos han causado mucha polémica en la cuestión de su definición, debido a que, como mencionamos anteriormente, la percepción cambia de acuerdo al observador, sin embargo, nosotros no nos adentraremos en estas cuestiones.

Las condiciones de observación tienen que ser estandarizadas, para la CIE 1931, un observador colorimétrico tiene 2° de campo fóvea de observación y un entorno oscuro, lo que representa ver una imagen con diámetro de 17 mm a una distancia de 0.5 m [24]. El hecho de que se escogiera un campo de 2° es porque la mácula lútea tiene una densidad casi constante. [31]. En Figura 2.17 podemos ver la representación del observador.

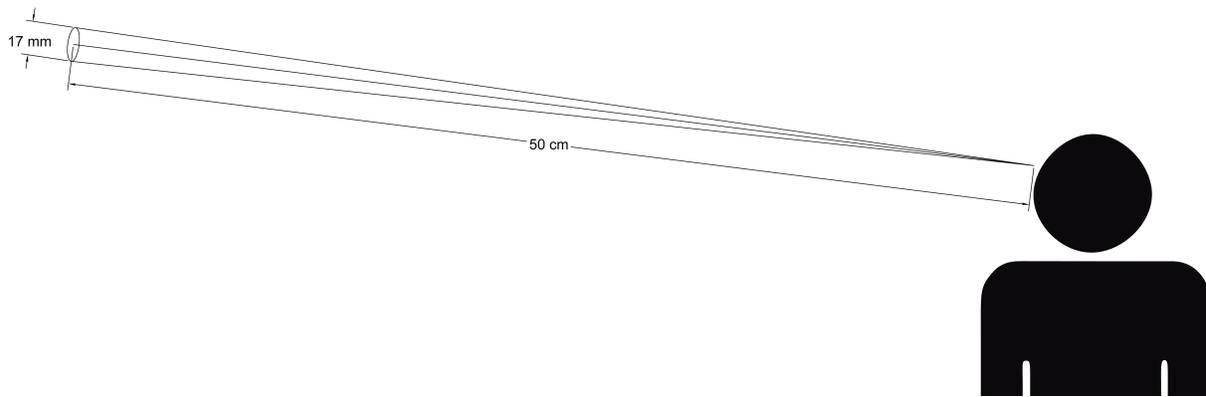


Figura 2.17: Observador colorimétrico estándar  $2^\circ$ .

### 2.5.2. Derivación del sistema tricromático CIE XYZ a partir del sistema tricromático CIE RGB.

Para la mayoría de las aplicaciones, no es necesario conocer la distribución de potencia espectral de la luz emitida por una fuente, es suficiente con conocer su efecto sobre el ojo humano, por esta razón definiremos un sistema el cual nos describa el comportamiento del ojo humano ante estímulos.

En los experimentos de igualación de colores se coloca un estímulo de prueba proyectado en una pantalla, del lado opuesto se colocan fuentes de luz monocromática roja, verde y azul con reguladores de intensidad. Observando a través de un diafragma con el objetivo de conseguir una visión fovea de  $2^\circ$ , se intenta regular la intensidad de las fuentes monocromáticas para igualar el color del estímulo de prueba. Una vez igualado el color, se puede medir la luminancia de cada una de las fuentes y así capturar los datos obtenidos. Una figura del experimento se muestra en Figura 2.18

De acuerdo a estándares del CIE que derivan de investigaciones experimentales de W. D. Wright y J. Guild, existen 3 funciones que representan la respuesta relativa de un estímulo con una longitud de onda necesaria para la igualación de colores, estas funciones son conocidas como funciones de igualación de color, representadas por  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ . Estas funciones están graficadas en la siguiente Figura 2.19.

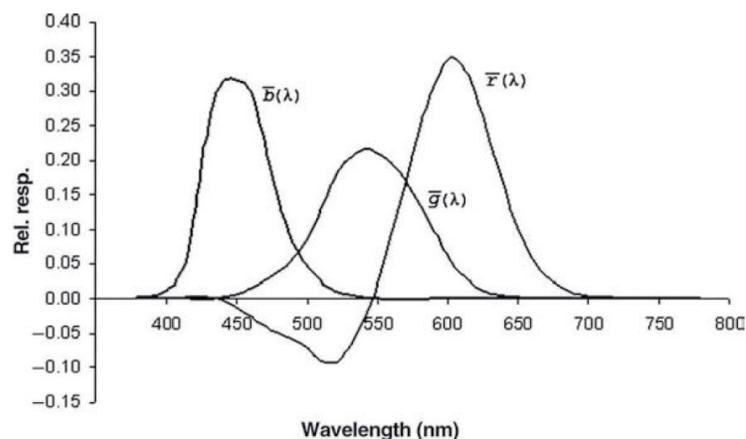


Figura 2.19: Funciones de igualación de color del observador colorimétrico estándar CIE 1931 de acuerdo a [31]. Los lóbulos negativos representan que para una igualación de color, uno de los estímulos igualadores deben ser agregados al estímulo de prueba.

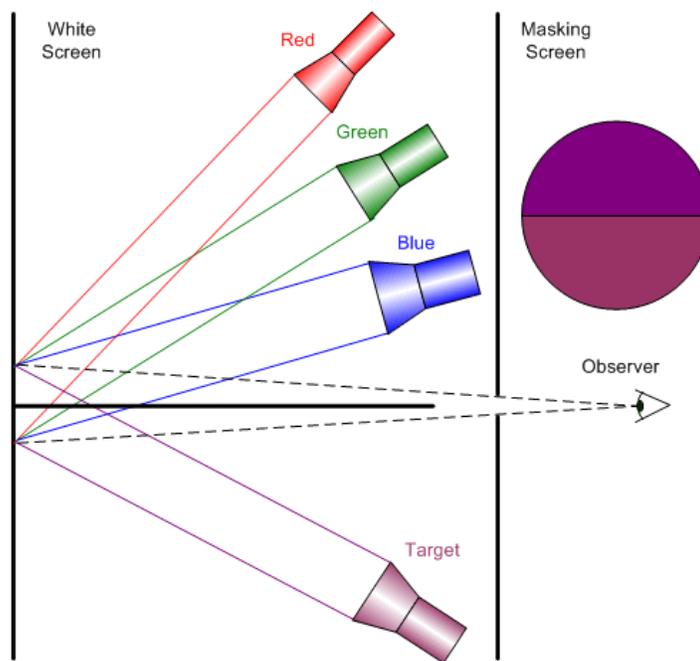


Figura 2.18: Experimento de igualación de color. [5]

Para definir un sistema colorimétrico, se debe establecer el estímulo a igualar, especificando su composición espectral y las unidades en las que es medida. De manera general, se puede describir un color de la siguiente forma:

$$[C] \equiv R[R] + G[G] + B[B]$$

Donde  $[C]$  es el estímulo, que es idéntico a  $[R]$ ,  $[G]$  y  $[B]$ , que son las unidades del estímulo o *primarios*, multiplicado por  $R$ ,  $G$  y  $B$  que representan las magnitudes, expresadas en las unidades adoptadas.

Debido a la propiedad aditiva y multiplicativa del estímulo de color, para una prueba de estímulo de color monocromático,  $P(\lambda)$ , las cantidades de luz monocromática necesaria para una igualación deben de ser añadidas, expresado matemáticamente tenemos que:

$$[C] \equiv \int_{380nm}^{780nm} \bar{r}(\lambda)P(\lambda)d\lambda.[R] + \int_{380nm}^{780nm} \bar{g}(\lambda)P(\lambda)d\lambda.[G] + \int_{380nm}^{780nm} \bar{b}(\lambda)P(\lambda)d\lambda.[B]$$

De donde  $\int_{380nm}^{780nm} \bar{r}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$ ,  $+\int_{380nm}^{780nm} \bar{g}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$ ,  $+\int_{380nm}^{780nm} \bar{b}(\lambda)P(\lambda)d\lambda$ , son llamados valores triestímulos y sirven como descriptores de color.

Para definir un observador estándar, la composición espectral y las luminancias de colores primarios deben de ser especificadas. Para este caso, se utilizó 700 nm para el color rojo, 546.1 nm para el color verde y 435.8 nm para el color azul [19]. Para establecer las unidades de luminancia se requiere igualar el color para un espectro equienergético. Para lograr esto, si se utiliza  $1 \text{ cd/m}^2$  de rojo, entonces se necesita  $4.5907 \text{ cd/m}^2$  de verde y  $0.0601 \text{ cd/m}^2$  de azul.

### 2.5.3. Derivación del sistema tricromático CIE XYZ

Debido a dificultad de cálculos con los lóbulos negativos (para aquella época) de las funciones de igualación de color, la CIE estableció una transformación de unidades reales [R], [G], [Y] a unidades imaginarias [X], [Y], [Z] que contengan solo lóbulos positivos y que, además, para un estímulo equienergético los valores triestímulos sean iguales es decir;  $X=Y=Z$ . La transformación debe de ser tal que uno de los valores triestímulos tenga información fotométrica y que el volumen del tetraedro nuevo sea del menor volumen posible. Para lograr todo esto se propone la siguiente transformación.

$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2.768892 & 1.751748 & 1.130160 \\ 1.000000 & 4.590700 & 0.060100 \\ 0 & 0.056508 & 5.594292 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix}$$

Al tener esta transformación, las funciones de igualación de color también se transforman a su homólogo en el nuevo espacio, de la misma manera.

Por lo tanto, en resumen, lo que tenemos es un cambio de coordenadas:

$$\begin{aligned} [R], [G], [B] &\rightarrow [X], [Y], [Z] \\ R, G, B &\rightarrow X, Y, Z \\ \bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda) &\rightarrow \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda) \end{aligned}$$

Cómo mencionamos anteriormente esta transformación tiene una ventaja, qué, históricamente se debió a la ausencia de computadoras que realizaran cálculos, las nuevas funciones de igualación de color no tienen lóbulos negativos como se puede ver en la imagen Figura 2.20.

Los valores de las funciones de igualación de color están dados en la Tabla A.2 anexada en el apéndice [24], los cuales calculados igualmente a partir de una tabla de los valores reales de las funciones de igualación de color. Cabe mencionar que de ahora en adelante, éstas serán las funciones de igualación de color, y las funciones  $\bar{r}$ ,  $\bar{g}$ ,  $\bar{b}$ , serán las funciones reales de igualación de color.

Por último nos falta mencionar la conexión con los valores triestímulos, los cuales están definidos de la siguiente manera:

$$X = k \int_{380nm}^{780nm} P'_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

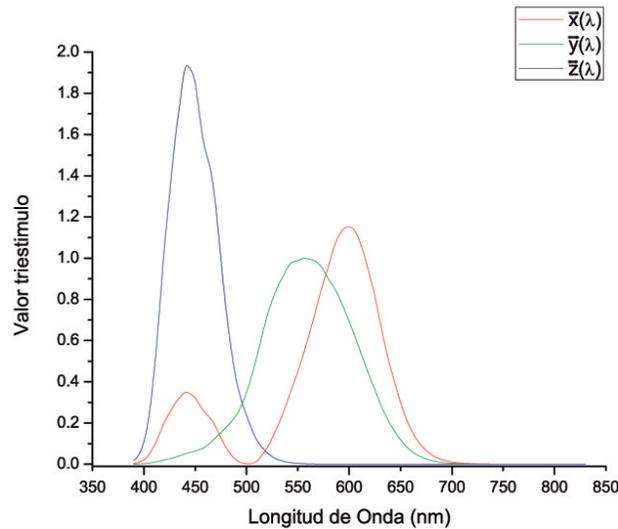


Figura 2.20: Funciones de igualación de color imaginarias sin lóbulos negativos.

$$Y = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} P'_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} P'_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Donde  $P'_\lambda$  es la función del estímulo de color, relacionada con  $P(\lambda)$ , y  $k$  es una constante que se define a partir del tipo de estímulo.

En colorimetría, el valor de  $P'_\lambda$  está relacionada con el tipo de estímulo de color, que puede ser de dos clases:

1. Provenientes de una fuente de luz, de una manera directa. Como por ejemplo, una lámpara, el sol o cualquier otra.
2. Provenientes de objetos no luminosos, es decir, provienen de una manera indirecta, debido a reflexión o transmisión. El color en estos objetos depende mayormente en la absorción del material. Esta es la parte más interesante de colorimetría, debido a que con estos estímulos son los provenientes de la pintura de una superficie, de la transmisión de un vidrio pigmentado entre muchas otras.

En colorimetría, los objetos que son reflejantes o transparentes son llamados fuentes de luz secundarias. Si una fuente de luz es reflejada o transmitida, parte de la luz que llega al ojo del observador es el estímulo que debemos agregar al valor  $P'_\lambda$ . Entonces, como estaremos trabajando con los valores de reflexión o transmisión, el estímulo de color estará relacionado con el factor de reflexión espectral  $\rho(\lambda)$  o el factor de transmisión espectral  $\tau(\lambda)$  y la fuente primaria  $S(\lambda)$  que llega al objeto. Matemáticamente expresamos esto como:

- En el caso de reflexión

$$P'(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot S(\lambda)$$

- En el caso de transmisión

$$P'(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot S(\lambda)$$

Para este caso el valor de  $k$  queda definido de tal manera que  $Y=100$  para objetos en los que el coeficiente de transmisión o reflexión sea máximo para todas las longitudes de onda, por lo tanto:

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

En donde, la sumatoria se puede sustituir por una integral si se realiza una interpolación, la cual es recomendable por la CIE, para obtener la función. En el caso de la sumatoria se usarán los intervalos de 5 nm para  $d\lambda$ , o menores si se cuenta con una tabla de mayor precisión.

#### 2.5.4. Coordenadas de cromaticidad y el diagrama de cromaticidad

Los estímulos de color se pueden describir completamente si tenemos los valores triestímulos, sin embargo, es inconcebible imaginar un estímulo de color solamente con estos valores y la mayoría de las veces no estamos interesados en su valor. Por ello se definen valores de mayor utilidad:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Estas son conocidas como coordenadas de cromaticidad donde  $x+y+z=1$ , por lo tanto, con dos valores es suficiente para describir el estímulo de color, usualmente los valores de  $x$  y  $y$ .

Graficando las coordenadas de cromaticidad  $x$  y  $y$  en un sistema rectangular, obtenemos el diagrama de cromaticidad como se puede ver en la Figura 2.21.

#### 2.5.5. Fuentes

En esta última parte de la sección debemos definir una fuente  $S(\lambda)$ , la cual esté alimentando a nuestra fuente de luz secundaria. La construcción de esta fuente debe de estar de acuerdo al tipo de aplicación que deseemos. Para ello la CIE, se ha encargado de establecer fuentes de iluminación para diversos usos, uno de ellos es la establecida  $D_{65}$ , la cual es un estándar representativo de la luz del día.

La CIE, ha propuesto diversos tipos de fuentes, en 1931 introdujo la fuente tipo A, B y C, luego en 1965 introdujo la tipo D en sustitución de la B y C, esto debido a que el uso de fuentes B y C cayeron en desuso debido a su falta de precisión. Por esta razón, en esta tesis hablaremos solamente de las fuentes de iluminación A y D. [31, 23]

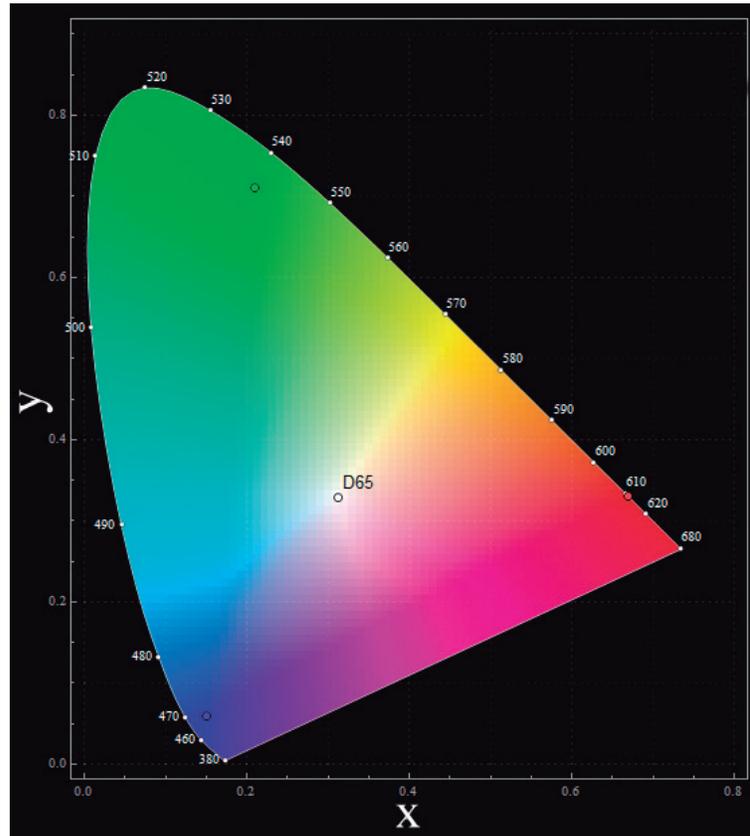


Figura 2.21: Diagrama de cromaticidad, no optimizado para su versión impresa. En la zona central del diagrama se encuentra la fuente  $D_{65}$ .

### 2.5.5.1. Fuente tipo A

Como habíamos visto, para realizar cálculos necesitamos  $S(\lambda)$ , por lo que la CIE propuso en 1931 la fuente tipo A, que describe completamente la distribución de potencia espectral de un filamento incandescente de tungsteno. La cual de acuerdo a la CIE[3, 31] dice:

*«Esta fuente tiene la intención de representar una luz de un filamento de tungsteno típico y doméstico. La fuente tipo A deberá ser usada en todas las aplicaciones de colorimetría que involucren el uso de luz incandescente, al menos que existan razones específicas para usar otra fuente».*

Históricamente, la distribución de potencia espectral para la fuente tipo A fue definida en 1933 como se muestra en el fragmento de tabla de la Figura 2.22 [19].

En la actualidad esta tabla ha quedado en desuso, dejando establecida una ecuación que rige el comportamiento de la fuente tipo A, en el reporte técnico de colorimetría del CIE de 2004 [24] se establece lo siguiente.

La distribución de potencia espectral  $S_A(\lambda)$  relativa queda definida por la siguiente ecuación:

$$S_A(\lambda) = 100 \left( \frac{560}{\lambda} \right)^5 \times \frac{e^{\frac{(1.435)(10^7)}{(2848)(560)} - 1}}{e^{\frac{(1.435)(10^7)}{(2848)(\lambda)} - 1}}$$

Wave-length (m $\mu$ )	E A	Wave-length (m $\mu$ )	E A
380	9.79	580	114.44
385	10.90	585	118.08
390	12.09	590	121.73
395	13.36	595	125.39
400	14.71	600	129.04
405	16.15	605	132.70
410	17.68	610	136.34
415	19.29	615	139.99
420	21.00	620	143.62
425	22.79	625	147.23
430	24.67	630	150.83
435	26.64	635	154.42
440	28.70	640	157.98
445	30.85	645	161.51
450	33.09	650	165.03
455	35.41	655	168.51
460	37.82	660	171.96
465	40.30	665	175.38
470	42.87	670	178.77
475	45.52	675	182.12
480	48.25	680	185.43
485	51.04	685	188.70
490	53.91	690	191.93
495	56.85	695	195.12
500	59.86	700	198.26
505	62.93	705	201.36
510	66.06	710	204.41
515	69.25	715	207.41
520	72.50	720	210.36
525	75.79	725	213.26
530	79.13	730	216.12
535	82.52	735	218.92
540	85.95	740	221.66
545	89.41	745	224.36
550	92.91	750	227.00
555	96.44	755	229.58
560	100.00	760	232.11
565	103.58	765	234.59
570	107.18	770	237.01
575	110.80	775	239.37
580	114.44	780	241.67

Figura 2.22: Distribución de potencia espectral, tal como fue publicada en 1933.

