



CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN ÓPTICA, A.C.

# MÓDULO DE ILUMINACIÓN LED CON ESTÁNDAR DE REFLEXIÓN DIFUSA PARA LA CARACTERIZACIÓN ESPECTROSCÓPICA DE MATERIALES AUTOMOTRICES



MAESTRÍA EN OPTOMECASTRÓNICA

*Versión Definitiva. Incluye cambios sugeridos por revisores*

***Asesor: Geminiano D. Martínez Ponce, Dr. C.***

***Estudiante: Danay Hernández López, Ing.***

***Julio de 2019***  
***León, Guanajuato, México***



**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN  
LUZ POLARIZADA E IMAGENOLÓGIA**

# Dedicatoria

*A mi abuela Caridad Medina Aguiar.*

# Agradecimientos

A toda mi familia en especial a mis padres, Julia y Pablo, por su apoyo incondicional.

A mi esposo por todas las experiencias vividas.

A mi abuelo Gastor, mis hermanos Yulie, Reyna y Ale, a mis niños Dani y Samy, que son mi talón de Aquiles. A mi padrastro Jesus y mi cuñado Adrian, gracias por estar.

Agradezco especialmente a mi asesor, el Dr. Geminiano D. Martínez Ponce, por todas sus enseñanzas, su paciencia y apoyo en este recorrido académico; ha sido una experiencia fortificante.

A mis sinodales, los Dres. Zacarias Malacara Hernández y Haggeo Desirena Enrriquez por sus comentarios oportunos y su tiempo.

A Ma.de los Ángeles, porque ha sido más que una amiga. A la comunidad cubana en León y a todas las personas que me ayudaron a llegar hasta el CIO, gracias por su amistad.

A Abril y Jorge por su gran ayuda en la realización de esta investigación.

A mis compañeros de generación, por tantos momentos especiales. Al Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por todo el apoyo brindado en la maestría.

A los maestros Diego Armenta, Adrian Coronel, Ricardo Valdivia y Enrique Noe por todo lo que me enseñaron. A Marco Antonio Troncoso por todo el soporte brindado. A Ulises Mendoza de la Torre por la oportunidad de desarrollar este proyecto. A las Dras. Reyna y Alma, por toda la ayuda a lo largo de este trabajo. A mi compañero Jaiver Chicangana.

*Llegue a todos mi más sincero agradecimiento.*

# Resumen

En espectroscopia, tradicionalmente se emplean fuentes de iluminación convencionales como Lámparas de Hidrógeno-Deuterio, Tungsteno y de Arco de Xenón, por citar algunos ejemplos. Recientemente los dispositivos semiconductores de estado sólido LEDs se han consolidado debido a sus altas eficiencias logradas. La naturaleza monocromática de estas fuentes de luz ofrece la posibilidad de crear disímiles aplicaciones. En este trabajo se presenta un Módulo de iluminación LED con estándar de reflexión difusa para la caracterización espectroscópica de materiales automotrices. El sistema está dirigido a dar una solución económica para aplicaciones espectroscópicas orientadas a la determinación de propiedades ópticas como Transmitancia, Reflectancia y Absorbancia en superficies automotrices.

El dispositivo final está conformado por un módulo de iluminación multiespectral formado por 4 LEDs distribuidos en un arreglo lineal que permite ser expandido a mayor cantidad de longitudes de ondas, en dependencia de las necesidades de la aplicación. Las superficies a caracterizar se analizarán a las longitudes de onda de interés, o sea, 465nm, 525nm, 590nm y 633nm. Además cuenta con un módulo mecánico para la selección de la longitud de onda central a través de una interfaz de usuario; un módulo electrónico para la habilitación y control de los LEDs y un módulo óptico para colimar el haz de salida de la fuente. Debido al comportamiento difuso de las muestras es necesario la calibración de las mediciones con un estándar de reflectancia difusa. En este trabajo se hace un estudio para la obtención de referencias de este tipo con polvo de politetrafluoroetileno(PTFE). Las muestras obtenidas son suficientemente planas en el espectro visible y se obtienen reflectancias hasta el 99%.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.2. Hipótesis . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	4
1.3.1. Objetivo General . . . . .	4
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.4. Justificación . . . . .	4
1.5. Contenido de la tesis . . . . .	5
<b>2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES</b>	<b>6</b>
2.1. Espectroscopia . . . . .	6
2.1.1. Espectroscopia atómica . . . . .	6
2.1.2. Espectroscopia ultravioleta - visible . . . . .	7