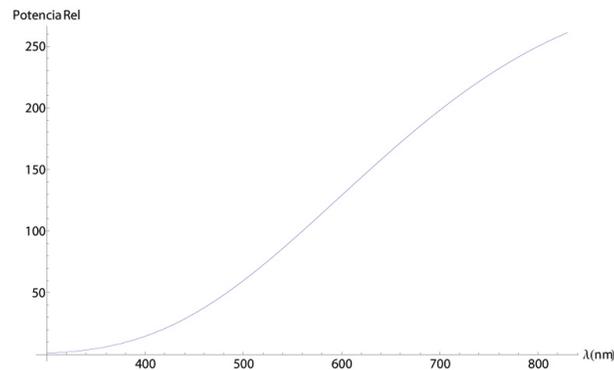


Figura 2.23: Distribución de potencia Espectral para una fuente de iluminación tipo A de acuerdo a los estándares de la CIE.

Donde  $\lambda$  tiene que ser dado en nanómetros y los valores dentro de las exponenciales son constantes derivadas de la primera definición. Esta distribución espectral está normalizada a 100 en  $\lambda = 560 \text{ nm}$ .

Cabe mencionar que esta fórmula está basada en los estándares de fuentes de iluminación en longitud de onda, es decir, de 300 nm a 830 nm, sin embargo, para investigaciones colorimétricas esto se restringe a 380 nm – 780 nm.

De un análisis cualitativo de la gráfica de la Figura 2.23 podemos ver que en la fuente tipo A existe una carencia en las longitudes de onda corta, que son las que corresponden a colores cercanos al azul (alrededor de 435 nm) y en el verde (alrededor de 546 nm).

### 2.5.5.2. Fuente tipo $D_{65}$

Para diversas aplicaciones de iluminación es muy importante conocer la distribución de potencia espectral de la luz de día, esto es muy difícil de definir, debido a que esta distribución depende de diversos factores como la época del año, la hora del día y las condiciones climatológicas. Con este fin, la CIE propuso en 1931 las fuentes de iluminación tipo B y C, las cuales fueron creadas para aproximarse a la luz directa del mediodía y una iluminación promedio de la luz de día respectivamente [19].

En 1964, la CIE recomendó el uso de fuentes de luz tipo D, que es representativa de la luz natural del día en diferentes fases. En particular la tipo  $D_{65}$  fue escogida [23]. Esto con el objetivo de discontinuar el uso de las

fuentes tipo B y C debido a que no son consideradas actualmente como satisfactorias para representar las fases del día[23, 24].

Debido a estas razones no hablaremos de las fuentes tipo B y C y nos enfocaremos solamente a la actual fuente  $D_{65}$  que utilizaremos en este trabajo, la cual, de acuerdo al CIE [3]:

*Esta fuente está destinada a representar el promedio de la luz de día. La fuente estándar CIE  $D_{65}$  debe ser usada en todos los cálculos colorimétricos que requieren luz de día representativa, al menos que existan razones específicas para usar una fuente distinta. Es conocido que ocurren variaciones en la distribución de potencia espectral, particularmente en la región del ultravioleta, debido a temporada, hora del día y locación geográfica. Sin embargo, la fuente tipo  $D_{65}$ , deberá ser usada hasta que se dispongan de información adicional en esas variaciones.*

Por último, lo que necesitamos saber son los valores de la potencia relativa  $S(\lambda)$ , que están dados en la Tabla A.3 anexada en el apéndice. [24]

Al graficar estos valores podemos ver el comportamiento de la fuente, que es muy similar al de la luz de día. Lo podemos ver en la gráfica de la Figura 2.24.

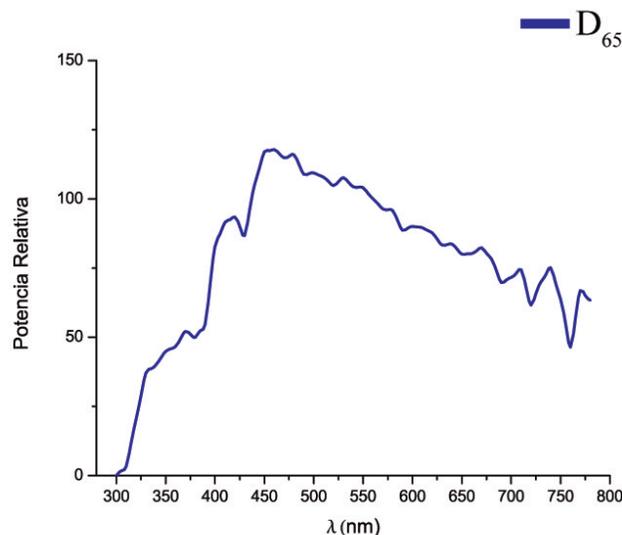


Figura 2.24: Distribución de potencia espectral de la fuente tipo  $D_{65}$

Para finalizar esta sección, en la Figura 2.25 ponemos en comparativa la fuente tipo A y la  $D_{65}$ . En esta gráfica se puede apreciar que una bombilla de tungsteno tiene una gran carencia en las longitudes de onda por debajo de 550 nm, sin embargo, por encima de este valor existe una saturación en potencia relativa. Esto es de real importancia debido a que nosotros, además de desear una fuente uniforme, deseamos una fuente que se asemeje a la tipo  $D_{65}$  que es beneficiosa para el ser humano [18].

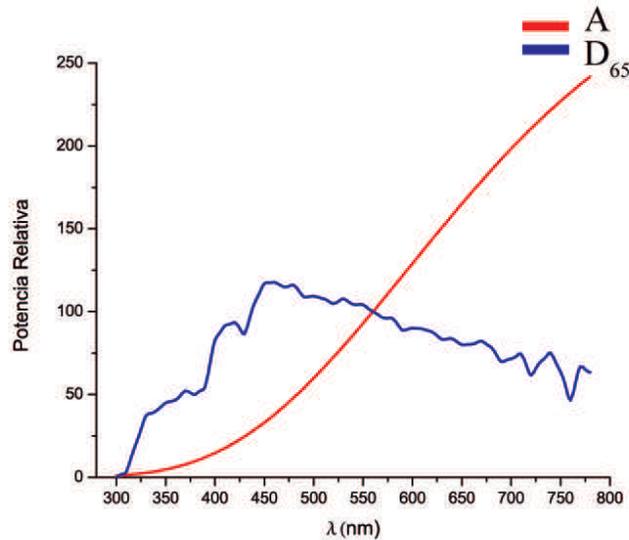


Figura 2.25: Comparativa de la fuente tipo A y tipo  $D_{65}$ , el punto en el que interceptan las curvas es en 550 nm.

### 2.5.6. Resumen Capítular

En este capítulo vimos los conceptos teóricos básicos para el resto de la tesis, es de suma importancia que tomemos este capítulo de referencia para poder conocer la información obtenida de las simulaciones en los capítulos posteriores. Vimos especialmente que la fotometría se deriva de la radiometría, para ello fue necesario conocer los conceptos radiométricos para comprenderlos de la misma manera en que fueron desarrollados.

En la parte de colorimetría vimos como se desarrollo a lo largo de la historia, sin embargo, como veremos mas adelante, no es necesario realizar cálculos directos debido a que las simulaciones nos darán toda la información necesaria. También, en la sección posterior no se realizaron los cálculos de verificación explícitamente debido a que no son de relevancia, pero si se realizaron para confirmar que las transformaciones de los datos colorimétricos son correctas.

Por último, vimos como el espectro de las fuentes es de suma importancia debido a que nosotros queremos igualar la iluminación solar y como la fuente de un filamento incandescente varía muchísimo con respecto a la solar, lo cual influye mucho en nuestro organismo como lo vimos en el capítulo 1.

En la siguiente sección iniciaremos con las simulaciones de sistemas ópticos, que es el objetivo principal de esta tesis.

# Capítulo 3

## Análisis de propagación en un tubo de luz.

En este capítulo iniciaremos con la parte de simulación de los tubos de luz. Primero analizaremos el acoplamiento y la propagación de la luz dentro de los tubos de luz. Con el objetivo de seleccionar uno de ellos para el diseño de cortes en el mismo para la extracción de luz. Recordemos que el objetivo de la tesis es extraer luz de una guía de onda a través de un corte transversal. En los siguientes análisis tomamos como base una fuente de iluminación  $D_{65}$  que ilumina un lente de fresnel de 3.175 mm de ancho, con una apertura radial de 201.93 mm, un radio de curvatura de 74.676 mm, con una constante cónica de -1 es decir una parábola, hecho de acrílico. Que después enfoca en un pyrex a 137.668 mm y tiene una longitud de 130.048 mm y 6.35 mm de diámetro para ser introducido a una fibra plástica de 5.334 mm de radio externo con un índice de refracción de 1.47, un número de Abbe de 57.440, un núcleo de PMMA de radio 4.826 mm, ambos de 990.6 mm de longitud. Para mayor información del diseño y caracterización de este sistema de iluminación referirse a la tesis “*Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores*”. Los tubos de luz están en un acoplamiento perfecto, ya que las caras de ambos materiales, la fibra óptica plástica y el tubo de luz, están unidas sin espacio entre ellas y tienen cortes completamente rectos. Los siguientes análisis serán hechos en ZEMAX<sup>®</sup> con las siguientes características de simulación, las cuales explicaremos con detalle.

### 3.1. Características de simulación ZEMAX<sup>®</sup>

#### 3.1.1. Modo no secuencial

Cuando utilizamos ZEMAX<sup>®</sup>, así como algunos otros programas de simulación óptica, un modo básico y muy potente es el modo secuencial. El modo secuencial, como su nombre lo indica, sigue la secuencia de objetos insertados en la simulación, es decir, los cálculos se hacen del objeto 1 al objeto 2 y así sucesivamente, y cuando lo hace, los cálculos no se repiten en el objeto anterior, aunque los rayos pasen de nuevo. Sin embargo, hay situaciones en las que se necesita que la simulación se haga de una manera no secuencial, es decir, que los rayos que atraviesan el objeto 1, puedan pasar, si la geometría lo dicta, al objeto 9 y puedan volver a realizar cálculos en el objeto 1 en caso de que algunos rayos regresen. Este tipo de simulación toma más tiempo de cálculo debido a esta propiedad, el recalcular en objetos. El modo no secuencial es el recomendado por ZEMAX<sup>®</sup> para el análisis de los siguientes casos:

- Prismas

- Tubos de luz
- Arreglos de lentes
- Reflectores
- Lentes de Fresnel

De los cuales utilizaremos los tubos de luz con lentes de Fresnel. Por lo tanto, el análisis debe de hacerse en un modo no secuencial. Cabe señalar que los objetos insertados en una simulación no secuencial se les conoce como *Objetos No Secuenciales*. El trazado de rayos de Objetos No Secuenciales en ZEMAX<sup>®</sup>, es capaz de tener las siguientes características, entre otras:

- Unidades radiométricas y fotométricas reales; incluyendo watts, lumen, lux, phot y otras.
- Detección automática de reflexión, refracción y reflexión total interna.
- Definición y posicionamiento de múltiples superficies como objetos o detectores.

### 3.1.2. Trazado de Rayos

No existe el trazado paraxial de rayos en el modo no secuencial de ZEMAX<sup>®</sup>, es decir, cuando un rayo paraxial es trazado en una superficie no secuencial, el rayo equivalente real es trazado en su lugar. Algunos sistemas en el modo no secuencial tienen un buen comportamiento en el sentido que los rayos reales se acercan mucho al comportamiento axial. Sin embargo, el comportamiento real no iguala al comportamiento paraxial y los datos paraxiales deben de ser considerados como “sin sentido” para este tipo de sistemas. Para introducir rayos en el sistema es necesario definir una fuente, de las cuales ZEMAX<sup>®</sup> tiene:

- Puntuales
- Rectangulares
- Elípticas
- Definidas por el usuario
- Objetos importados como fuentes

Durante el trazado de rayos en ZEMAX<sup>®</sup>, los rayos al llegar a un objeto pueden, de acuerdo a la propiedad:

- Ser reflejadas
- Ser absorbidas
- Ser refractadas
- Ser de reflexión total interna
- Dividirse

- Difractarse
- Una combinación de todas o algunas de las anteriores

La manera que ZEMAX® lee la información de los rayos es por medio de detectores, de los cuales hablaremos con más detalle a continuación. Todos los objetos no secuenciales permiten una especificación del material en el editor. Las propiedades reflectoras, refractivas y absorbivas son propiedades de un objeto dependiendo de su tipo. Los materiales se definen de acuerdo a una tabla precargada de ZEMAX®, en la cual se tienen diferentes propiedades de los materiales como su índice de refracción, su absorbividad, coeficiente de expansión térmica, entre otros. Estas propiedades provienen de los vendedores de componentes ópticos reconocidos o pueden ser ingresados por el usuario, en nuestro caso utilizaremos la tabla precargada por lo tanto no profundizaremos mucho en el tema. El trazado de reflexión y refracción se toma de acuerdo a estas propiedades y a fórmulas. Para el caso de dispersión de materiales se utilizan diversas fórmulas como la Schott, Sellmeier, Herzberger, Conrady, entre otras. La que utilizaremos en esta tesis será la fórmula de Schott que es la siguiente:

$$n^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8}$$

A excepción del Pyrex que utiliza la fórmula de Conrady, que es la siguiente:

$$n = n_0 + \frac{A}{\lambda} + \frac{B}{\lambda^{3.5}}$$

En donde el catalogo provee todas las constantes necesarias para realizar el cálculo. En nuestro caso utilizaremos solamente, PMMA, acrílico y pyrex de los catálogos precargados.

### 3.1.3. Objetos

Los objetos no secuenciales, son todos los objetos que ZEMAX® puede manejar como son, elipses, triángulos, rectángulos, cilindros y otras formas básicas. Los objetos complejos como prismas, lentes esféricas, toroides y otras componentes también están disponibles. Cuyas propiedades están definidas por el catálogo de vidrios o por el usuario. Un objeto también puede ser clasificado como detector. En esta sección hablaremos de estos objetos con mayor detalle.

#### 3.1.3.1. Fuentes

Algunos parámetros de las fuentes de ZEMAX® incluyen: el número de rayos a dibujar, el número de rayos para análisis, la potencia y la longitud de onda. En esta tesis solamente utilizaremos una fuente rectangular, pudiendo haber otras definidas por el usuario, elípticas, lambertianas, de diodos, etc. La fuente rectangular es una superficie rectangular plana la cual emite rayos de una fuente virtual. Los parámetros de esta fuente incluyen:

- Anchura.
- Distancia de la fuente.
- Distribución Gaussiana

El hecho de que se utilice esta fuente es que consideramos que los rayos que llegan a nosotros son paralelos, con una distribución uniforme.

### 3.1.3.2. Objeto no secuencial importado

Un objeto secuencial importado es todo aquel objeto diseñado en un programa, conocidos como los diseños asistidos por computadora (por su siglas en inglés Computer-Aided-Design, CAD) en formato IGES o STEP. En esta tesis se utiliza el formato STEP que es el Estándar del modelo de datos para intercambio de productos (Standar for the Exchange of Product model data). En esta tesis se hacen los objetos en el programa Solid Works® 2011 y es exportado en formato STEP e importado por ZEMAX®. Una vez importado el objeto puede tener propiedades asignadas como vidrio, funciones de dispersión, entre otras y los rayos son trazados como cualquier otro objeto. Una de los propiedades que tiene el objeto no secuencial importado es el número de Voxeles, cuyo nombre es derivado de “volumen de pixeles”. Un voxel es un rectángulo tridimensional que define una porción del volumen total. Usualmente se colocan valores de 5 en las 3 coordenadas. El modo controla el tiempo de trazado contra el tiempo de preparación. Si se desea un modo de trazado de rayos lento se usa 1, 2 para una compensación igualada y 3 para un trazado de rayos con una gran cantidad de rayos. En este caso estaremos utilizando el modo 3 para el objeto no secuencial importado. En la cuestión de escala, siempre se utilizará 1, ya que no se cambiará el tamaño de los objetos importados. Una desventaja de utilizar objetos no secuenciales importados es que se pierde precisión de las curvas en la exportación e importación del formato STEP, sin embargo, esta precisión solo es significativa en modelos ópticos que necesitan mucho detalle, para los objetivos de esta tesis y para cualquier modelo de iluminación, el objeto no secuencial importado es aceptable.

### 3.1.3.3. Detectores

Como mencionamos anteriormente el detector es la manera en que ZEMAX® lee los datos de los rayos, es decir, cuando un rayo pasa por un pixel del detector, esta información es guardada, pudiendo ser acumulada. A continuación hablaremos acerca de los detectores que se utilizarán.

**3.1.3.3.1. Detector objeto rectángulo** El detector objeto rectángulo es un detector plano rectangular con un número arbitrario de pixeles definidos por el usuario, puede guardar diversos datos. Es el detector más potente pero limitado a una superficie rectangular. Guarda los datos de energía de los rayos que inciden en él. La distribución de los datos resultantes pueden ser vistos para luz incoherente en los dominios espacial y angular, o la irradiancia coherente espacial o de fase. Este tipo de detector puede ser reflectivo, transparente o absorbente. Entre las propiedades que tienen están:

- Anchura
- Número de Pixeles
- Considerar Polarización

**3.1.3.3.2. Detector de color** El detector de color almacena información de la potencia y triestímulos de una fuente de rayos del modo no secuencial que lo golpean. Sus propiedades son similares al detector rectangular. Este detector nos ayudará en la parte de colorimetría para determinar el color obtenido a la salida del dispersor. Esto es muy importante, ya que debido a la absorbancia de los materiales, podemos tener un cambio en el color de salida.

**3.1.3.3.3. Detector de Volumen** El detector de volumen almacena la energía incidente que pasa a través de cada voxel. La distribución de datos resultantes pueden ser visualizados como flujo incidente o flujo absorbido por unidad de volumen. Estos detectores también pueden ser anidados con otros objetos. Esto le da una gran ventaja a este detector debido a que se puede observar el comportamiento de los rayos dentro de los objetos.

Este detector será de gran ayuda, ya que nos permite ver el flujo incidente medido en lumen, la desventaja de utilizarlo es que no proporciona datos del flujo total, sin embargo se puede apoyar con el detector rectangular para obtener una información completa.

## 3.2. Configuración inicial para los análisis

La configuración inicial es la misma en los análisis. Como mencionamos utilizamos la fuente de la tesis “*Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores*”, la cual entrega un cono de apertura de aproximadamente 45°. Para el análisis de los tubos de luz, se colocan al final de la fuente provista y se forma un acople ideal, es decir, ambas caras tienen un corte totalmente recto y están unidas sin espacio vacío entre sí, lo cual sabemos que en la realidad es muy difícil de lograr, sin embargo, éste será nuestro punto de partida.

Cada tubo de luz tiene una longitud de 40 cm, con un diámetro de 2.54 cm, el material asignado fue acrílico el cual tiene las siguientes constantes:

Constante	Valor
$A_0$	$2.163 * 10^0$
$A_1$	$1.365 * 10^{-2}$
$A_2$	$2.56 * 10^{-2}$
$A_3$	$-2.809 * 10^{-3}$
$A_4$	$2.842 * 10^{-4}$
$A_5$	$-9.021 * 10^{-6}$
n	1.491
Número de Abbe	55.310
Longitud de onda mínima	365 nm
Longitud de onda máxima	1014 nm

Se colocó un detector rectangular de 2.54 cm de alto por 2.54 cm de ancho cuenta con 100 pixeles por 100 pixeles en la posición inicial del tubo de manera transversal, la cual será en 0. Esto quiere decir que cada pixel cubre un área de 0.254 mm por 0.254 mm.

También se colocó un detector de volumen de 2.54 cm de alto por 2.54 cm de ancho por 0.00254 cm de largo de manera transversal, cuenta con 100 pixeles de alto por 100 pixeles de ancho por 1 pixel de largo. Esto quiere decir que cada pixel cubre un área de 0.254 mm de alto, 0.254 mm de ancho y 0.00254 mm de largo. Se hizo de esta manera para medir el flujo que pasa por el detector, ya que el detector rectangular no otorga esta información.

Los detectores mencionados, fueron movidos desde la cara inicial del tubo de luz hasta la cara final con pasos de 1 cm, para ver el comportamiento a lo largo de todo el tubo de luz, para ver todos los resultados vea Apéndice C, para ver el comportamiento del plano medio se introdujo un tercer detector, que por cuestiones

de computo, no soportaba una mayor cantidad de pixeles que los introducidos. El tercer detector es un detector de volumen, el cual se colocó en la parte central del tubo de luz en un corte longitudinal para poder visualizar el comportamiento de la luz y así poder elegir las mejores imágenes para mostrar de los detectores anteriores; también fueron de gran utilidad en el análisis para visualizar completamente el modelo. El detector volumétrico longitudinal tiene 2.54 cm de alto, 40 cm de ancho y 0.00254 cm de largo, con 200 pixeles de alto por 200 pixeles de ancho por 1 de largo. Esto quiere decir que cada pixel cubre un área de 0.0127 cm de alto, 0.2 cm de ancho por 0.00254 cm de largo. Esto se hizo debido a que el detector no soportaba una mayor cantidad de pixeles por falta de memoria, para poder empatar el alto con el ancho.

A continuación mostramos una imagen con todo el sistema a modelar, en la Figura 3.1 vemos a grandes rasgos el sistema.

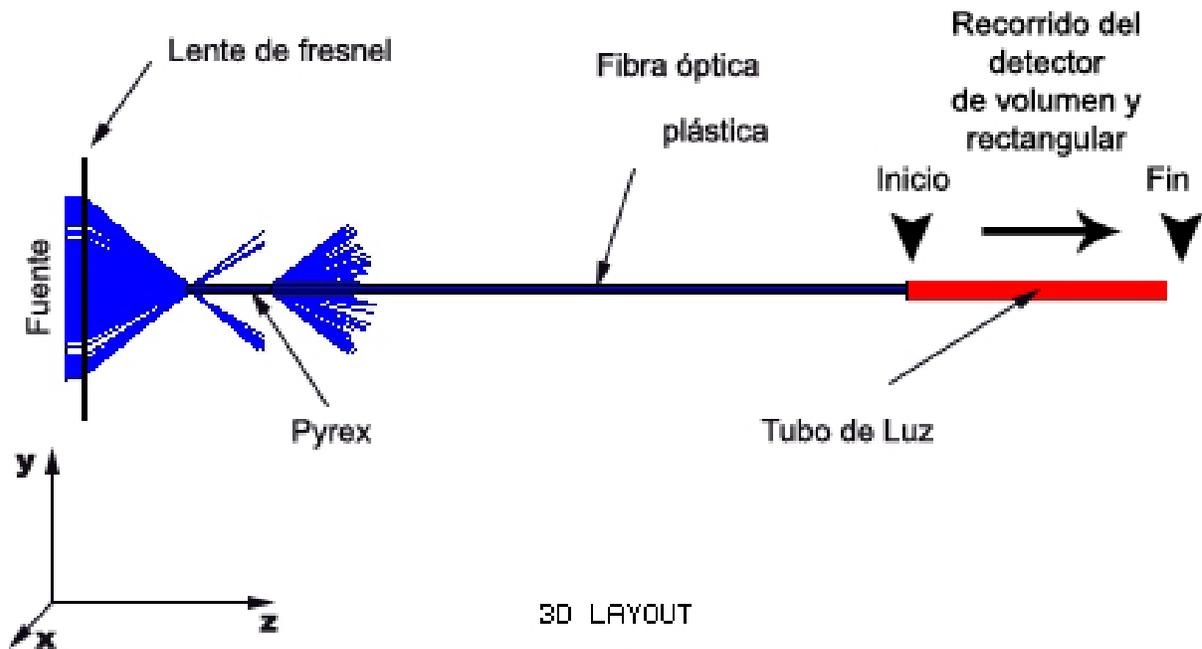


Figura 3.1: Arreglo de los materiales introducidos para la simulación.

Como se menciona en la tesis “*Estudio del acoplamiento de un colector solar con fibras ópticas plásticas para la iluminación de interiores*” se utilizan 80 W de potencia inicial, para nuestro caso debemos de realizar la transformación a lumen para poder obtener resultados fotométricos que son de mayor valor en esta tesis. Para ello se realizó el siguiente procedimiento:

1. Se toma el espectro  $D_{65}$  y se ajustan los valores de potencia relativa de tal manera que el área bajo la curva tenga un total de 80 W que es el valor inicial. Aquí obtenemos nuestro valor radiométrico dependiente de la longitud de onda.
2. Se obtiene el valor de  $K(\lambda)$  en la parte fotópica.
3. Se multiplican estos valores para obtener el equivalente fotométrico en lumen.

Una vez realizado este proceso, obtenemos un valor de 7591 lumen el cual será el que utilizaremos en la fuente para iluminar nuestro sistema. Esto se hizo debido a que los resultados obtenidos en el programa dependen de las unidades que se introduzcan en la fuente y simplifica el resultado.

### 3.3. Análisis de un tubo de luz cilíndrico

En la siguiente figura mostramos el modelo de tubo de luz utilizado junto con el flujo luminoso en la cara de salida.

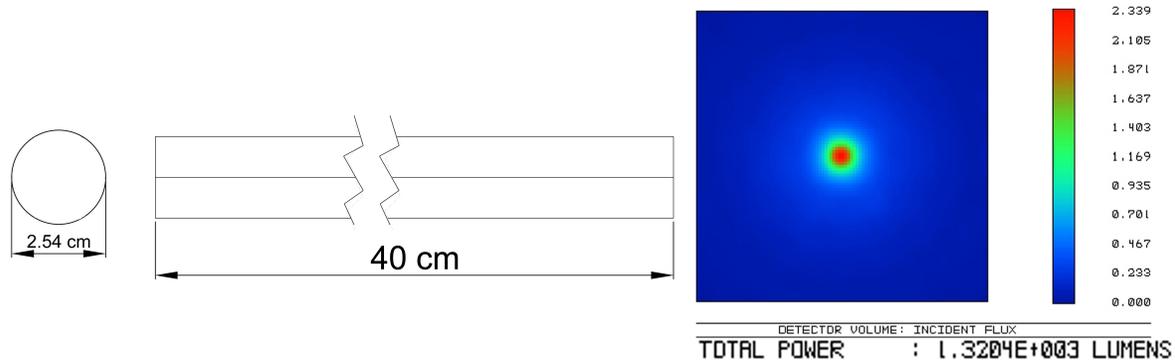


Figura 3.2: En esta imagen vemos como la mayor cantidad del flujo está concentrado en el centro.

Como podemos ver en la Figura 3.2, la mayor parte del flujo se concentra en el centro, lo que quiere decir que no se distribuye uniformemente a lo largo de toda la cara del tubo de luz. Para ver la distribución del plano medio a lo largo de todo el tubo, veremos la Figura 3.3

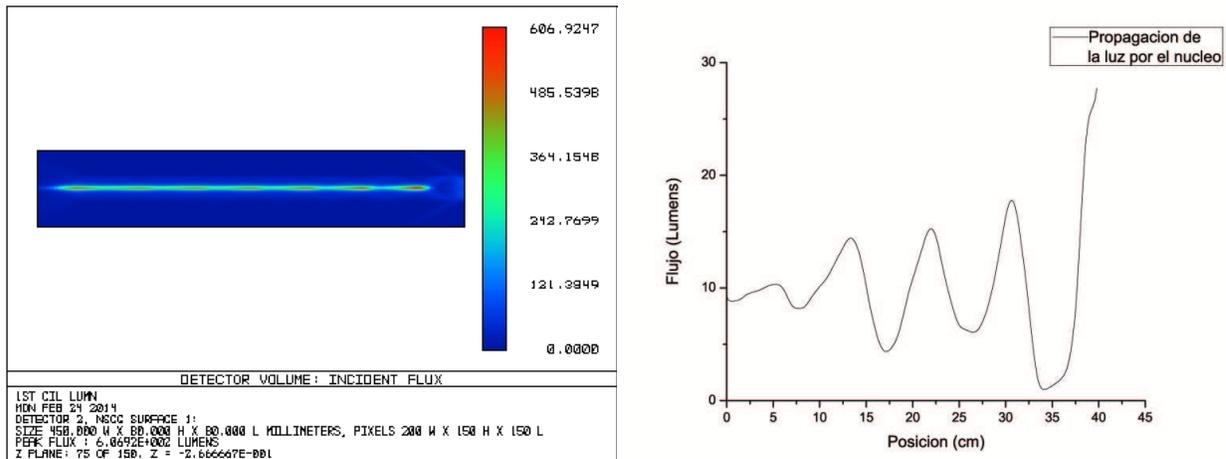


Figura 3.3: Distribución de flujo por un plano medio longitudinal sobre todo el cilindro. Como vemos la mayor parte del flujo se concentra en el centro. A la derecha vemos la distribución de flujo del núcleo del tubo de luz.

De la Figura 3.2 podemos deducir que para extraer una mayor cantidad de luz de este tubo de luz, es necesario desviar el flujo central hacia el borde, lo que significaría que necesitaríamos introducir una manera de

desviarlo hasta el centro, además de que la salida tendría una dirección preferente debido a la alta densidad del centro.

Debido al análisis que se hace del colector elíptico compuesto, si hacemos un estudio con un tipo de fuente en el que el punto A tenga mayor densidad, esto significaría que muchos rayos llegarían a un punto C lo que rompería con la uniformidad de la iluminación, que es algo que buscamos evitar.

### 3.4. Análisis de un tubo de luz mitad de círculo

Para el siguiente modelo, utilizamos un tubo cilíndrico cortado por la mitad longitudinal. En la siguiente figura mostramos el modelo de tubo de luz utilizado junto con el flujo luminoso en la cara de salida.

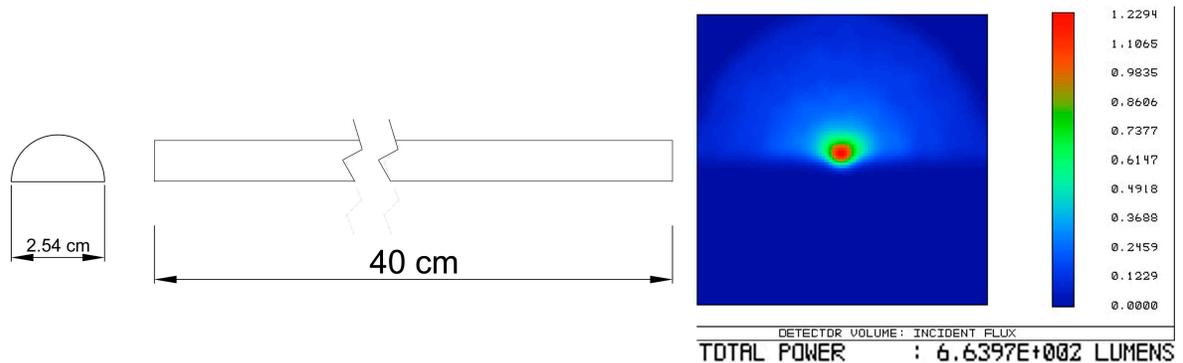


Figura 3.4: En esta imagen vemos como el comportamiento es muy similar al tubo cilíndrico, con la excepción de que en la mitad donde no hay guía de onda, no existe flujo luminoso.

Como podemos ver en la Figura 3.4, la mayor parte del flujo se concentra en el centro, muy similar al caso anterior, lo cual es de esperarse por ser una geometría similar. Podemos concluir que no se distribuye uniformemente a lo largo de toda la cara del tubo de luz. Para ver el comportamiento del plano medio a lo largo del tubo, veremos la Figura 3.5.

De la Figura 3.5 podemos ver un comportamiento similar al de la Figura 3.3, con la ventaja de que el núcleo está más próximo a una cara, pudiendo ser una figura más sencilla para extraer luz del núcleo, pero con la desventaja de que tendremos que usar más material para poder acoplar la fuente. Además de una desventaja más aún, la extracción de luz sería en un área de trabajo muy pequeña. Sin embargo, al ver esta imagen y la Figura 1.7, se puede deducir que la compañía 3M<sup>®</sup> utilizó un modelo similar para su dispersor de emisión lateral, como no se cuenta con información oficial acerca del diseño del dispersor podemos solamente especular que optimizaron sus ranuras de precisión para la extracción de luz de manera uniforme.

### 3.5. Análisis de un tubo de luz cuadrado

Para el siguiente modelo, utilizamos una varilla cuadrada con las siguientes características, mostrando también el flujo luminoso en la cara de salida.

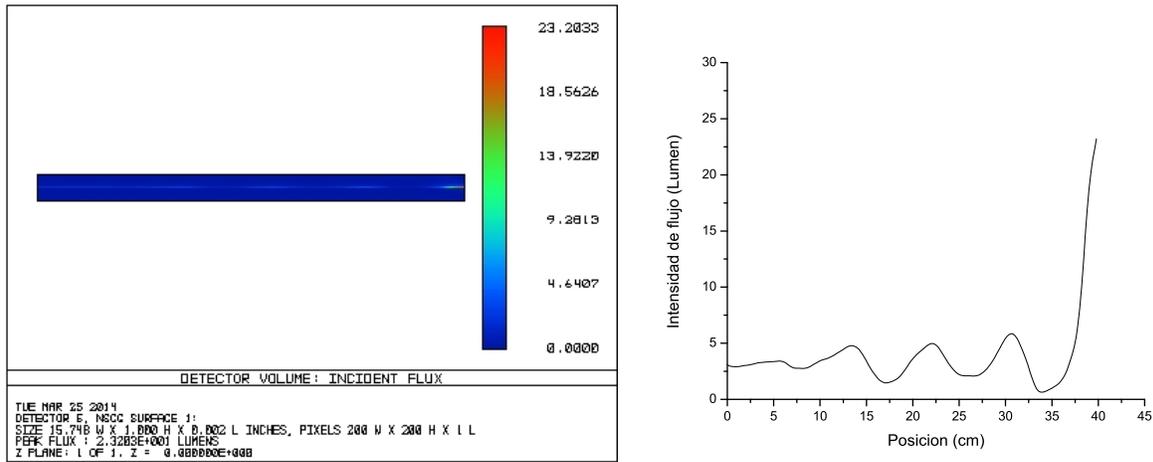


Figura 3.5: Distribución de flujo por un plano medio longitudinal sobre todo el cilindro. Como vemos en el comportamiento del núcleo de la figura de la derecha, es el mismo que en un cilindro completo pero con menor intensidad de flujo.

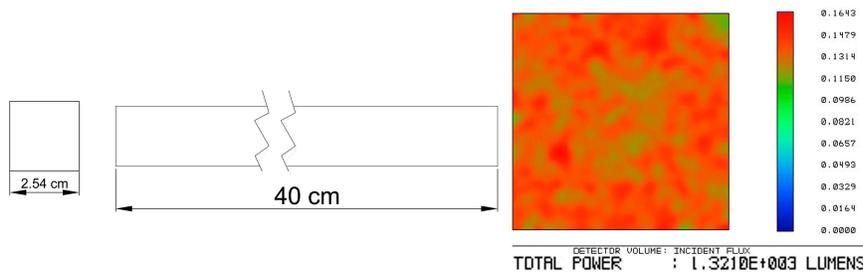


Figura 3.6: Aquí vemos que, a diferencia de los anteriores, el flujo luminoso a sobre toda la cara es casi uniforme, lo cual nos será de gran utilidad en la extracción de luz.

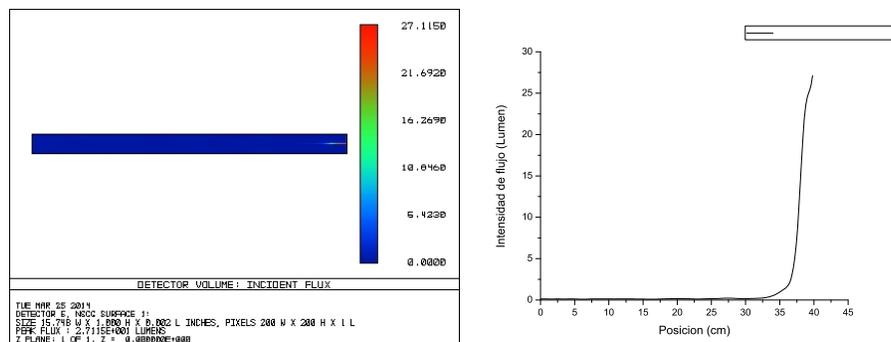


Figura 3.7: La imagen sugiere que la intensidad de flujo no se concentra en el centro del tubo de luz durante la propagación, si no durante el momento de su salida. Esta es la principal diferencia con los tubos de luz circulares.

Se puede ver que no existe gran variación en el núcleo del tubo de luz, si vemos el apéndice Apéndice C veremos que la propagación dentro del tubo de luz tiene una mayor uniformidad a lo largo de éste.

### 3.6. Análisis de un tubo de luz hexagonal

En la siguiente figura mostramos el modelo de tubo de luz hexagonal utilizado. Una parte importante de los análisis es la cara de salida, así podremos ver el mejor comportamiento del flujo del tubo de luz.

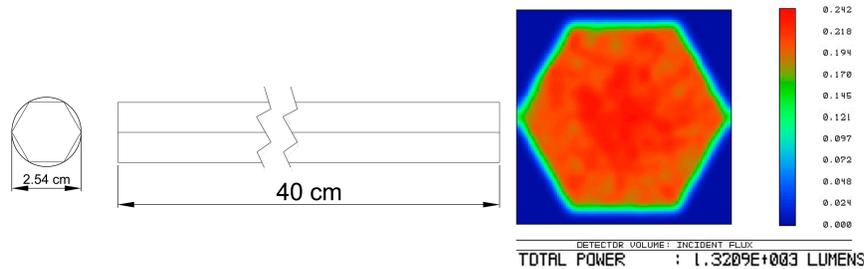


Figura 3.8: Aquí vemos que, a diferencia de las otras imágenes, el flujo de salida para un tubo de luz hexagonal es más uniforme en toda la cara. El círculo alrededor del hexágono fue dibujado solamente con propósitos aclaratorios, el hexágono fue construido con un círculo de 2.54 cm circunscrito.

Lo que podemos ver de este tubo de luz es que tanto su salida, como la propagación a lo largo de él (ver apéndice) es uniforme, lo cual nos es de gran ayuda para una extracción uniforme de luz.

En la Figura 3.9 vemos la distribución de flujo por un plano medio al tubo de luz hexagonal.

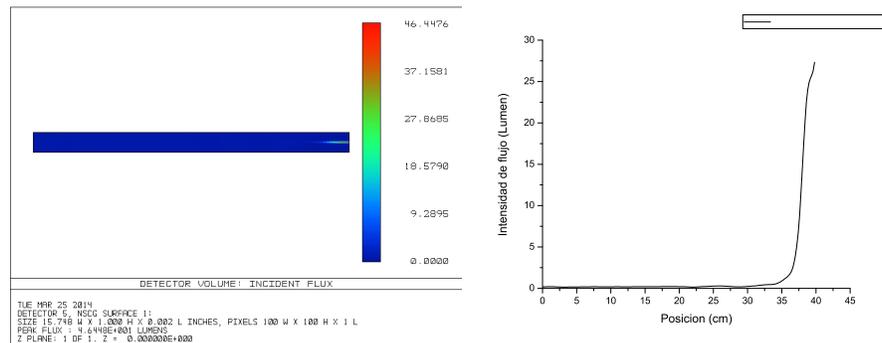


Figura 3.9: La imagen sugiere que la intensidad de flujo no se concentra en el centro del tubo de luz durante la propagación si no hasta el momento de su salida.

Se puede ver que no existe gran variación en el núcleo, lo que nos sugiere que la distribución no tiene una mayor densidad en el centro, lo cual se puede ver con mayor claridad en el apéndice Apéndice C, lo que nos dice que la propagación por éste tipo de tubo de luz es más uniforme.