---

2.1.3. Espectroscopia infrarroja . . . . .	9
2.1.4. Espectroscopia de rayos X . . . . .	9
2.1.5. Espectroscopia de plasma . . . . .	10
2.1.6. Espectroscopia Raman . . . . .	10
2.1.7. Espectroscopia de fluorescencia . . . . .	10
2.2. Color . . . . .	11
2.3. Referencia de color . . . . .	12
2.3.1. Emisor Lambertiano . . . . .	15
2.3.2. Polvo de Politetrafluoroetileno (PTFE) prensado . . . . .	15
2.3.3. Spectralon . . . . .	18
2.3.4. Recomendaciones relativas al estándar de reflexión según CIE15:2004.	19
2.4. Sistemas de iluminación para aplicaciones espectroscópicas. . . . .	19
2.5. Fuentes de estado sólido: LEDs . . . . .	21
2.5.1. Norma E1164 (Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation) . . . . .	22
2.6. Sistemas de colimación para fuentes de luz extendida. . . . .	23
2.6.1. Colimación para fuentes LED. . . . .	23
2.6.2. Componentes ópticos para la homogeneización del haz de luz. . . . .	25

2.7. Fuentes comerciales . . . . .	26
2.7.1. Fuente de luz SL3 de Deuterio . . . . .	26
2.7.2. Fuente de luz SL5 de Deuterio - Halógeno para UV - VIS. . . . .	27
2.7.3. Fuente de luz SL1 de Tungsteno – Halógeno para VIS – NIR. . . . .	29
2.7.4. Lámpara APEX2 - QTH . . . . .	30
2.7.5. SL1-LED . . . . .	31
2.7.6. Fuente LED de alta potencia de 4 longitudes de onda. . . . .	32
<b>3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>34</b>
3.1. Módulo de iluminacion LED. . . . .	35
3.2. Módulo mecánico. . . . .	37
3.3. Módulo electrónico. . . . .	39
3.3.1. Habilitación de motor Nema17 . . . . .	39
3.3.2. Habilitación de los LEDs . . . . .	41
3.4. Módulo óptico. . . . .	44
3.5. Referencia blanca difusa. . . . .	45
3.5.1. Compactación . . . . .	46
3.5.2. Sinterizado . . . . .	47
3.5.3. Encapsulado . . . . .	49



---

3.6. Interfaz de usuario. . . . .	50
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>51</b>
4.1. Propiedades estáticas de la fuente LED . . . . .	51
4.1.1. Estabilidad de los LEDs. . . . .	51
4.1.2. Repetibilidad del posicionamiento. . . . .	52
4.1.3. Homogeneidad de la mancha de luz de salida. . . . .	53
4.2. Medición de propiedades ópticas. . . . .	54
4.2.1. Estabilidad de las mediciones . . . . .	59
4.3. Referencia blanca difusa . . . . .	61
4.3.1. Análisis microscópico de las pastillas. . . . .	69
<b>5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b>	<b>76</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>82</b>

# Índice de tablas

3.1. Información general de los LEDs empleados. . . . .	36
3.2. Tabla de verdad del manejador de micropasos A4988. . . . .	40
4.1. Desviación estándar de los niveles de gris en el diámetro más efectivo de la mancha de luz. . . . .	56
4.2. Reflectancia obtenida con el divisor 70/30E. . . . .	58
4.3. Transmitancia obtenida con el divisor 70/30E. . . . .	58
4.4. Reflectancia obtenida con el divisor 70/30. . . . .	60
4.5. Transmitancia obtenida con el divisor 70/30. . . . .	60
4.6. Reflectancia obtenida con el divisor 50/50. . . . .	62
4.7. Transmitancia obtenida con el divisor 50/50. . . . .	62
4.8. Transmitancia obtenida con el divisor 50/50 en 60 minutos. . . . .	64
4.9. Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de $1\mu\text{m}$ . . . . .	66
4.10. Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de $35\mu\text{m}$ . . . . .	67

4.11. Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de $200\mu\text{m}$ . . . . .	68
4.12. Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de más de $350\mu\text{m}$ . . . . .	69