Cabe mencionar que para estas simulaciones existe un error asociado a pérdidas o cálculos que es incapaz de realizar el programa, sin embargo no fueron incluidos sus valores en esta tesis debido a que son insignificantes considerando que introducimos 7591 lumen y los errores son del orden de 30 lumen por simulación, es decir errores cerca del 0.4%.

### 3.7. Diseño de cortes para extracción de luz

Como punto de partida necesitamos conocer los ángulos necesarios para extraer la luz de un medio, es decir, qué ángulos están fuera de la reflexión total interna. Para ello hacemos uso de la ley de Snell en la forma de ecuación del ángulo crítico Ecuación 2.2, utilizando el índice de refracción del material, en este caso,  $n_2 = 1.491$  y la del aire  $n_1 = 1$ .

$$\sin\theta = \frac{1}{1.491}$$

$$\theta \simeq 42^\circ$$

O visto desde otra perspectiva, si introducimos luz de un ángulo muy grande  $\sin\theta \simeq 1$  por lo que la ley de Snell nos queda:

$$1 = 1.491\sin\theta_2$$

$$\theta_2 \simeq 42^\circ$$

Por lo tanto, decimos que no pueden existir, desde una entrada de luz, rayos con ángulos mayores a  $42^\circ$ . Y más aún, los ángulos de los rayos necesarios para que exista la reflexión total interna deben de ser menores a  $42^\circ$ . Este dato es muy importante en el diseño ya que, para hacer la superficie reflectora, debe de cumplir con esta característica. En la Figura 3.10 vemos como están formados los rayos dentro del acrílico.

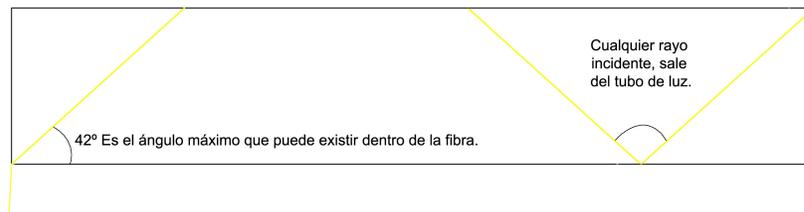


Figura 3.10: En esta figura vemos como entra un rayo de luz con un ángulo muy grande provocando un ángulo máximo de  $42^\circ$  el cual es el ángulo crítico.

Una vez conocido esto, necesitamos saber cuales son los ángulos máximos que existe dentro de nuestro tubo de luz, para ello utilizamos un detector de luminancia en el espacio angular para un tubo cilíndrico, del cual mostramos la gráfica en la Figura 3.11. Si utilizamos otros tubos de luz, existirán ángulos iguales a este caso, debido a que solamente cambia la propagación espacial, no angular a lo largo del tubo de luz.

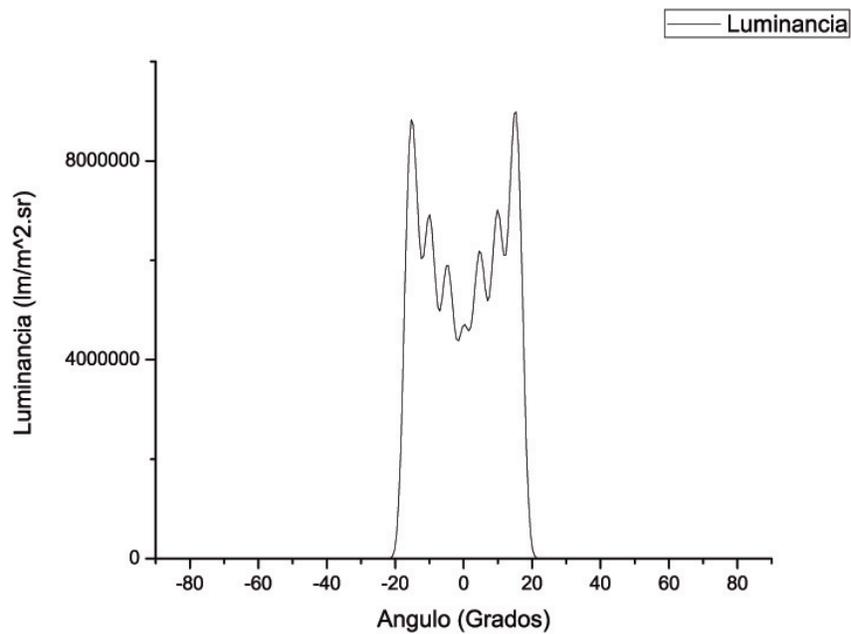


Figura 3.11: En esta figura vemos la distribución angular dentro de los tubos de luz.

Cuya curva comienza a ascender en aproximadamente  $-23^\circ$ , que es el que tomaremos a consideración para el diseño del corte para hacer la superficie reflectora.

A continuación, para la construcción de la superficie reflectora, tomando en cuenta los datos anteriores, tenemos que identificar el tamaño del tipo de fuente que tenemos, como hacemos tubos de luz de un diámetro de 2.54 cm, eso quiere decir que nuestra fuente  $\bar{A}\bar{B}$  será de esa distancia, los rayos que salgan de esa fuente tendrán un ángulo del semicono de salida de  $-23^\circ$ , la fuente la podemos ver en la Figura 3.12.

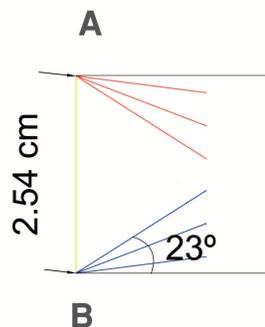


Figura 3.12: En esta figura vemos los rayos marginales y algunos secundarios, los cuales nos indican la propagación de los rayos dentro del tubo de luz.

Como siguiente paso, debemos de emparar el ángulo de entrada con el ángulo de salida deseado ( $-42^\circ$ ), tomando en cuenta que el ángulo con respecto a la normal de la superficie de corte debe de ser igual o mayor al ángulo complementario del ángulo crítico para que exista la reflexión total interna, para empezar la construcción de la elipse como vimos en el capítulo 2. Para ello, es mas sencillo verlo en la Figura 3.13

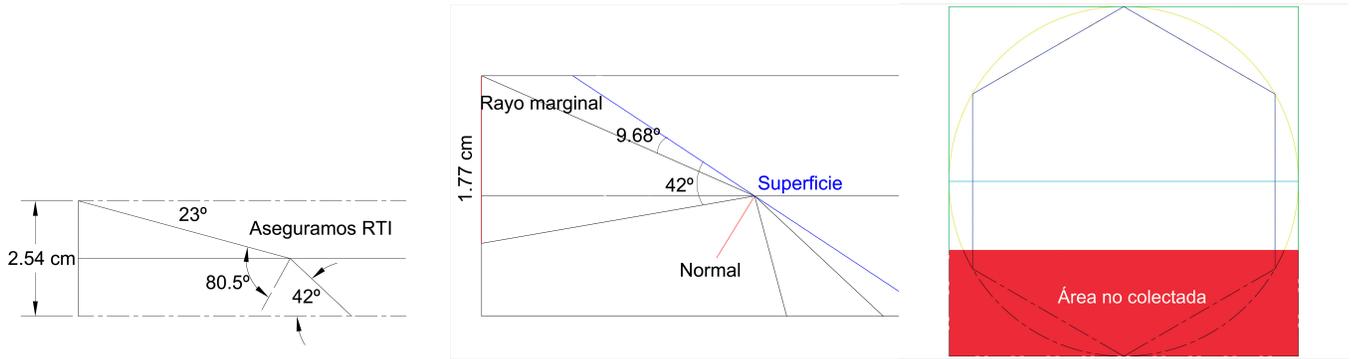


Figura 3.13: Del lado izquierdo tenemos el rayo marginal ajustado al rayo deseado de salida, a partir de ahí, construimos una recta normal a una superficie deseada. En la parte de la derecha mostramos que la restricción para ese punto es cuando sobrepasamos el ángulo crítico.

Como vemos en la Figura 3.13 existe una restricción de área a colectar, ésta viene dada por el ángulo crítico para ese punto, por lo tanto, el área colectada en nuestro diseño es de 1.77 cm de altura o diámetro dependiendo del diseño del tubo de luz.. Por ello es importante que nuestro tubo de luz tenga una propagación lo mas uniforme posible.

A partir de aquí, podemos construir la elipse, midiendo la distancia entre los focos y sabemos que la suma de las distancias de los focos al punto P, debe ser el eje mayor. Con estos datos podemos conocer la excentricidad de la elipse dividiendo la semidistancia focal y el semieje mayor. A partir de aquí podemos calcular el semieje menor mediante la relación:

$$b = a\sqrt{1 - \epsilon^2}$$

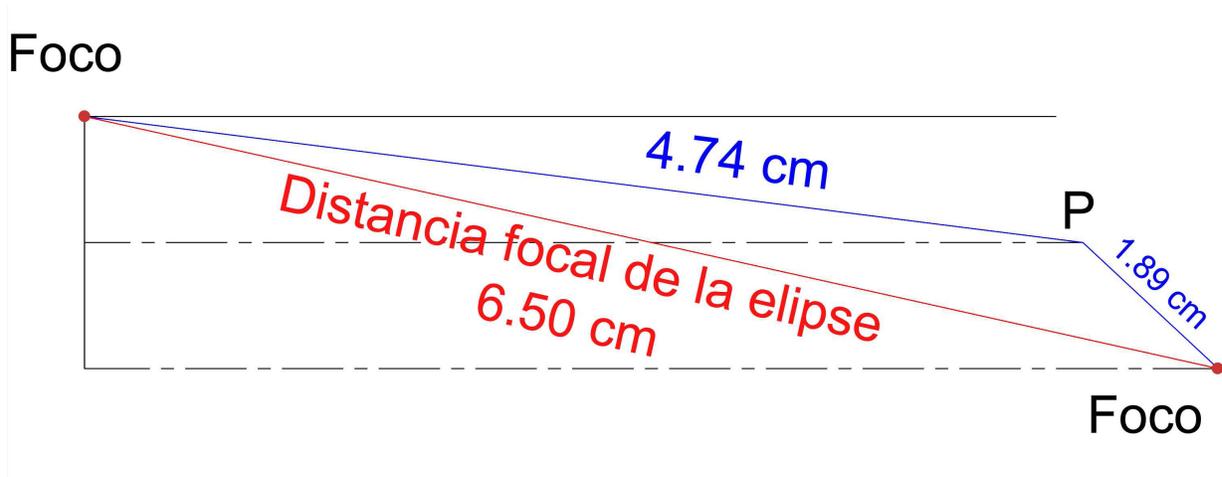


Figura 3.14: Representación de la construcción de la elipse mostrando la distancia focal y los rayos que salen del foco a un punto P.

Finalmente nuestros valores para el eje mayor a, el eje menor b y la distancia focal de la elipse c son los siguientes:

$$a = 3.32cm$$

$$b = 0.68\text{cm}$$

$$c = 3.25\text{cm}$$

En la construcción de la elipse, vemos en la Figura 3.15 que la geometría como lo dijimos anteriormente, es muy específica.

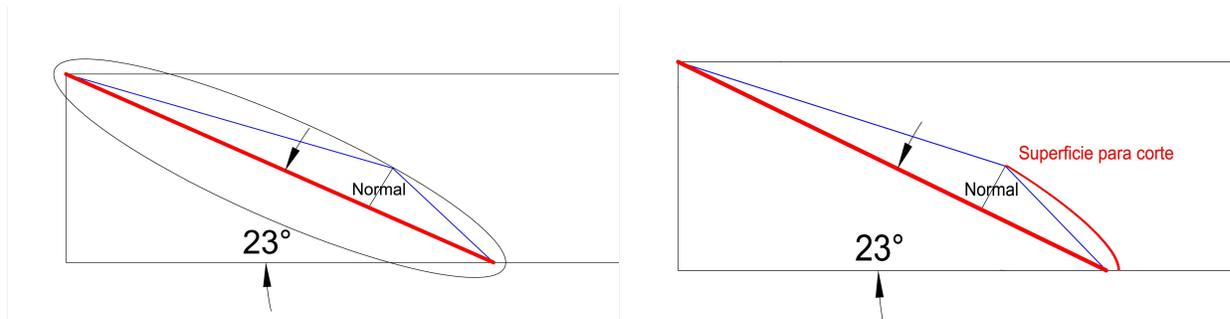


Figura 3.15: A la izquierda vemos la construcción de la elipse para poder coleccionar los rayos de luz. En la derecha se puede ver la misma imagen sin las partes necesarias de la elipse.

El diseño de la elipse para realizar los cortes será el mismo para todas las geometrías, como vemos en la Figura 3.15, al final es una sección de la elipse que se utilizará. Como vimos anteriormente, este diseño tiene sus limitantes, sin embargo, es muy útil en la extracción de luz del cilindro y además es un método distinto a los ya estudiados. En la siguiente sección veremos el potencial de este método de extracción.

Como vimos en el capítulo 2, al construir un colector elíptico compuesto, podemos hacer una superficie de revolución o un extruido. En este caso nosotros haremos el extruido en todos los tubos de luz en forma de un corte de 3 mm de ancho. Se seleccionó 3 mm debido a que es un área en la cual se podría trabajar para pulido de caras en acrílico, en el caso que en un futuro se decida llevar a cabo este modelo.

Los tubos de luz antes mencionados se modelarán insertando el corte mencionado al final de la cara, dejando una parte intacta y se volverá a realizar una simulación del tubo de luz para recolectar información acerca de la salida de luz por la cara frontal y la nueva variación que es lo que deseamos. Como trabajo a futuro se planea poner una sucesión de estos cortes para poder realizarlo uniformemente a lo largo de toda la longitud.

## Capítulo 4

# Análisis de los tubos de luz con un corte transversal.

En este capítulo hablaremos acerca de la simulación que se realizó cuando se aplican cortes transversales al final de los distintos tubos de luz, adelantamos que, de acuerdo al capítulo 3, la respuesta con mayor uniformidad se espera en los tubos de luz cuadrado y hexagonal debido a la propagación de la luz dentro de ellos, aún más, la mejor respuesta se espera en el cilindro con base cuadrada debido a que posee mayor uniformidad en propagación que el tubo cilíndrico.

En la Figura 4.1 podemos ver el diseño general de los dispersores de luz, en el cual el corte elíptico se hace a partir de la cara final aprovechando la mayor área posible. Como podemos ver, no se divide ninguna superficie en dos partes, excepto en el tubo con forma de medio círculo debido a que el corte elíptico atraviesa completamente el cilindro.

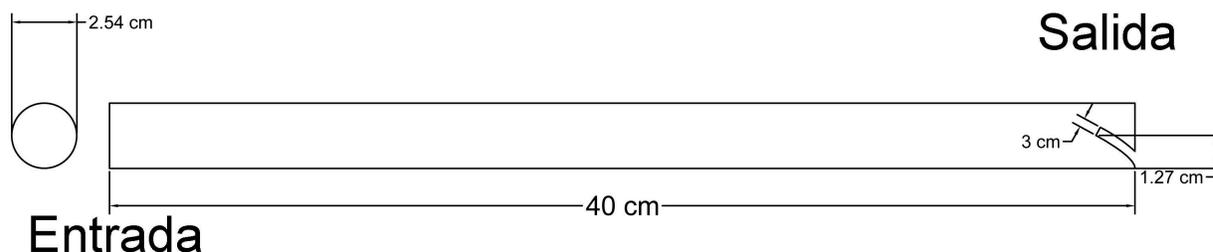


Figura 4.1: Como podemos ver, los diseños de los tubos de luz son distintos pero el diseño del corte en todos ellos es el mismo. Al cortar el tubo de luz, no se elimina ninguna superficie excepto en el caso de la forma de mitad de círculo.

### 4.1. Configuración inicial de la simulación

La configuración fue tomada exactamente igual que en el capítulo 3, agregando detectores de color y rectangulares en la cara de salida, así como en la parte restante al corte que se realizó. Además se colocó un detector de color en la parte inferior la cual es la encargada de coleccionar la luz extraída, este detector marcado como la posición (4) es el mas importante de todos, debido a que es el detector que nos muestra los resultados

que son de interés para iluminación. Todos los detectores fueron colocados justo en las caras, con una separación de 0.00254 cm entre ellos debido a que un traslape nos resultaría en error de simulación, en la Figura 4.2 se muestra la posición de cada uno de ellos.

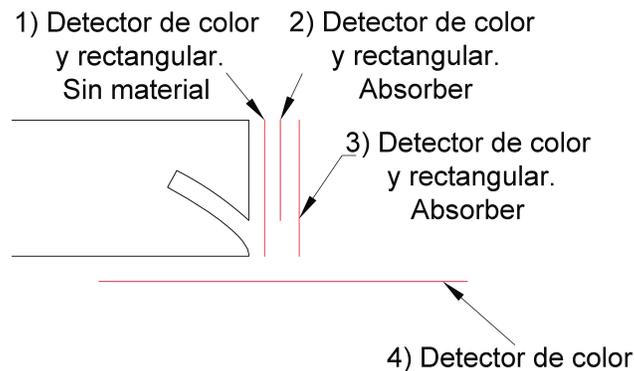


Figura 4.2: En la figura se muestra de manera conceptual la posición de los detectores que se utilizaron para la simulación.

Por simplicidad, en la Tabla 4.1 mostramos el tamaño en cm y pixeles de los detectores, que implica la resolución de la imagen que mostraremos de resultado, el material que nos indica si absorberá o dejará pasar la luz a un siguiente detector y lo mas importante, la función que es el objetivo con el cual se puso cada detector.

Tabla 4.1: Características de los detectores utilizados para la simulación.

Detector	Material	Tamaño (cm)	Pixeles	Posición	Función
Rectangular	Ninguno	2.54 x 2.54	100 x 100	1	Obtener la iluminancia total de la cara.
Color	Ninguno	2.54 x 2.54	100 x 100	1	Obtener datos del color real de toda la cara.
Rectangular	Ninguno	2.54 x 1.89	100 x 100	2	Obtener la iluminancia de la parte sólida de la cara.
Color	Absorber	2.54 x 1.89	100 x 100	2	Obtener datos del color real de la parte sólida de la cara. Detener el flujo.
Color	Absorber	2.54 x 2.54	100 x 100	3	Obtener datos del color real de la parte restante de la cara. Detener el flujo.
Color	Absorber	10.16 x 10.16	200 x 200	4	Obtener datos del color real de la luz extraída. Detener el flujo.

Esta fue la configuración para todas las simulaciones de aquí en adelante, solamente cambiamos el tubo de

luz, el corte en los tubos de luz fue el mismo para todos. En la siguiente sección veremos los resultados de las simulaciones para todos los tubos de luz.

En el caso del detector de color, también podemos obtener la distribución angular, que muestra una gráfica desde  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  tanto en el eje x como en el eje y. Esto quiere decir que si tenemos, por ejemplo, una gráfica en la cual sea una línea horizontal pasando por el eje x y con una coordenada 0 en el eje y, nuestros rayos de luz, se abrirán muy ampliamente en la dirección x, sin apertura en la dirección y, es decir, tendremos una amplia línea en el diagrama espacial. Con esto podremos determinar el tipo de apertura que tendremos, lo que buscamos para un caso de iluminación es una gráfica en el espacio angular lo mas uniforme posible, para que no existan patrones de iluminación que puedan afectar con el confort. Por ejemplo, si obtenemos en el diagrama angular un círculo, querrá decir que la salida de nuestra fuente es un cono con un ángulo de apertura dado por el diámetro del círculo.

## 4.2. Cilíndrico

Para el caso cilíndrico, vimos en el capítulo anterior que la mayor parte de la propagación se concentra en el núcleo del tubo de luz, por lo que esperábamos una distribución poco uniforme de la salida. A continuación mostramos los resultados de la simulación solamente con los detectores mencionados en un diagrama espacial y angular para el caso del detector de color.

En el caso del cilindro, en la Figura 4.3 vemos la luminancia total a la salida de la cara, es decir, los datos del detector (1) y el color real tomando en cuenta el corte transversal.