# Índice de figuras

2.1. Procesos derivados de la interacción radiación materia: Reflexión, Transmisión y Absorción. . . . .	9
2.2. Distribución del espectro visible dentro del espectro electromagnético . . . .	11
2.3. Funciones de coincidencia de color $\bar{x}$ , $\bar{y}$ y $\bar{z}$ . . . . .	13
2.4. Diagrama de cromaticidad de 1931 . . . . .	13
2.5. Comportamiento de la reflexión especular y difusa de superficies. . . . .	14
2.6. Irradiancia medida sobre una superficie en función del ángulo. . . . .	16
2.7. Muestras de referencia blanca y neutra de Gigahertz - Optik. . . . .	18
2.8. Espectro de 8 Leds de Wurth Electronics Inc.[30]. . . . .	22
2.9. Arreglo de microlente con un patrón cuadrado. . . . .	26
2.10. Espectro de la fuente SL3. . . . .	27
2.11. Fuente de luz de Deuterio SL3. . . . .	27
2.12. Espectro de la fuente SL5. . . . .	28

2.13. Espectro de la fuente SL1. . . . .	29
2.14. Espectro de la fuente APEX2-QTH. . . . .	30
2.15. Fuente APEX2-QTH. . . . .	31
2.16. Fuente SL1-LED. . . . .	32
2.17. Espectro de la fuente SL1-LED. . . . .	32
2.18. Fuente LED de 4 Longitudes de onda con su controlador. . . . .	33
3.1. Esquema general de la fuente de iluminación . . . . .	35
3.2. Datos generales de los LEDs. . . . .	36
3.3. Espectro de los LEDs empleados. . . . .	36
3.4. Sistema mecánico . . . . .	38
3.5. Imágenes de la luz proyectada por cada uno de los LEDs en la pantalla . . . . .	39
3.6. Esquemático y PCB de la fuente de 5Vdc y el circuito A4988. . . . .	40
3.7. Circuito de habilitación de los LEDs . . . . .	42
3.8. Circuito de simulación del diseño para LED azul. . . . .	43
3.9. Circuito físico para el manejo del motor a pasos y los LEDs. . . . .	44
3.10. Módulo mecánico y de iluminación empotrados. . . . .	44
3.11. Arreglo Óptico para la colimación del haz de salida de la fuente. . . . .	45
3.12. Proceso para la obtención de las muestras . . . . .	46

3.13. Troquel maquinado. . . . .	47
3.14. Prensado de las muestras a bajas presiones. . . . .	48
3.15. Curva de sinterizado de las pastillas de PTFE. . . . .	49
3.16. Porta referencias con maquinado final. . . . .	49
3.17. Referencia con terminación final. . . . .	50
3.18. Interfaz de usuario. . . . .	50
4.1. Estabilidad de los picos de emisión de los LEDs empleados. . . . .	52
4.2. Mancha de luz de salida de la fuente . . . . .	53
4.3. Mancha de luz del LED Rojo con su perfil de intensidad. . . . .	54
4.4. Mancha de luz del LED Ámbar con su perfil de intensidad. . . . .	54
4.5. Mancha de luz del LED Verde con su perfil de intensidad. . . . .	55
4.6. Mancha de luz del LED Azul con su perfil de intensidad. . . . .	55
4.7. Esquema para la obtención de propiedades ópticas. . . . .	56
4.8. Reflectancia del divisor 70/30E. . . . .	57
4.9. Transmitancia del divisor 70/30E. . . . .	57
4.10. Reflectancia del divisor 70/30. . . . .	59
4.11. Transmitancia del divisor 70/30. . . . .	59
4.12. Reflectancia del divisor 50/50. . . . .	61