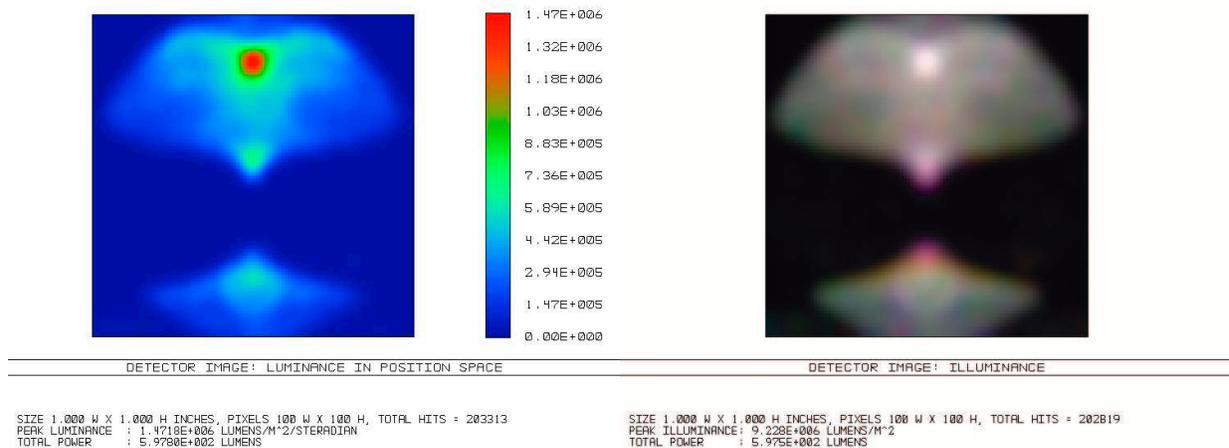


Figura 4.3: Como vemos en la imagen, obtenemos 597 lumen totales por la cara. En comparación de los 1320 lumen que obtenemos de un tubo de luz completo. Lo que significa que el resto es extraído o desviado.

El espacio angular también es de mucha importancia debido a que nos proporciona la manera en que se propagará la luz al salir del tubo, para este caso vemos en la Figura 4.4 como se propagará con poca uniformidad, inclusive hay una preferencia por ángulos pequeños, lo que quiere decir que no tiene un cono de apertura amplio, además de los ángulos grandes que se pueden ver y algunos nodos en la parte superior, lo que le da poca uniformidad en la salida.

En la Figura 4.6 vemos el espacio angular en el detector de posición (3). Como vemos, la propagación es poco uniforme, lo que quiere decir que se formarán puntos con mayor densidad de rayos lo que nos produciría una iluminación con dificultades para su control.

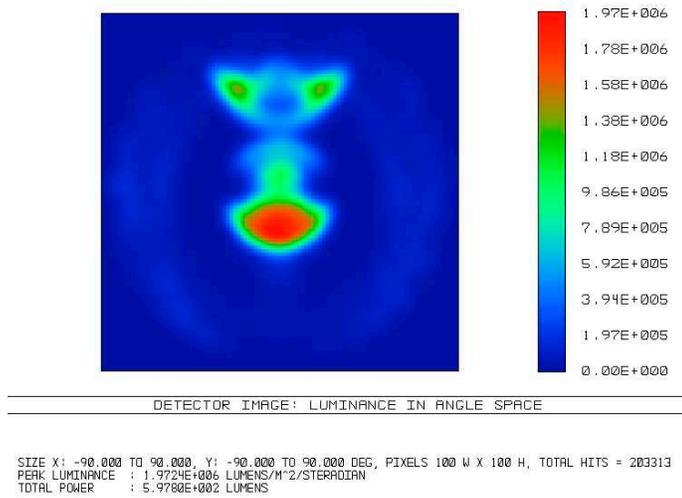


Figura 4.4: La propagación total de la cara al salir será poco uniforme.

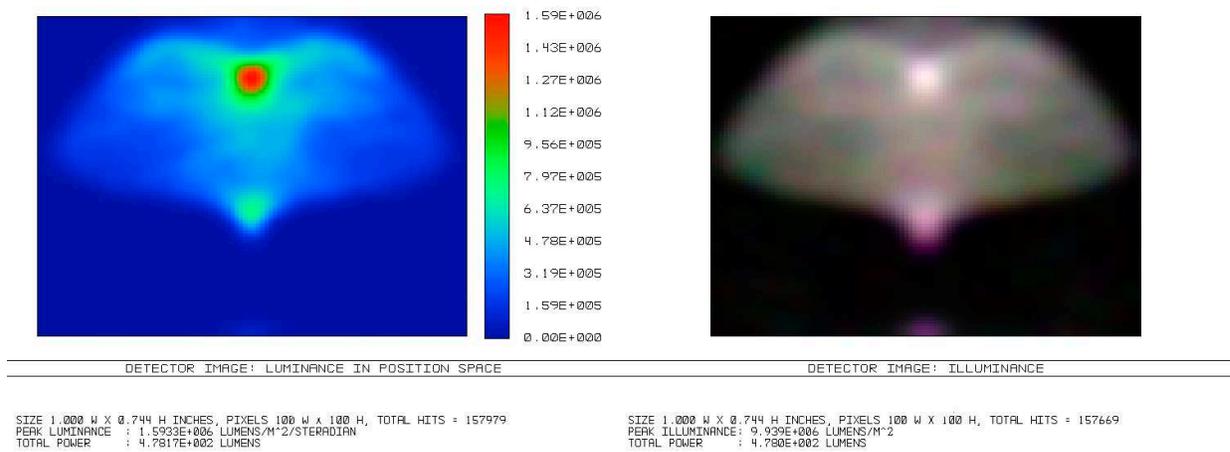


Figura 4.5: La mayor parte de los rayos que salen provienen de la parte continua del tubo de luz, en esta imagen vemos que son 478 lumen a comparación de los 597 lumen totales de la cara.

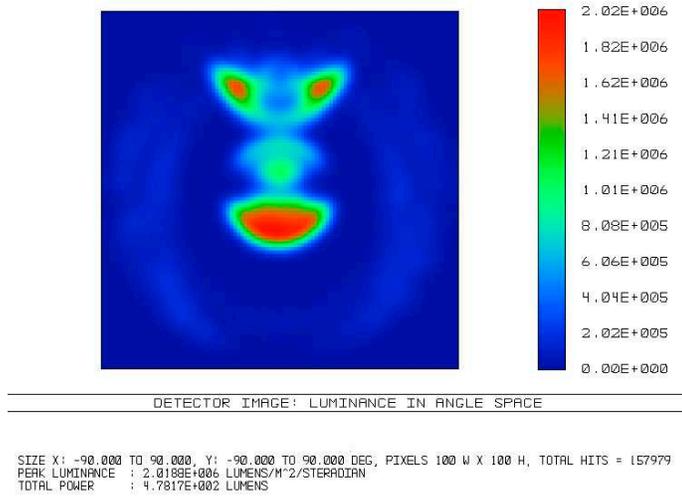


Figura 4.6: Como vemos, continúa siendo una propagación poco uniforme, con tendencia en el núcleo, lo cual se aleja del resultado deseado, ya que deseamos que la propagación continúe uniforme en la cara de salida.

Para finalizar, en la Figura 4.7 en el diagrama de posición angular vemos que tiene poca uniformidad lo que representa que la propagación de la luz extraída sea igualmente de poca uniformidad, lo que es de poca utilidad al menos en la iluminación de espacios interiores. Sin embargo, esta forma de propagación se podría utilizar con otros propósitos como en decoración. Lo que nos dice la figura es que tendrá una propagación en el eje z de nuestro sistema, lo que quiere decir que se alejará de la fuente pero creando un cono en esa dirección, además de tener rayos muy alejados en el eje x de nuestro sistema. Es quizá algo complicado de visualizar, por lo que agregamos en la Figura 4.8 una gráfica de la posición espacial para ver como se propagaría a una distancia de aproximadamente 50 cm. Por lo que vemos es de poca uniformidad por lo que no será de utilidad para cuestiones de iluminación.

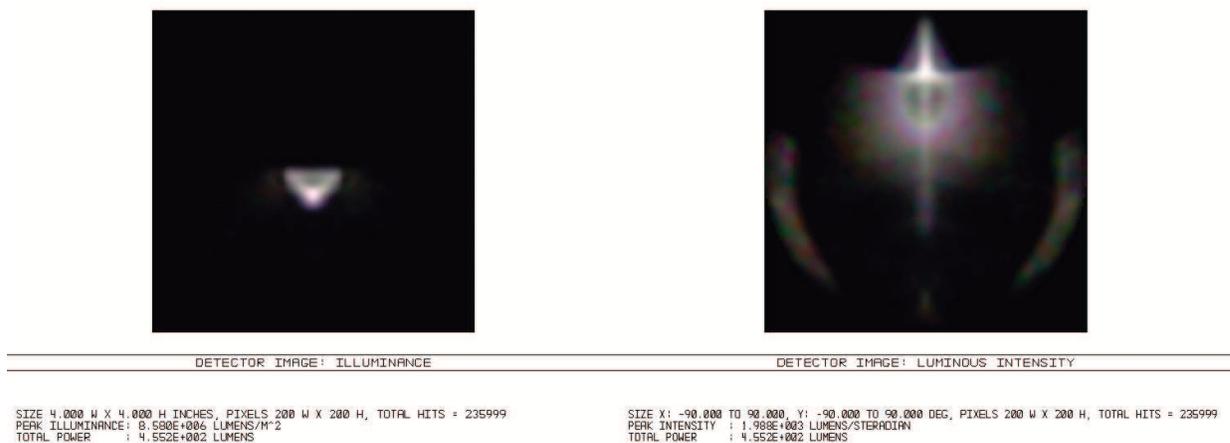


Figura 4.7: En la parte izquierda vemos la posición espacial de nuestro detector y como vemos extraemos 455 lumen.

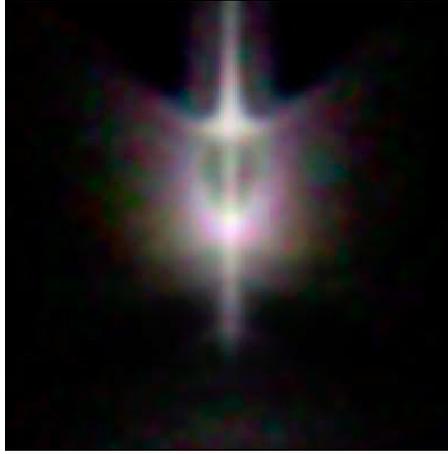


Figura 4.8: Como se propagará la extracción de luz a una distancia aproximada de 50 cm. Solo se hizo con el propósito de visualizar la propagación de la extracción. Esto no se presentará en los siguientes tubos de luz, debido a que carece de relevancia.

### 4.3. Mitad de círculo

En la parte del tubo de luz de mitad de círculo, tenemos una variación, la cual es debido a su asimetría, así que consideramos dos casos:

1. Corte iniciando en parte plana
2. Corte iniciando en parte curva

En la Figura 4.9 vemos esta variación de posición en el corte.

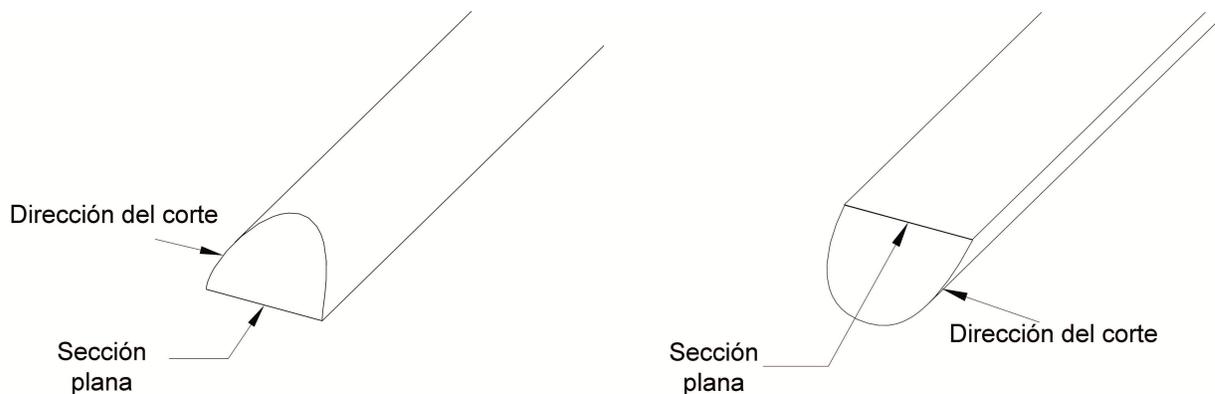


Figura 4.9: El corte elíptico iniciando a partir de la parte plana e iniciando en la parte curva es una variación que tenemos para este caso.

Esta sutil variación tiene como consecuencia una extracción de luz mayor o menor, debido a que, como vimos en el capítulo anterior, la mayor parte de la propagación de luz se concentra en el centro por lo cual también

tiene un cambio en su extracción. A continuación veremos los resultados obtenidos en la simulación para estos casos.

### 4.3.1. Corte iniciado en plano

Para este cilindro, la mayor parte de la luz se propaga por el centro y el corte es hecho a partir del centro, lo que quiere decir que, como vimos en el capítulo anterior, la luz se propaga por la cara plana lateral, por lo que esperamos que la luz extraída sea mayor en este caso.

En la Figura 4.10 vemos que los lumen extraídos por la cara frontal, es decir, el detector (1), son inferiores al caso anterior, esto ya se esperaba debido a que existe un problema en el acoplamiento del cilindro con la fibra diseñada, debido a una diferencia en los tamaños, esto ya lo habíamos discutido anteriormente. Además vemos poca uniformidad en la propagación.

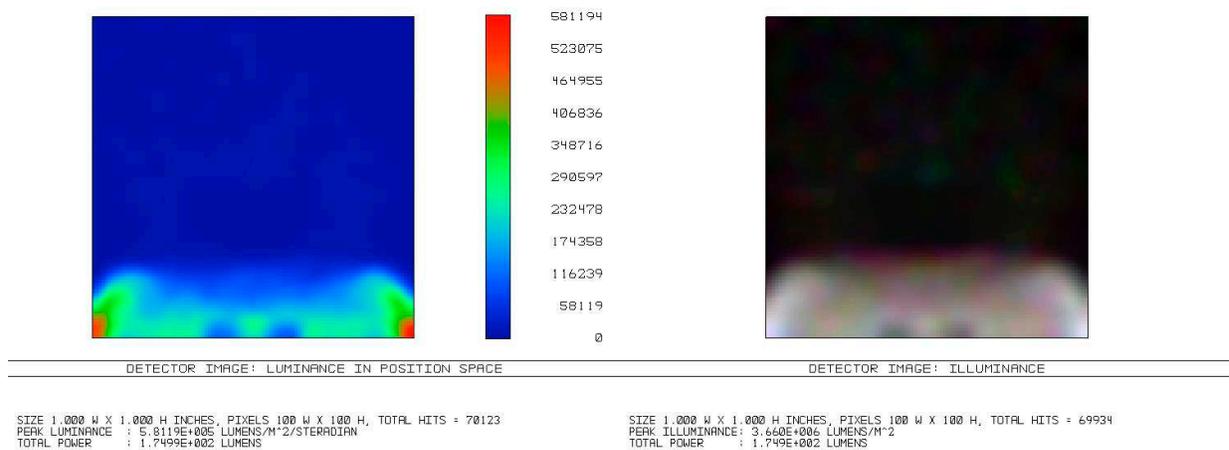


Figura 4.10: Como vemos en la imagen, extraemos 174 lumen totales por la cara. Esto debido a un problema de acoplamiento entre la fibra y el tamaño de este cilindro el cual ya habíamos discutido anteriormente.

Para ver como se propaga después de la cara, en la Figura 4.11 que representa el detector (1) vemos el espacio angular del detector, lo que nos determina las direcciones de propagación y como vemos, será muy uniforme debido a que se concentra en su mayoría en el centro.

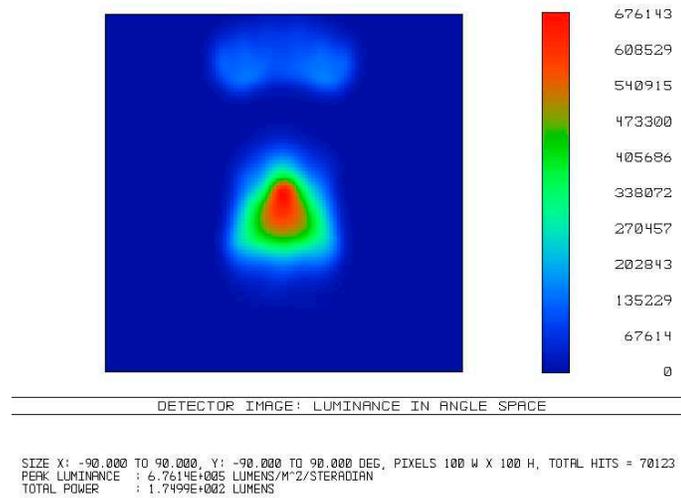


Figura 4.11: La propagación total de la cara al salir será muy uniforme.

A diferencia de los anteriores aquí no tiene sentido colocar un detector en la posición (2) por lo que omitiremos esa parte, sin embargo la parte de extracción lateral la mostramos en la Figura 4.12 y como podemos ver en el espacio angular tiene una distribución muy uniforme, lo que lo hace un candidato para iluminación de interiores debido a que podemos controlar la salida, sin embargo, debido a su tamaño se tendría que redimensionar y acoplar correctamente a la fibra, lo cual es un poco difícil debido a su geometría.

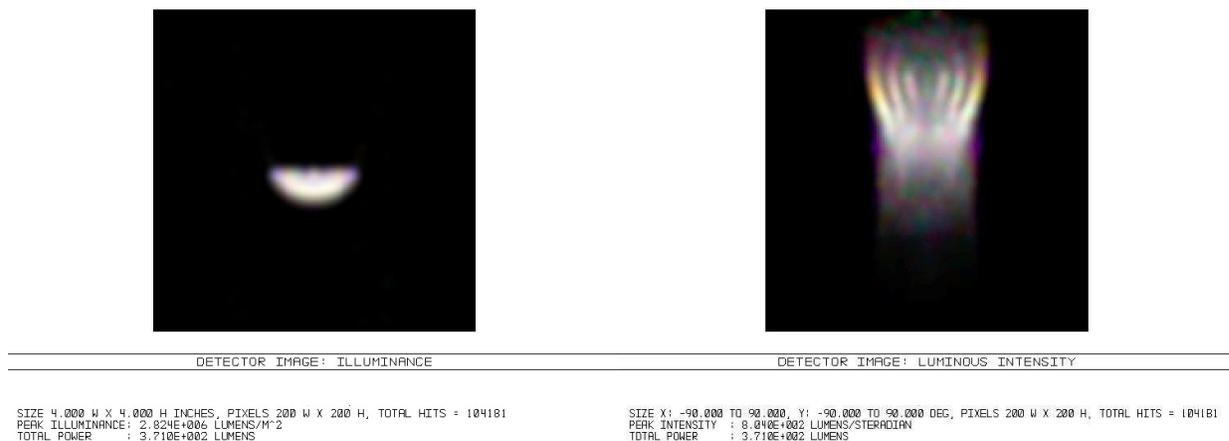


Figura 4.12: Espacio de posición y angular para un tubo de luz de medio círculo. Como vemos es capaz de extraer 371 lumen de una manera muy direccional.

A continuación veremos el siguiente caso en el cual el corte está hecho de forma invertida. Esto es de mucha utilidad si se busca realizar un prototipo de este modelo.

### 4.3.2. Corte iniciado en curva

En esta sección mostramos un esquema similar al caso anterior.

En la Figura 4.13 se muestra la luminancia situada en (1) en el espacio de posición tanto del detector rectangular como del de color, mostrando el color real.

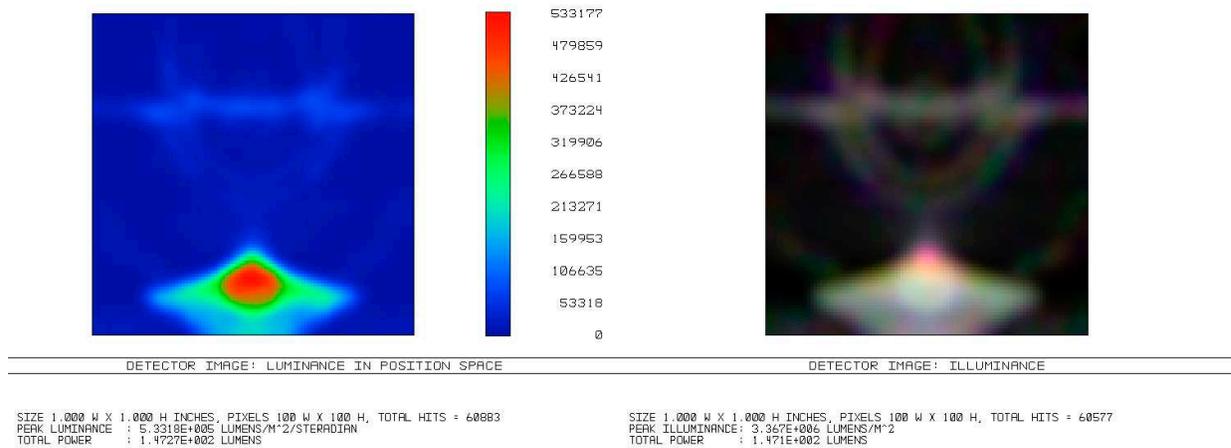


Figura 4.13: Como vemos en la imagen extraemos 147 lumen totales por la cara. Esto es un caso similar al anterior.

Como esta información no es suficiente, en la Figura 4.14 vemos el espacio angular del detector (1), lo que nos determina, igual que en casos anteriores, la manera de propagación de la luz al salir de la cara frontal.

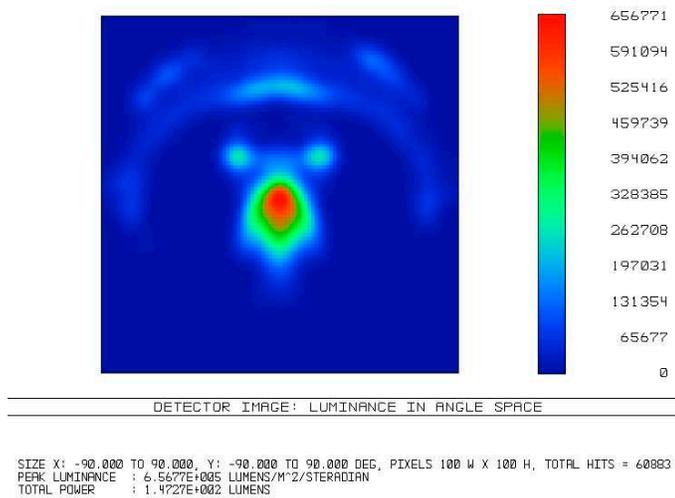


Figura 4.14: La propagación total de la cara al salir será menos uniforme que en el caso anterior.

Al igual que el caso anterior, no tiene sentido colocar un detector en la posición (2) por lo que también se omitirá.

En la Figura 4.15 vemos el detector (4) de color en el espacio de posición y angular. Como podemos ver el espacio angular no tiene una distribución uniforme en toda la cara, por lo que la propagación también será poco uniforme, lo cual convierte a este tubo de luz en poco eficiente para propósitos de iluminación de interiores.

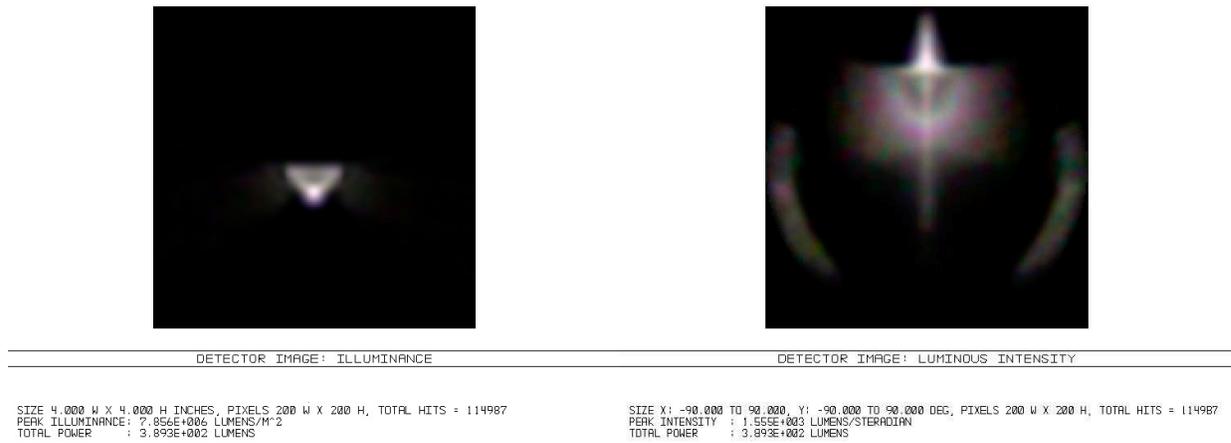


Figura 4.15: Espacio de posición y angular para un tubo de luz de medio circulo. Como vemos es capaz de extraer 389 lumen de manera poco direccional.

### 4.4. Cuadrado

En el caso del cilindro rectangular, vimos en el capítulo 3 que su propagación en la sección transversal es muy uniforme. En la Figura 4.16 vemos la luminancia total a la salida de la cara, y el color real tomando en cuenta el corte transversal del detector (1).

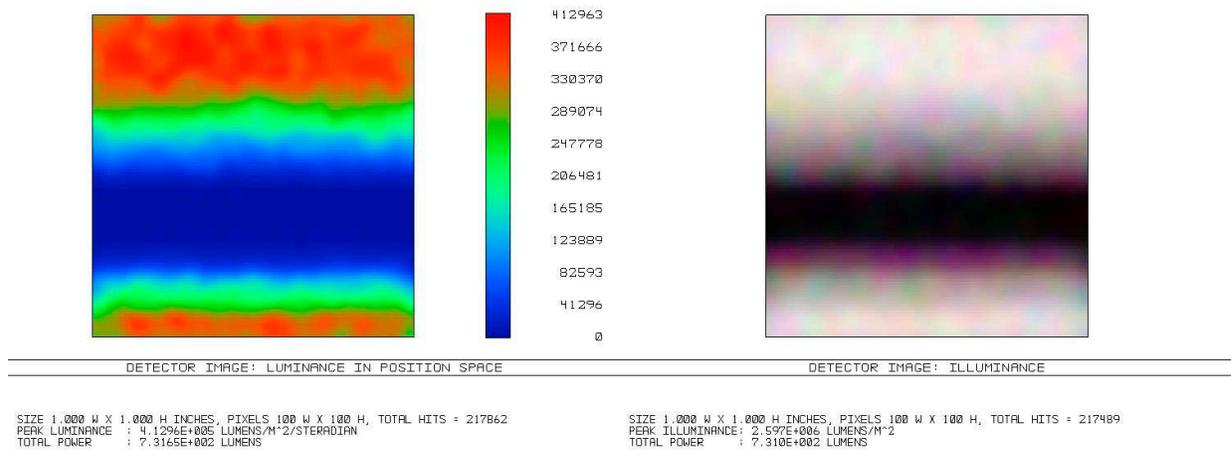


Figura 4.16: Como vemos en la imagen, salen 731 lumen totales por la cara. En comparación de los 1321 lumen que obtenemos de un tubo de luz completo.

El espacio angular también es de mucha importancia debido a que nos dice la manera en que se propagará al salir del tubo de luz, en la Figura 4.17 vemos salida total en el espacio angular.

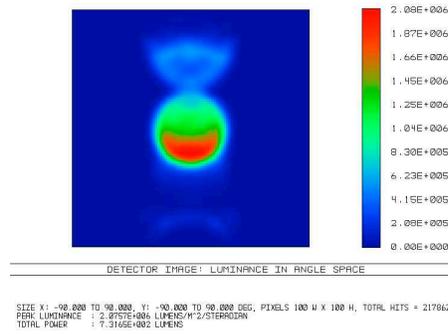


Figura 4.17: La propagación total de la cara tendrá una mayor densidad en el eje -y, lo que significa que se dirigirá en esa dirección.

La Figura 4.17 nos dice que la luz no se propagará uniformemente, si no que existe un cono de luz a la salida, como lo conocemos, pero que existe una mayor densidad en la parte superior del detector, esto debido a que en el corte transversal que hacemos existe una cantidad de rayos que no son colectados, estos rayos son propagados y eso produce un cambio de densidad en el patrón de salida.

En la Figura 4.18 vemos la luminancia y el color de la parte del detector (2).

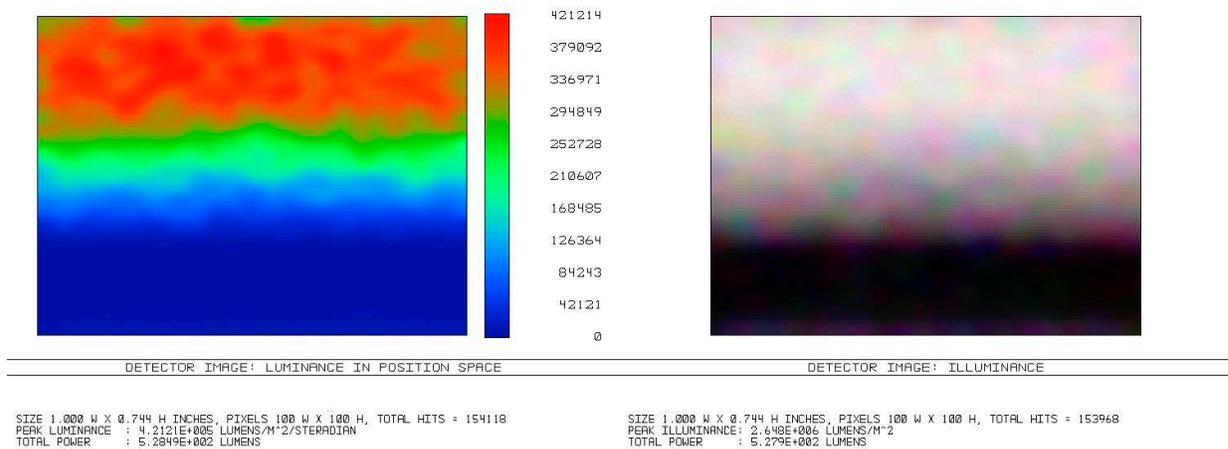


Figura 4.18: La mayor parte de los rayos que salen provienen de la parte continua del tubo de luz, en esta imagen vemos que son 528 lumen a comparación de los 731 que son los totales de la cara con corte.

Vemos que la propagación continúa uniforme, lo cual es de mucha ayuda ya que si el tubo de luz continuara, se propagaría muy uniforme con respecto a una sección transversal. En la Figura 4.19 vemos el espacio angular de esta figura para ayudarnos a ver como sería su propagación.

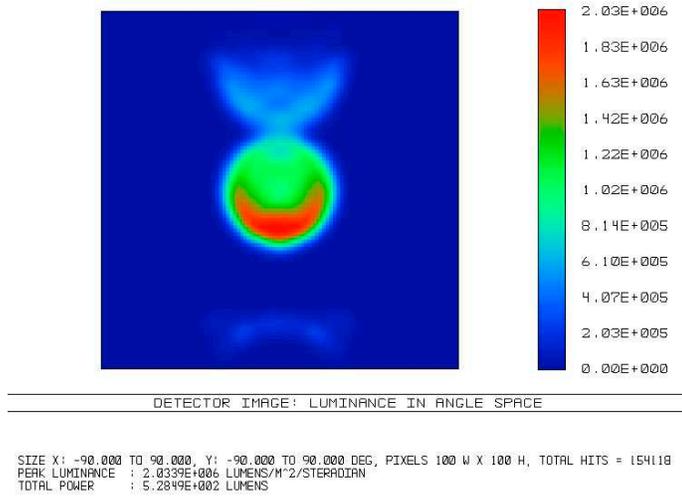


Figura 4.19: Como vemos la mayor parte de la propagación la determina la parte frontal que es continua, posición (2) de los detectores. Se puede ver en la imagen que pierde densidad en la parte de inferior.

Como vemos es una imagen muy parecida a la Figura 4.17.

Finalmente vemos en la Figura 4.20 la propagación de la luz extraída por nuestro corte transversal, es decir, el detector (4).

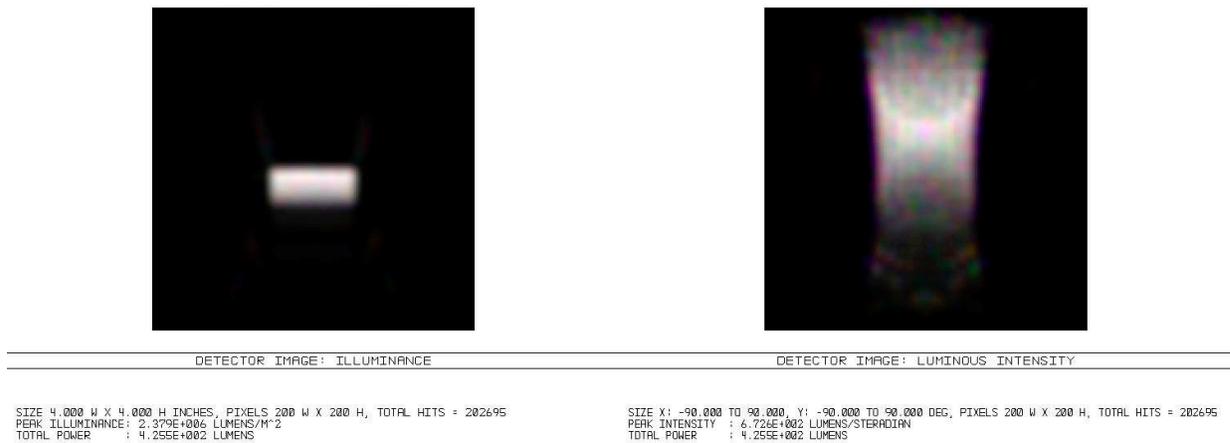


Figura 4.20: En la parte izquierda vemos la posición espacial de nuestro detector, y como vemos extraemos 425 lumen. En la parte derecha obtenemos la posición angular de la propagación lo que nos indica una buena direccionalidad.

Vemos en la imagen del espacio de posición que se propaga muy uniformemente y es de color blanco correspondiente a la fuente  $D_{65}$  y en el espacio angular vemos al igual que es muy uniforme, casi un rectángulo, lo que nos dice que se propagará muy poco en el eje  $x$  y ampliamente en el eje  $y$  del detector, que sería el eje  $z$  de nuestro sistema, referirse a la Figura 3.1. En la Figura 4.21 mostramos una gráfica de la fila y columna centrales de la posición angular, las cuales nos dicen aproximadamente como será la propagación de la extracción.

Lo que nos quiere decir la Figura 4.21 es que, al menos en la parte central, la propagación tendrá un ángulo del semicono de  $35^\circ$  sobre el eje  $x$  de nuestro sistema y una dirección preferencial sobre el eje  $z$  positivo, y

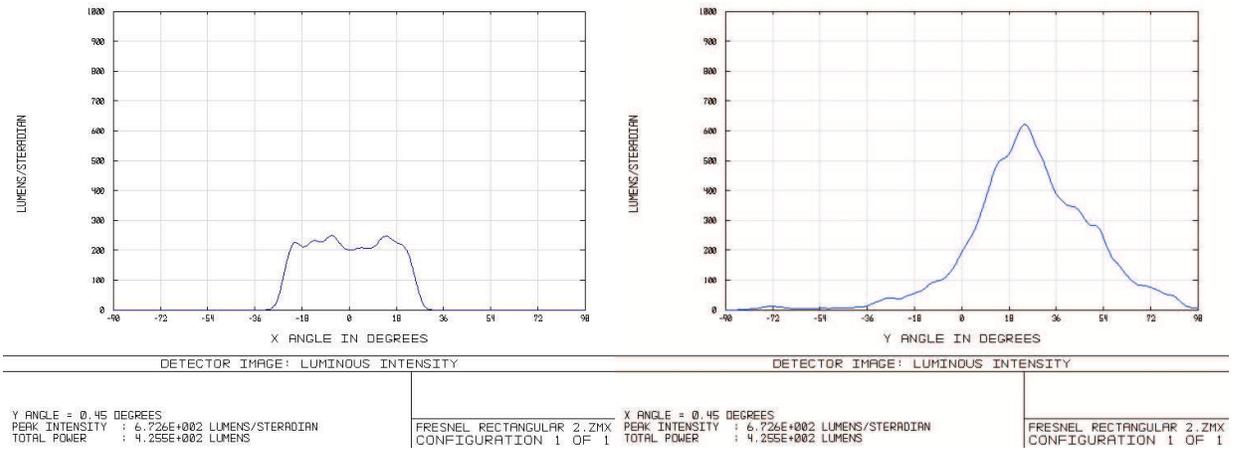


Figura 4.21: Mostramos que la posición angular es muy uniforme lo que significa que la propagación en el espacio tendrá una direccionalidad muy definida.

como vemos en el espacio angular, se propagará de una manera muy uniforme en comparación con otras geometrías. Esto lo hace ideal para la iluminación.

### 4.5. Hexagonal

Finalmente el caso del tubo de luz hexagonal, el cual obtuvo una de las salidas uniformes junto con el rectangular en la sección transversal a la salida de su cara y a lo largo de toda su propagación como se muestra en Apéndice C lo cual lo hace un caso muy interesante de abordar. A continuación mostramos los resultados para el caso de detector (1) rectangular y de color en el espacio de posición.

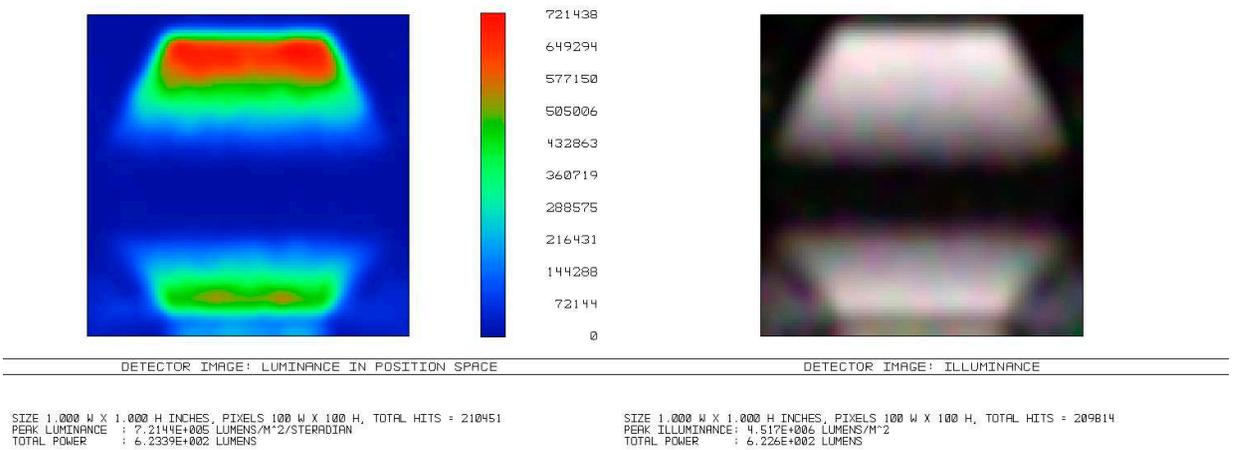


Figura 4.22: Como vemos en la imagen, extraemos 623 lumen totales por la cara frontal. En comparación de los 1320 lumen que obtenemos de un tubo de luz completo. El resto se extrae o se desvía.