## Índice de figuras

---

4.13. Transmitancia del divisor 50/50. . . . .	61
4.14. Estabilidad de la Transmitancia para el divisor de haz 50/50. . . . .	63
4.15. Curva de Reflectancia reportada por Labsphere . . . . .	63
4.16. Reflectancia obtenida para tamaño de $1\mu\text{m}$ . . . . .	65
4.17. Reflectancia obtenida para tamaño de $35\mu\text{m}$ . . . . .	66
4.18. Reflectancia obtenida para tamaño de $200\mu\text{m}$ . . . . .	68
4.19. Reflectancia obtenida para tamaño mayor a $350\mu\text{m}$ . . . . .	69
4.20. Comparación entre las referencias. . . . .	70
4.21. Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de $1\mu\text{m}$ . . . . .	70
4.22. Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de $35\mu\text{m}$ . . . . .	71
4.23. Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de $200\mu\text{m}$ . . . . .	71
4.24. Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de $350\mu\text{m}$ . . . . .	72
4.25. Imágen microscópica de una pastilla de $35\mu\text{m}$ . . . . .	73
4.26. Imágen microscópica de una pastilla $350\mu\text{m}$ . . . . .	73
4.27. Direccional tomado como muestra . . . . .	74
4.28. Propiedades ópticas de la muestra para 465nm y 525nm. . . . .	74
4.29. Propiedades ópticas de la muestra para 590nm y 633nm. . . . .	75

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

La industria automotriz surgió en la década de 1890 y, desde entonces, ha crecido a un ritmo acelerado de tal forma que hoy comprende un conjunto de compañías y organizaciones vinculadas a través del diseño, desarrollo, manufactura, ensamblaje, mercadeo y ventas de automóviles. Este ramo de la economía se ha convertido en uno de los más importantes en el mundo por los ingresos que genera y su efecto en el producto interno bruto (PIB) de los países involucrados. En los últimos años, la industria automotriz mexicana ha formado vínculos con las cadenas globales del sector debido al crecimiento sostenido en la producción de vehículos y autopartes. Una consecuencia palpable es la transformación que ha experimentado esta industria en algunas regiones del país, la cual ha evolucionado de un ambiente de manufactura a otro donde predomina la innovación y el diseño[1]. Actualmente, el sector automotriz representa una parte importante del PIB nacional (2.9%) y de la producción de manufactura (18.3%) [2].

Al igual que cualquier industria con una línea de producción, la disminución de costos sin afectar la calidad de los productos, observando cuidadosamente las mejores prácticas, es un objetivo constante en la industria del automóvil. Por lo anterior, los grandes fabricantes destinan recursos para la investigación y desarrollo de métodos y/o instrumentos que



## 1. INTRODUCCIÓN

---

ayuden a incrementar el margen de ganancia. Un ejemplo es el desarrollo de herramientas computacionales para simular numéricamente la apariencia casi real de los acabados del producto automotriz sin necesidad de consumir materia prima. Generalmente, estos paquetes informáticos requieren ser alimentados con algunos valores de las propiedades ópticas de las superficies a simular. Para obtener estas mediciones, existen diversas técnicas y métodos ópticos que están siendo aplicadas en campos muy diversos tales como la astronomía, las comunicaciones, la biología y la salud. Esto es posible gracias a los avances en el diseño de fuentes de radiación y detectores, así como dispositivos y sistemas electrónicos cada vez más compactos, rápidos y eficientes[3]. La espectroscopia visible (VIS) es una de las técnicas más favorecidas para el control de calidad en la industria actualmente [4], y esto se hace posible gracias a toda la instrumentación óptica y electrónica que lleva consigo.

La espectroscopia óptica juega un papel principal en la caracterización de materiales de estos tiempos donde el número, la frecuencia y la diversidad de los estudios que rutinariamente se desarrollan en la industria automotriz aumentan constantemente para satisfacer los crecientes requisitos de calidad y de seguridad [4]. Esta herramienta hace posible investigaciones, análisis, controles y diagnósticos muy útiles en las líneas de producción de automóviles. Sin embargo, el costo de una caracterización usando equipos destinados a la investigación de frontera muchas veces es prohibitivo por lo que es necesario buscar alternativas más económicas pero que no excedan los límites establecidos en las normas de calidad. Son muchos los elementos que componen un sistema espectroscópico, entre otros: Fuente de iluminación, componentes dispersivos, fotodetectores, componentes ópticas (espejos, divisores de haz, rendijas) y, si es necesario hacer mediciones con resolución angular, sistemas motorizados de rotación.

En particular, la fuente de iluminación es una parte esencial para este tipo de aplicaciones, la cual tradicionalmente es diseñada para emitir un espectro continuo con una distribución de irradiancia estable con características específicas. Algunas de las fuentes convencionales que cumplen este requisito son las lámparas de hidrogeno-deuterio, tungsteno y de arco de xenón, por citar algunas. Sin embargo, una tendencia actual en este campo es el uso de los diodos

## 1. INTRODUCCIÓN

---

emisores de luz (LEDs, por las siglas de su nombre en inglés *Light Emitting Diode*), los cuales ofrecen ciertas ventajas con respecto a las fuentes tradicionales. Otro elemento importante en la caracterización espectroscópica de superficies son los estándares de reflexión difusa. Estos componentes tienen un alto costo y pueden contaminarse fácilmente. Por lo anterior, desarrollar una metodología que permita fabricarlos es de importancia para la aplicación en campo.