Como vemos en la Figura 4.22 la cantidad de lumen extraídos es superior al caso de un cilindro, por lo que lo convierte en un mejor candidato, a continuación en la Figura 4.23 vemos la propagación angular en la cara frontal del dispersor de luz. Como vemos es muy similar al caso de un cilindro cuadrado sin embargo presenta una densidades externas, lo que provoca poca uniformidad en la salida frontal.

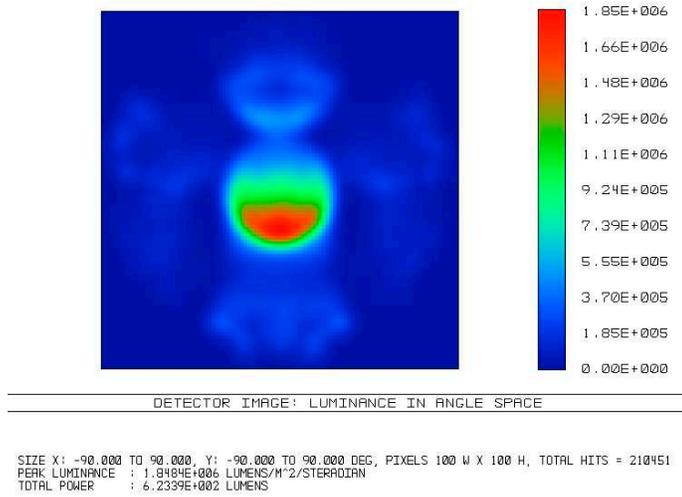


Figura 4.23: La propagación total de la cara al salir es muy similar al caso de un cilindro cuadrado, sin embargo es de menor uniformidad.

Para comparar con el detector (2), es decir la parte frontal que permanece continua, mostramos en la Figura 4.24 los resultados.

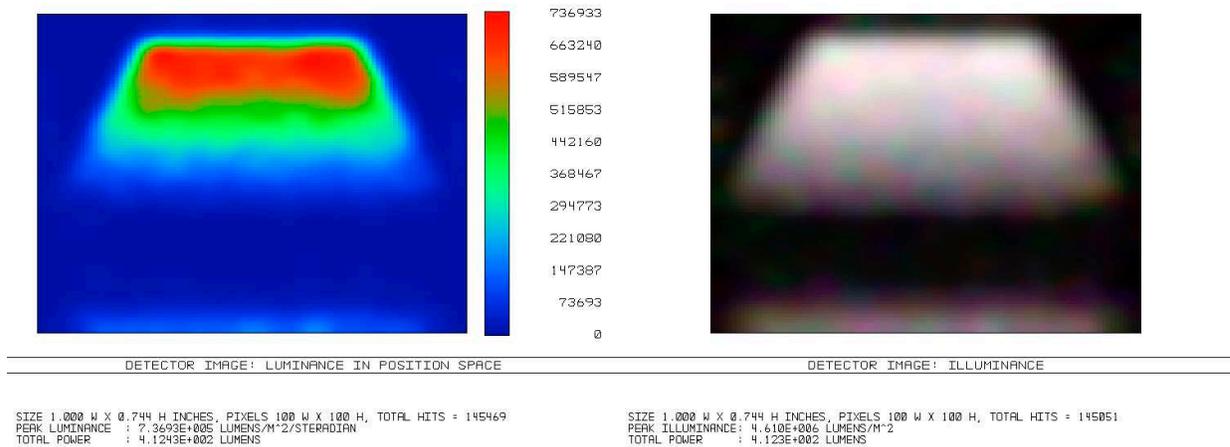


Figura 4.24: La mayor parte de los rayos que salen provienen de la parte continua del tubo de luz, en esta imagen vemos que son 412 lumen a comparación de los 623 lumen totales de la cara. El resto proviene de luz no colectada por el corte.

Además, como en los casos anteriores, veremos en la Figura 4.25 la distribución angular del detector (2).

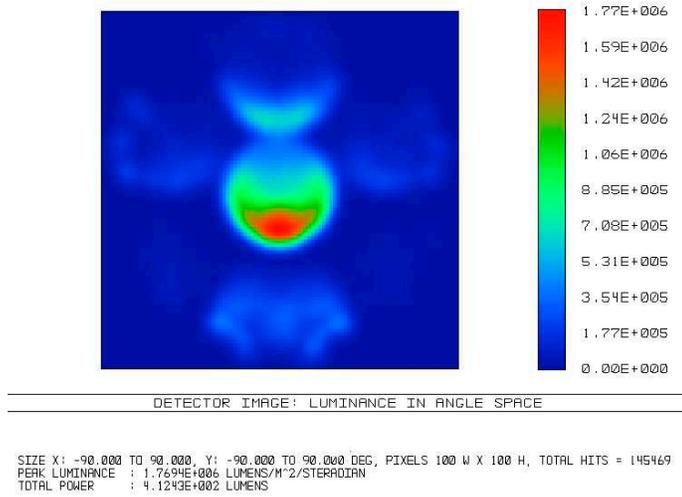


Figura 4.25: Como vemos, es una distribución muy uniforme, la cual se podría seguir propagando en el interior del tubo si agregamos otra sección. Aquí se muestra como la cara es de cierta uniformidad.

Ahora veremos el espacio de posición y el angular de la extracción del tubo de luz, es decir del detector (4). Como vemos en la Figura 4.26 la extracción es muy similar al cilindro rectangular, sin embargo existe cierta densidad que hace que la propagación al salir sea irregular. Esto hace que sea un buen candidato bajo ciertas restricciones de iluminación.

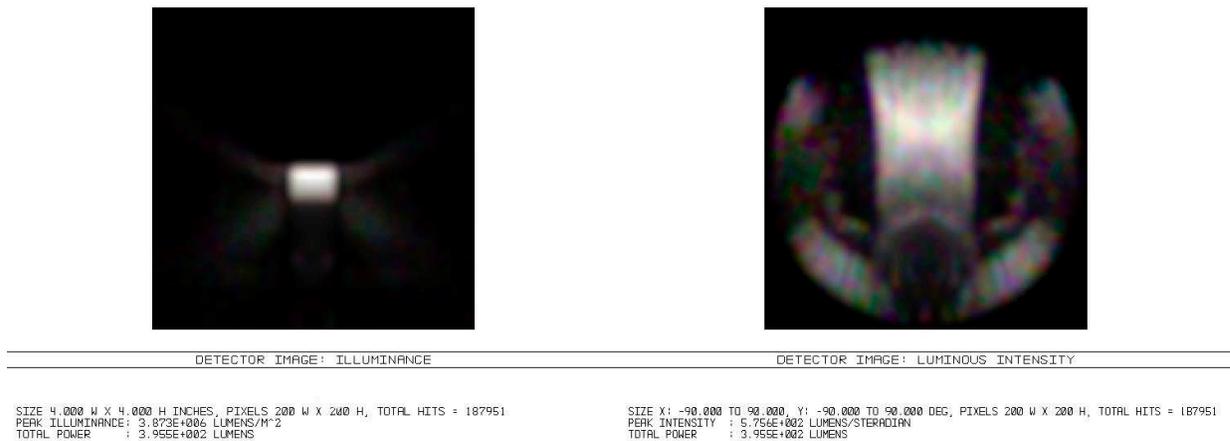


Figura 4.26: En la parte izquierda vemos el espacio de posición de nuestro detector y como se puede ver, extraemos 395 lumen.

Con esto terminamos la sección de la simulación, para mas referencia de las macros utilizadas en el programa para automatizar procesos referirse al Apéndice B en donde se muestra el código utilizado.

En el siguiente capítulo se formularán las conclusiones acerca de las simulaciones y se explicará el trabajo a futuro y se discutirá del uso de la información aquí presentada.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Una vez realizado y presentado todo el trabajo de simulación, así como detallar completamente el problema y el software utilizado, es pertinente dedicar una sección para resumir y catalogar todo el trabajo realizado. En este último capítulo se presentan las conclusiones derivadas del trabajo de investigación, a su vez son presentadas las contribuciones que se aportaron a la comunidad científica y se presenta un sección con trabajo futuro para facilitar nuevos estudios que no fueron tomados en cuenta en esta tesis.

### 5.1. Conclusiones

En esta tesis se presentó una problemática, la cual fue la inadaptabilidad de la creciente tecnología en fuentes de iluminación a luminarias o dispositivos dispersores de luz. Se presentó como hipótesis la posibilidad de extraer la luz mediante la utilización de un tubo de acrílico mediante una técnica distinta a las conocidas, que son mediante dispersión. Para poder llevar a cabo la investigación se propuso un corte transversal de la superficie basada en colectores elípticos compuestos para poder extraer la luz de estos tubos de acrílico. También se presentó la formulación de estos colectores y a partir de ahí se pusieron condiciones para poder desviar la luz y ser extraída del tubo. A su vez, se presentaron diversas geometrías para tubos de luz y se estudiaron para poder conocer la propagación de la luz dentro de ellos para poder obtener un mejor control sobre su extracción, ya que el objetivo, además de extraerla, es hacerlo de manera uniforme para poder utilizarla como medio de iluminación de interiores.

Como vimos en el capítulo 3, estudiamos la propagación en algunos tubos de luz con diversas geometrías y el cilindro con forma rectangular y hexagonal presentaron una propagación uniforme a lo largo de su sección transversal por lo cual fueron los mejores candidatos para extracción de luz. También analizamos la geometría del corte transversal para poder realizar una extracción eficiente, pudiendo extraer solamente una porción de la cara con nuestro diseño, el cual fue basado en colectores elípticos compuestos.

Finalmente en el capítulo 4 realizamos las simulaciones de todos los tubos de luz con cortes elípticos para extracción de luz. En esta sección vimos diversos patrones en el espacio de posiciones de los cuales el mejor candidato para iluminación de interiores fue el tubo rectangular, el que mostró una mayor uniformidad tanto en el espacio de posición como en el angular, lo cual cumple con el objetivo de la tesis, obtener un dispersor de luz con iluminación controlada y uniforme.

Aunque los demás tubos de luz no son recomendables para iluminación de interiores con propósitos de iluminar sitios donde la iluminación sea muy controlada, también pueden utilizarse con otros propósitos.

## 5.2. Contribuciones

Las contribuciones relevantes de este trabajo se enlistan a continuación:

- Se obtuvieron datos en tubos de luz de diferentes geometrías.
- Se generó una metodología para poder diseñar superficies elípticas para la extracción de luz en tubos de luz.
- Se generó información acerca de los tubos de luz con cortes transversales para propósitos de iluminación
- Se estudió un problema de iluminación obteniendo resultados teóricos.
- Se obtuvo información teórica para favorecer el desarrollo de tecnologías.
- Se obtuvo un candidato para extraer luz de un tubo de luz para su futura implementación experimental.
- Se aportó a la comunidad científica información acerca del uso del colector elíptico compuesto dentro de materiales dieléctricos.
- Se utilizaron principios de óptica anidólica para la obtención de sistemas de iluminación.
- Aportación en la óptica anidólica en México.

Por último, en México la óptica anidólica es una rama de poco desarrollo por lo cual se contribuye con un aporte de conocimiento para impulsar a la pequeña comunidad mexicana que se dedica al desarrollo de este tema, el cual es de gran interés a nivel internacional.

Además, estas contribuciones dejan en claro que existe un trabajo a futuro muy fructífero, que es la realización experimental de los tubos de luz para empatar la teoría y la práctica.

## 5.3. Recomendaciones y trabajo futuro

Por ser un trabajo teórico, se tiene mucho trabajo a futuro, el cual resultará en la realización experimental de los dispersores de luz, pero además se tienen muchas recomendaciones que se mencionarán a continuación.

El primer trabajo a futuro evidente es el desarrollo experimental de los tubos de luz con un corte preciso el cual puede ser realizado mediante el uso de maquinaria, derivado de esto también se pueden realizar simulaciones y diseños con otro tipo de fuentes, las cuales pueden ser LED, de esta manera se sustituye la fibra óptica y se tiene un mejor control de la iluminación al ser constante.

También se pueden encontrar usos para los demás tubos de luz, como por ejemplo para decoración, en algunos lugares como hoteles y sitios recreativos se ilumina las paredes con un propósito de ambientación, entonces es posible que mediante otro tubo de luz se cumpla este propósito.

Actualmente los dispersores de luz son de alto costo, debido al material de precisión que representa su construcción, sin embargo, un tubo de luz con un corte para dispersión es una manera económica que se puede acoplar con otras tecnologías de fuentes direccionales lo cual hace que este trabajo tenga una gama de posibilidades en el futuro.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] LED&SPA, S.L, <http://www.farolasdeled.com/>.
- [2] Parans website <http://www.parans.com/esp/>.
- [3] <http://cie.co.at>, 2006.
- [4] *Design and optimization of dot pattern in illumination lightpipe of natural light guiding system*, volume 7429, 2009.
- [5] <http://betterphotographytutorials.com/2011/08/01/light-and-colors-August-2011>.
- [6] <http://www.lasercomponents.com/uk/product/fiber-bundles/>, 2013.
- [7] <http://dictionary.reference.com/browse/radiometer>, 2013.
- [8] A. Beiser. *Concepts of Modern Physics*. McGraw-Hill higher education. McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [9] R.W. Boyd. *Radiometry and the detection of optical radiation*. Wiley series in pure and applied optics. Wiley, 1983.
- [10] N.R. Carlson. *Fundamentos de Psicología*. Prentice-Hall, 1996.
- [11] J. Chaves. *Introduction to Nonimaging Optics*. Optical Science and Engineering. Taylor & Francis, 2008.
- [12] General Electric Lightning Company. Spectral power distribution curves. web, Mayo 2009. Spectral Power Distribution Curves.
- [13] Aleksandra Cvetkovic. *Free-form optical systems for nonimaging applications= Sistemas ópticos anamórficos con aplicaciones anidólicas*. PhD thesis, Telecomunicacion, 2009.
- [14] L. Edwards, P.A. Torcellini, and National Renewable Energy Laboratory (U.S.). *A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants*. National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [15] B.G. Grant. *Field Guide to Radiometry*. Field Guide Series. SPIE, 2011.
- [16] E. Hecht. *Óptica*. Addison-Wesley Iberoamericana Espana, S.A., 3a edition, 2000.
- [17] R. W. G. Hunt. *The Reproduction of Colour*. The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology. Wiley, 2005.

- [18] C. Hunter, O. Howlett, United States Department of Energy, New York State Energy Research & Development Authority, California Energy Commission, Connecticut Light & Power Company, Iowa Energy Center, North Carolina Daylight Consortium, and Northwest Energy Efficiency Alliance. *The Benefits of Daylight Through Windows*. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2003.
- [19] DEANE B. JUDD. The 1931 i. c. i. standard observer and coordinate system for colorimetry. *J. Opt. Soc. Am.*, 23(10):359–373, Oct 1933.
- [20] David Lingfors and Tarja Volotinen. Illumination performance and energy saving of a solar fiber optic lightingsystem. *Opt. Express*, 21(S4):A642–A655, Jul 2013.
- [21] Evan Mills. Why we're here: the \$230 billion global lighting energy bill. In *Proceedings from the 5th European Conference on Energy Efficient Lighting, held in Nice, France*, pages 29–31, 2002.
- [22] N. Ohta and A. Robertson. *Colorimetry: Fundamentals and Applications*. The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology. Wiley, 2006.
- [23] Noboru Ohta and Gunter Wyszecki. Theoretical chromaticity-mismatch limits of metamers due to a change from cie illuminant d65 to c. *J. Opt. Soc. Am.*, 65(10):1152–1153, Oct 1975.
- [24] International Commission on Illumination. *Colorimetry: technical report*. CIE technical report. Commission internationale de l'Eclairage, CIE Central Bureau, 2004.
- [25] J M Palmer. Getting intense on intensity. *Metrologia*, 30(4):371, 1993.
- [26] J.M. Palmer and B.G. Grant. *The Art of Radiometry*. SPIE Press Monograph. SPIE Press, 2010.
- [27] Proceedings of ISEC 2003. *Performance of new hybrid solar lighting luminaire design*. International Solar Energy Conference, March 2003.
- [28] M.S. Rea and Illuminating Engineering Society of North America. *The Iesna Lighting Handbook: Reference & Application*. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA/LIGHTING HANDBOOK. Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- [29] Harald Ries and Ari Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics. *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(10):2627–2632, Oct 1994.
- [30] Samsung LED CO., LTD. *Specification 5630 CRI80 White LED R0 Rank Samsung LED CO., LTD.*, Abril 2011.
- [31] J. Schanda. *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007.
- [32] Christopher G Werring. Design and application of fiber optic daylighting systems. Master's thesis, Kansas State University, 2009.
- [33] Wiedamark. <http://www.wiedamark.com/>.
- [34] William L. Wolfe. Proclivity for emissivity. *Appl. Opt.*, 21(1):1–1, Jan 1982.
- [35] W.L. Wolfe. *Introduction to Radiometry*. SPIE tutorial texts. SPIE Optical Engineering Press, 1998.
- [36] Nikolay Zheludev. The life and times of the led - a 100-year history. *Nature Photonics*, 1(4):189–192, April 2007.

# Apéndice A

## Tablas Anexas

Tabla A.1: Distribución espectral de la visión fotópica y escotópica.

Longitud de onda (nm)	Visión Fotópica $V(\lambda)$	Visión Escotópica $V'(\lambda)$
380	0.0002	0.000589
390	0.0008	0.002209
400	0.0028	0.00929
410	0.0074	0.03484
420	0.0175	0.0966
430	0.0273	0.1998
440	0.0379	0.3281
450	0.0468	0.455
460	0.06	0.567
470	0.09098	0.676
480	0.13902	0.793
490	0.20802	0.904
500	0.323	0.982
510	0.503	0.997
520	0.71	0.935
530	0.862	0.811
540	0.954	0.65
550	0.99495	0.481
560	0.995	0.3288
570	0.952	0.2076
580	0.87	0.1212
590	0.757	0.0655
600	0.631	0.03315
610	0.503	0.01593
620	0.381	0.00737
630	0.265	0.003335
640	0.175	0.001497
650	0.107	0.000677

Longitud de onda (nm)	Visión Fotópica $V(\lambda)$	Visión Escotópica $V'(\lambda)$
660	0.061	0.0003129
670	0.032	0.000148
680	0.017	0.0000715
690	0.00821	3.533E-05
700	0.004102	0.0000178
710	0.002091	9.14E-06
720	0.001047	4.78E-06
730	0.00052	2.546E-06
740	0.0002492	1.379E-06
750	0.00012	7.6E-07
760	0.00006	4.25E-07
770	0.00003	2.41E-07
780	1.499E-05	1.39E-07

Tabla A.2: Funciones de igualación de color imaginarias.

$\lambda$ (nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0,001368	0,000039	0,006450
385	0,002236	0,000064	0,010550
390	0,004243	0,000120	0,020050
395	0,007650	0,000217	0,036210
400	0,014310	0,000396	0,067850
405	0,023190	0,000640	0,110200
410	0,043510	0,001210	0,207400
415	0,077630	0,002180	0,371300
420	0,134380	0,004000	0,645600
425	0,214770	0,007300	1,039050
430	0,283900	0,011600	1,385600
435	0,328500	0,016840	1,622960
440	0,348280	0,023000	1,747060
445	0,348060	0,029800	1,782600
450	0,336200	0,038000	1,772110
455	0,318700	0,048000	1,744100
460	0,290800	0,060000	1,669200
465	0,251100	0,073900	1,528100
470	0,195360	0,090980	1,287640
475	0,142100	0,112600	1,041900
480	0,095640	0,139020	0,812950
485	0,057950	0,169300	0,616200
490	0,032010	0,208020	0,465180
495	0,014700	0,258600	0,353300
500	0,004900	0,323000	0,272000
505	0,002400	0,407300	0,212300

$\lambda$ (nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
510	0,009300	0,503000	0,158200
515	0,029100	0,608200	0,111700
520	0,063270	0,710000	0,078250
525	0,109600	0,793200	0,057250
530	0,165500	0,862000	0,042160
535	0,225750	0,914850	0,029840
540	0,290400	0,954000	0,020300
545	0,359700	0,980	0,013400
550	0,433450	0,994950	0,008750
555	0,512050	1,000000	0,005750
560	0,594500	0,995000	0,003900
565	0,678400	0,978600	0,002750
570	0,762100	0,952000	0,002100
575	0,842500	0,915400	0,001800
580	0,916300	0,870000	0,001650
585	0,978600	0,816300	0,001400
590	1,026300	0,757000	0,001100
595	1,056700	0,694900	0,001000
600	1,062200	0,631000	0,000800
605	1,045600	0,566800	0,000600
610	1,002600	0,503000	0,000340
615	0,938400	0,441200	0,000240
620	0,854450	0,381000	0,000190
625	0,751400	0,321000	0,000100
630	0,642400	0,265000	0,000050
635	0,541900	0,217000	0,000030
640	0,447900	0,175000	0,000020
645	0,360800	0,138200	0,000010
650	0,283500	0,107000	0,000000
655	0,218700	0,081600	0,000000
660	0,164900	0,061000	0,000000
665	0,121200	0,044580	0,000000
670	0,087400	0,032000	0,000000
675	0,063600	0,023200	0,000000
680	0,046770	0,017000	0,000000
685	0,032900	0,011920	0,000000
690	0,022700	0,008210	0,000000
695	0,015840	0,005723	0,000000
700	0,011359	0,004102	0,000000
705	0,008111	0,002929	0,000000
710	0,005790	0,002091	0,000000
715	0,004109	0,001484	0,000000
720	0,002899	0,001047	0,000000
725	0,002049	0,000740	0,000000

$\lambda$ (nm)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
730	0,001440	0,000520	0,000000
735	0,001000	0,000361	0,000000
740	0,000690	0,000249	0,000000
745	0,000476	0,000172	0,000000
750	0,000332	0,000120	0,000000
755	0,000235	0,000085	0,000000
760	0,000166	0,000060	0,000000
765	0,000117	0,000042	0,000000
770	0,000083	0,000030	0,000000
775	0,000059	0,000021	0,000000
780	0,000042	0,000015	0,000000

Tabla A.3: Valores de la potencia relativa para una fuente tipo  $D_{65}$

$\lambda$ (nm)	Potencia Relativa
300	0.0341
305	1.6643
310	3.2945
315	11.7652
320	20.236
325	28.6447
330	37.0535
335	38.5011
340	39.9488
345	42.4302
350	44.9117
355	45.775
360	46.6383
365	49.3637
370	52.0891
375	51.0323
380	49.9755
385	52.3118
390	54.6482
395	68.7015
400	82.7549
405	87.1204
410	91.486
415	92.4589
420	93.4318
425	90.057

$\lambda$ (nm)	Potencia Relativa
430	86.6823
435	95.7736
440	104.865
445	110.936
450	117.008
455	117.41
460	117.812
465	116.336
470	114.861
475	115.392
480	115.923
485	112.367
490	108.811
495	109.082
500	109.354
505	108.578
510	107.802
515	106.296
520	104.79
525	106.239
530	107.689
535	106.047
540	104.405
545	104.225
550	104.046
555	102.023
560	100
565	98.1671
570	96.3342
575	96.0611
580	95.788
585	92.2368
590	88.6856
595	89.3459
600	90.0062
605	89.8026
610	89.5991
615	88.6489
620	87.6987
625	85.4936
630	83.2886
635	83.4939
640	83.6992
645	81.863

$\lambda$ (nm)	Potencia Relativa
650	80.0268
655	80.1207
660	80.2146
665	81.2462
670	82.2778
675	80.281
680	78.2842
685	74.0027
690	69.7213
695	70.6652
700	71.6091
705	72.979
710	74.349
715	67.9765
720	61.604
725	65.7448
730	69.8856
735	72.4863
740	75.087
745	69.3398
750	63.5927
755	55.0054
760	46.4182
765	56.6118
770	66.8054
775	65.0941
780	63.3828

# Apéndice B

## Macros de ZEMAX®

Para la sección de macros, todos fueron similares a excepción de que cambiamos las direcciones de guardado para los archivos. Para cualquier duda acerca de los comandos utilizados revisar el manual de ZEMAX®.

!LA POSICION INICIAL Es 51.40 para la cara del tubo de luz

!Aqui establecemos la posicion inicial para no hacerlo manualmente

dummy = NSDD(1,0,1,0)

Posin = 51.540

SETNSCPOSITION 1,4,3,Posin

SETNSCPOSITION 1,9,3,Posin

i=0

!Corremos el trazado de rayos

NSTR 1,0,1,0,1,1,1,0,0,0

UPDATE ALL

!Asignamos nombre de archivo y Exportamos a JPG

NOMBREARCHIVO\$=\$STR(i)

DIRGUARDADO1\$="E:\2014\LightPipes\Circular\Imagenes\Sistema"

DIRCOMPLETA\$=DIRGUARDADO1\$+NOMBREARCHIVO\$

EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA\$, 500

DIRGUARDADO2\$="E:\2014\LightPipes\Circular\Imagenes\Volumetrico"

DIRCOMPLETA\$=DIRGUARDADO2\$+NOMBREARCHIVO\$ EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA\$, 500

DIRGUARDADO3\$="E:\2014\LightPipes\Circular\Imagenes\Rect"

DIRCOMPLETA\$=DIRGUARDADO3\$+NOMBREARCHIVO\$

EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA\$, 500

!Aqui termina la exportacion de imagenes del sistema inicial

FOR i,1,42,1

!Con esto limpiamos la vista del detector

dummy = NSDD(1,0,1,0)

!Modificamos la posición del detector

Nuevapos =Posin+(i\*0.393700)

SETNSCPOSITION 1,4,3,Nuevapos

SETNSCPOSITION 1,9,3,Nuevapos

!Corremos el trazado de rayos

NSTR 1,0,1,0,1,1,1,0,0,0

UPDATE ALL

!Asignamos nombre de archivo y Exportamos a JPG

NOMBREARCHIVO\$=\$STR(i)

DIRGUARDADO1\$="E:\2014\LightPipes\Circular\Imágenes\Sistema\"

DIRCOMPLETA\$=DIRGUARDADO1\$+NOMBREARCHIVO\$

EXPORTJPG 1, DIRCOMPLETA\$, 500

DIRGUARDADO2\$="E:\2014\LightPipes\Circular\Imágenes\Volumetrico\"

DIRCOMPLETA\$=DIRGUARDADO2\$+NOMBREARCHIVO\$

EXPORTJPG 2, DIRCOMPLETA\$, 500

DIRGUARDADO3\$="E:\2014\LightPipes\Circular\Imágenes\Rect\"

DIRCOMPLETA\$=DIRGUARDADO3\$+NOMBREARCHIVO\$

EXPORTJPG 3, DIRCOMPLETA\$, 500

!Inicializamos POSFINDET a 0 para la siguiente iteración.

POSFINDET=0

# Apéndice C

## Propagación de los tubos de luz

En esta parte del apéndice, mostramos como la luz se propaga a través de los diferentes tubos de luz. Hay que recordar que la diferencia entre cada imagen es de 1 cm, quedando la imagen final fuera del tubo de luz.

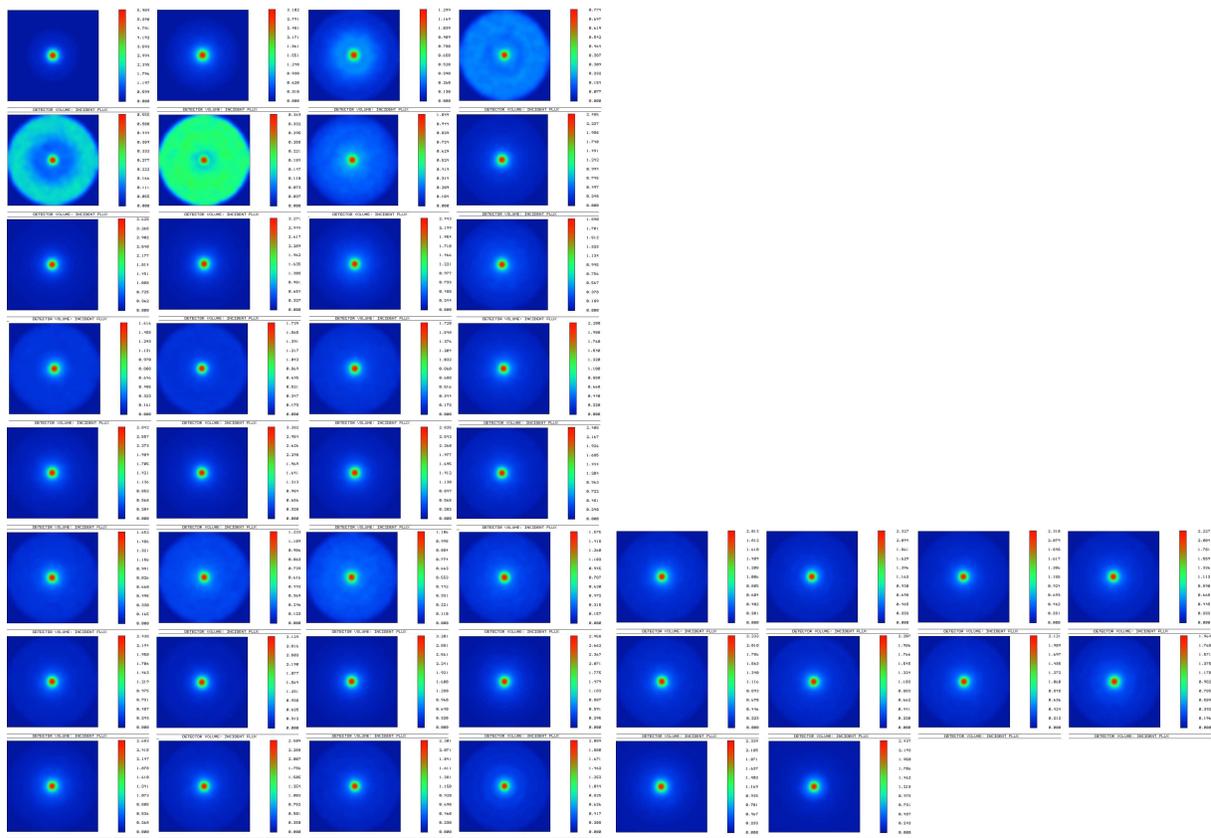


Figura C.1: Tubo de luz cilíndrico.

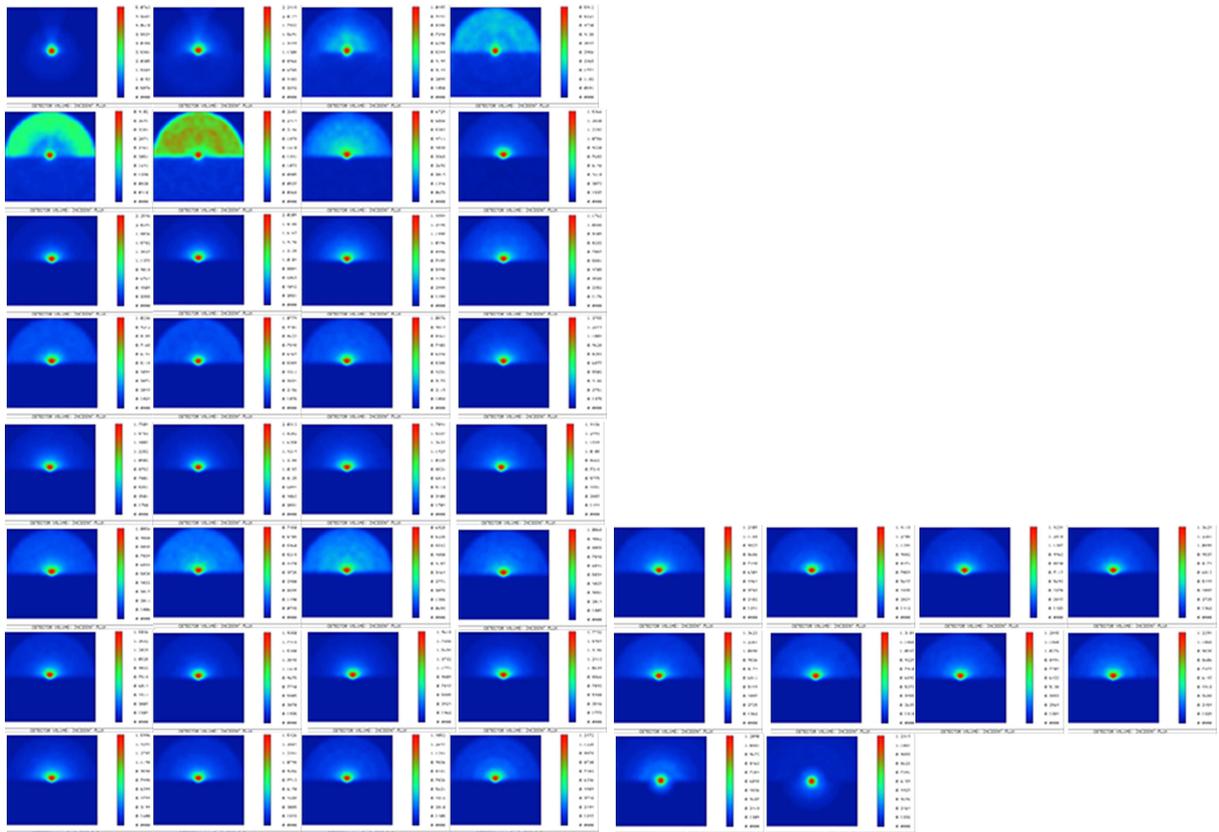


Figura C.2: Tubo de luz de medio círculo.

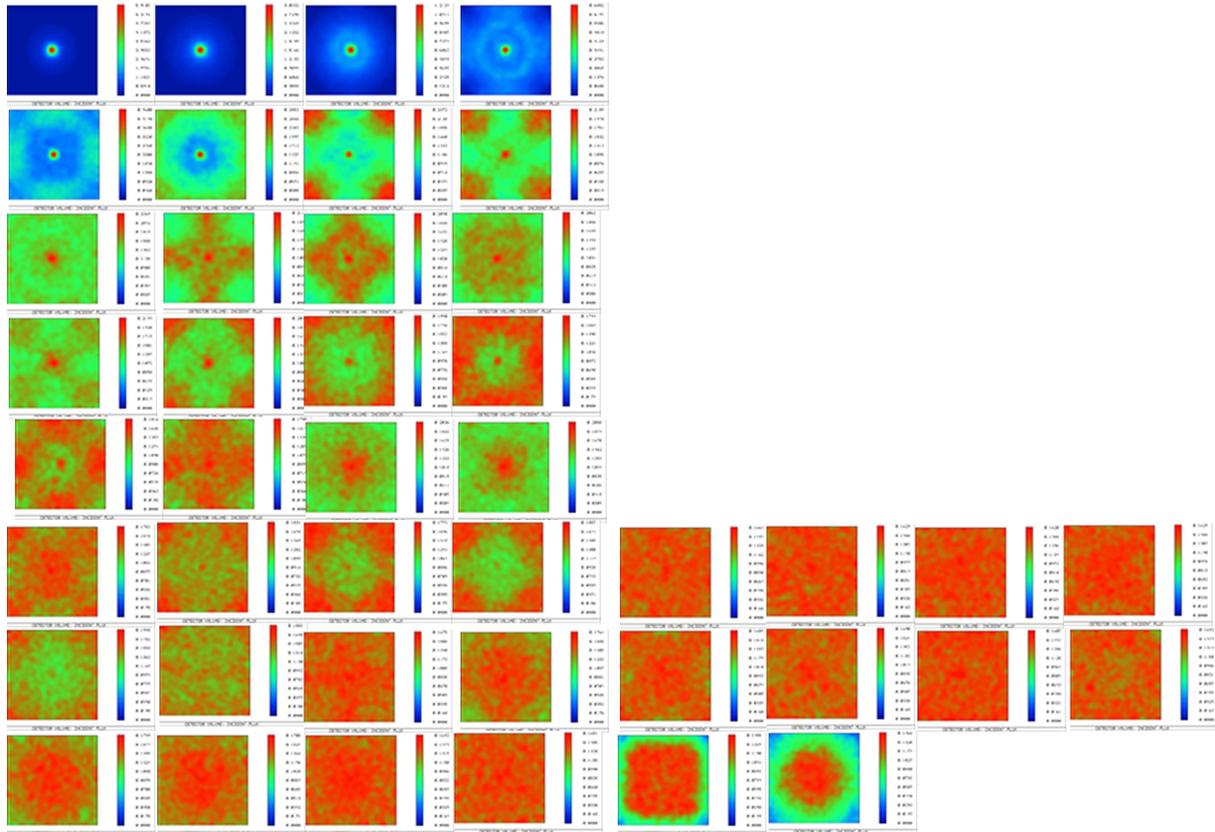


Figura C.3: Tubo de luz cuadrado.

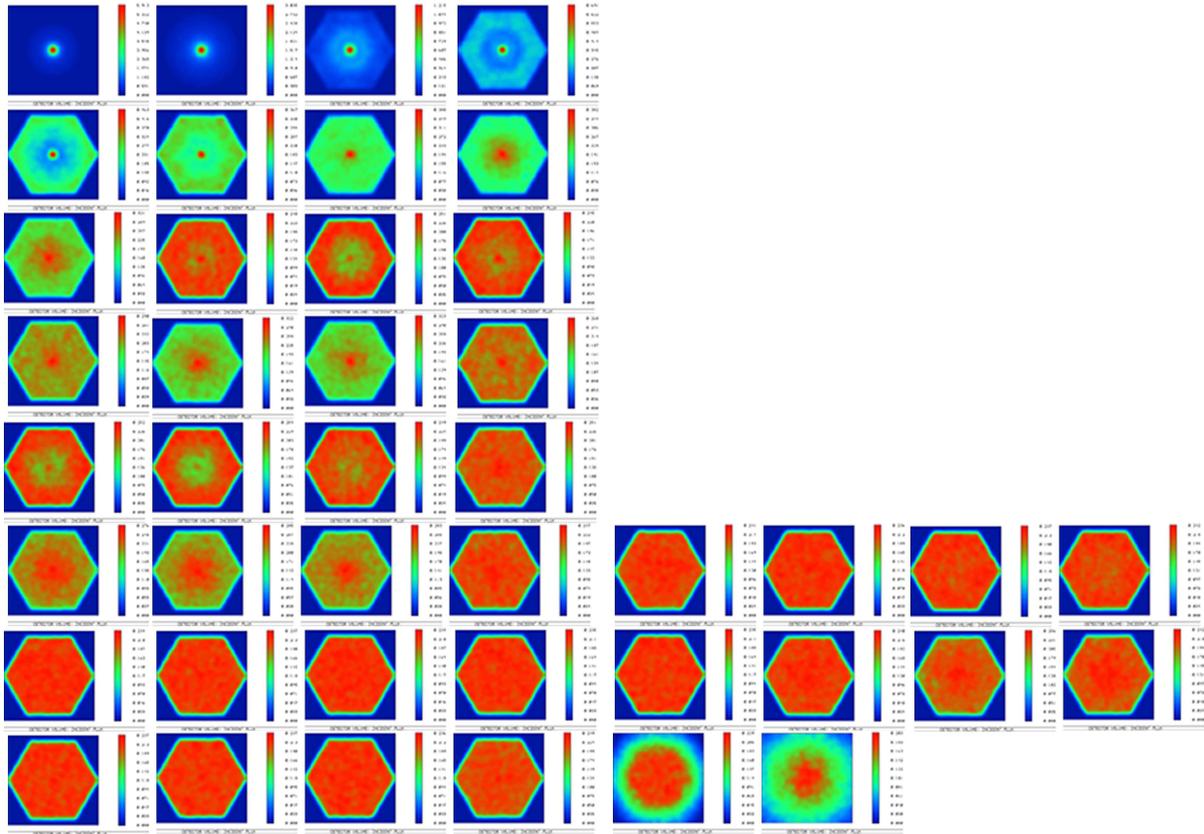


Figura C.4: Tubo de luz hexagonal.