### 1.1. Planteamiento del problema

Una herramienta computacional para simular numéricamente la apariencia de los acabados de un producto requiere ser alimentada con los valores de algunas propiedades ópticas de los materiales usados en su manufactura. Esta información es generada mediante un sistema espectrofotométrico, el cual usualmente alcanza costos muy altos. Debido a la compleja arquitectura de tal instrumento, este proyecto está limitado a la construcción de un módulo de iluminación LED, que proveerá una señal de referencia generada por una superficie con reflexión difusa y distribución lambertiana, para estandarizar las mediciones espectroscópicas efectuadas a una probeta muestra. La probeta puede estar hecha con uno de los diferentes materiales empleados en los acabados de un automóvil, por lo que puede tener una superficie rugosa, suave o, inclusive, ser traslúcida. Por lo anterior, una parte importante para evaluar la validez de las mediciones espectroscópicas será el empleo de una superficie blanca difusa como referencia de calibración en todo momento.

### 1.2. Hipótesis

Las propiedades ópticas de superficies automotrices pueden obtenerse (dentro de los límites de tolerancia establecidos por la norma) de forma confiable utilizando un sistema de iluminación LED y alimentarse a un paquete de simulación computacional.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema optomecatrónico de iluminación LED para la caracterización espectroscópica de superficies automotrices.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Validar la iluminación LED como una alternativa a las fuentes de iluminación espectrales en la caracterización de las propiedades ópticas (Reflectancia, Transmitancia y Absorbancia) de materiales usados en la industria.
- Evaluar el desempeño del sistema de iluminación (propiedades estáticas) y sus efectos en la obtención de las propiedades ópticas de las muestras de interés.
- Evaluar la factibilidad de usar una referencia blanca desarrollada en el CIO para las mediciones de propiedades ópticas de superficies automotrices.

### 1.4. Justificación

Este proyecto surge en respuesta al interés expresado por la Corporación Continental México, en Guadalajara, Jalisco de cuantificar algunas propiedades ópticas de materiales empleados en la manufactura de automóviles usando un dispositivo de bajo costo. Los datos numéricos serán alimentados a una aplicación computacional para simular superficies automotrices. Para obtener una percepción cercana a la realidad es necesario una correcta definición de volúmenes ópticos, superficies ópticas, fuentes de iluminación, sensores y tipos de simulación. Un paquete de software empleado ampliamente en la industria para simular por computadora

## 1. INTRODUCCIÓN

---

la apariencia de productos es SPEOS®, el cual cuenta con herramientas para simular fuentes de iluminación cercanas a la realidad, en intensidad, homogeneidad y coordenadas de color. La idea es que el paquete computacional genere superficies simuladas con la misma apariencia, al menos, con los datos obtenidos usando la fuente compuesta por LEDs que las generadas usando una fuente espectral QTH.

Este trabajo describe el diseño y la construcción de una fuente de iluminación con aplicación específica basada en diodos emisores de luz (LEDs). La fuente de luz LED permite seleccionar la longitud de onda central de la radiación requerida por el sistema en las mediciones. Según los requerimientos solicitados por el cliente para la caracterización de los materiales de interés las longitudes de onda para las cuales el sistema debe realizar la simulación de las muestras son 465 nm (azul), 525 nm (verde), 590 nm (ámbar), y 633 nm (rojo). Las fuentes de luz LED utilizadas para espectroscopia, encontradas en la búsqueda de antecedentes no contemplan todas estas longitudes de onda, sino otras en específico. La intención de este proyecto es crear una fuente de iluminación versátil y escalable que cumpla los requerimientos contemplados en la Norma E1164 (Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation) y que además satisfaga las necesidades de la empresa.

### 1.5. Contenido de la tesis

El presente trabajo se presentará de la siguiente manera: En el Capítulo 1 se hará una breve introducción al desarrollo de la industria automotriz en los últimos años. Se mostrará el planteamiento del problema, así como los objetivos de este trabajo. En el Capítulo 2 se presentará una revisión bibliográfica dirigida a las técnicas de espectroscopia, un breve estudio sobre las referencias blancas difusas y las fuentes comerciales utilizadas para espectroscopia. La presentación del sistema de iluminación por cada uno de sus módulos se encuentra en el Capítulo 3. Más adelante, el Capítulo 4 presenta la discusión de resultados y, por último, se encontrarán las conclusiones y los trabajos a futuro en el Capítulo 5.

# Capítulo 2

## REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### 2.1. Espectroscopia

La espectroscopia es el estudio de la absorción o emisión de radiación electromagnética en función de la longitud de onda (frecuencia, número de onda) dirigida a identificar la composición de una sustancia. Actualmente existen diversas técnicas espectroscópicas que son nombradas según su aplicación o forma en la que se emite o se detecta la radiación electromagnética. A continuación, algunas de estas metodologías de caracterización son descritas.

#### 2.1.1. Espectroscopia atómica

La espectroscopia atómica permite medir las concentraciones de un material en una mezcla, y determinar la presencia de diversos elementos en solución o directamente en muestras sólidas [3]. Es utilizada en análisis de aguas, muestras geológicas, orgánicas, metales, aleaciones, petróleo y sus subproductos. La fuente de iluminación común es una lámpara de cátodo hueco y la determinación del espectro de absorción es lograda con un monocromador. La

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

calibración del instrumento requiere de un conjunto de soluciones con una cantidad conocida de analito (estándar de calibración).

### 2.1.2. Espectroscopia ultravioleta - visible

La espectroscopia ultravioleta - visible (UV-Vis) se basa en la cantidad de energía que una muestra puede absorber o transmitir, usualmente en el intervalo de longitudes de onda que inicia en 190 nm y termina en los 800 nm, en dependencia de la cantidad de sustancia presente [5]. Comúnmente, el instrumento para medir las propiedades ópticas de interés cuenta con una lámpara de deuterio (hidrógeno) para la región UV y otra de tipo halógeno (wolframio contenido en un gas inerte y una pequeña cantidad de yodo o bromo) para el visible. En el caso de los espectrofotómetros de doble haz, la señal de calibración o referencia es tomada de forma simultánea con la señal de la muestra. La espectrometría UV-Vis se utiliza habitualmente en la determinación cuantitativa de soluciones que tienen color y que contienen iones metálicos de transición o compuestos orgánicos muy conjugados.

La interacción entre la radiación electromagnética y la materia resulta en la observación de tres procesos fundamentales íntimamente ligados: Reflexión, Transmisión y Absorción. Los dos primeros tienen lugar debido a una discontinuidad del índice de refracción en la trayectoria de propagación de la onda electromagnética. Si no existen pérdidas, una fracción de la luz incidente es reflejada hacia el medio de incidencia con índice de refracción  $n_i$  y la restante es transmitida a través de la interfaz al medio con índice de refracción  $n_t$ . El modelo teórico empleado para predecir esta redistribución de la energía considera un campo eléctrico que incide sobre la interfaz a un ángulo  $\theta_i$  que es separado en dos componentes vectoriales, la primera que es paralela ( $E_{ip}$ ) al plano de incidencia y la segunda que es perpendicular ( $E_{is}$ ) al mismo plano. Debido a que los campos eléctricos reflejados y transmitidos deben tener las mismas componentes vectoriales, un conjunto de cuatro ecuaciones (referidas como las Ecuaciones de Fresnel) resultan al aplicar las condiciones de continuidad, y las cuales son

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

escritas como:

$$r_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (2.1)$$

$$r_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.2)$$

$$t_p = \frac{E_{tp}}{E_{ip}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (2.3)$$

$$t_s = \frac{E_{ts}}{E_{is}} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.4)$$

donde  $r_p$  y  $r_s$  son los coeficientes de reflexión calculados a partir de las componentes de campo eléctrico reflejadas con una dirección paralela ( $E_{rp}$ ) y perpendicular ( $E_{rs}$ ) al plano de incidencia, respectivamente. De forma análoga, los coeficientes de transmisión  $t_p$  y  $t_s$  consideran las componentes de campo eléctrico  $E_{tp}$  y  $E_{ts}$  transmitidas.  $\theta_t$  está relacionada con  $\theta_i$  por medio de la ley de Snell. Por último, la absorción es un proceso que depende de la naturaleza electrónica del objeto iluminado e involucra una transformación de la energía electromagnética inicial a otra, que puede incluir procesos tanto radiativos como no radiativos. Usualmente, los medios con absorción lineal son modelados con la Ley de Beer-Lambert,

$$I = I_0 e^{-\alpha t}, \quad (2.5)$$

donde  $I_0$  es la irradiancia incidente,  $I$  es la irradiancia total que resulta transmitida después de interactuar con el medio una distancia o camino óptico  $t$  y  $\alpha$  es el coeficiente de absorción. El producto  $\alpha t$  es conocido como la absorbancia  $A$ .

Generalmente, en el campo de acción de la espectroscopia, las medidas experimentales son obtenidas con un haz incoherente no polarizado de excitación que incide normalmente sobre la interfaz y arrojan, para cada longitud de onda, las medidas de reflectancia

$$R = |r_s|^2 = |r_p|^2, \quad (2.6)$$

y de transmitancia

$$\left(\frac{n_i}{n_t}\right) T = |t_s|^2 = |t_p|^2. \quad (2.7)$$

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

Estas cantidades, junto con la absorbancia, están relacionadas mediante el principio de la conservación de la energía, esto es,

$$R + T + A = 1. \quad (2.8)$$

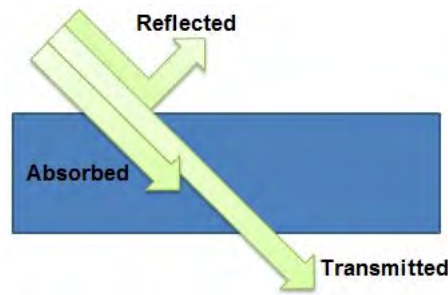


Figura 2.1: Procesos derivados de la interacción radiación materia: Reflexión, Transmisión y Absorción.

### 2.1.3. Espectroscopia infrarroja

La espectrometría infrarroja (IR) se basa en que los enlaces de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas. A partir de la energía emitida por las vibraciones de estos enlaces, se determina el o los elementos contenidos en las muestras [6].

### 2.1.4. Espectroscopia de rayos X

La espectroscopia de rayos X se utiliza para determinar las estructuras electrónicas y cristalinas de los materiales bajo estudio mediante excitación por rayos X. Utiliza energías superiores a la radiación ultravioleta, que permiten una rápida interacción con los electrones, y son capaces de penetrar estructuras cristalinas [7].



## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

### **2.1.5. Espectroscopia de plasma**

La espectroscopia de plasma utiliza una mezcla gaseosa conductora de la electricidad, que contiene una concentración significativa de cationes y aniones. Generalmente se utiliza gas argón, el cual es excitado por una fuente de radio frecuencia, lo que la convierte en plasma de altas temperaturas. La muestra es transportada al seno del plasma, donde es totalmente disociada. La recombinación de los electrones de la muestra a sus estados basales, son fuente de emisión espectrométrica, la cual es recogida por una óptica que, con ayuda de un software, la interpreta y define los componentes presentes en la muestra [8].

### **2.1.6. Espectroscopia Raman**

La espectroscopia Raman se basa en el examen de la energía esparcida por un material, al incidir sobre él un haz de luz monocromático. Una pequeña porción de esa radiación es dispersada de forma inelástica, experimentando ligeros cambios de frecuencia, que son característicos del material analizado e independiente de la frecuencia de la luz incidente[5].

### **2.1.7. Espectroscopia de fluorescencia**

La espectroscopia de fluorescencia analiza la fluorescencia de una muestra que fue previamente excitada por un haz de luz ultravioleta. Las moléculas son excitadas mediante la absorción de una onda electromagnética, desde su estado electrónico fundamental a uno de los diversos estados electrónicos excitados, lo que provoca la emisión del fotón [3].

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### 2.2. Color

La luz es una parte estrecha del espectro electromagnético, la cual se puede describir físicamente en términos de longitudes de onda ( $\lambda$ ). La luz visible es aquella parte de la radiación electromagnética que el ojo es capaz de percibir, la cual se encuentra aproximadamente en el rango de 360nm - 760nm [9]. La figura 2.2 muestra el rango de longitudes de onda del espectro visible dentro del espectro electromagnético[10].

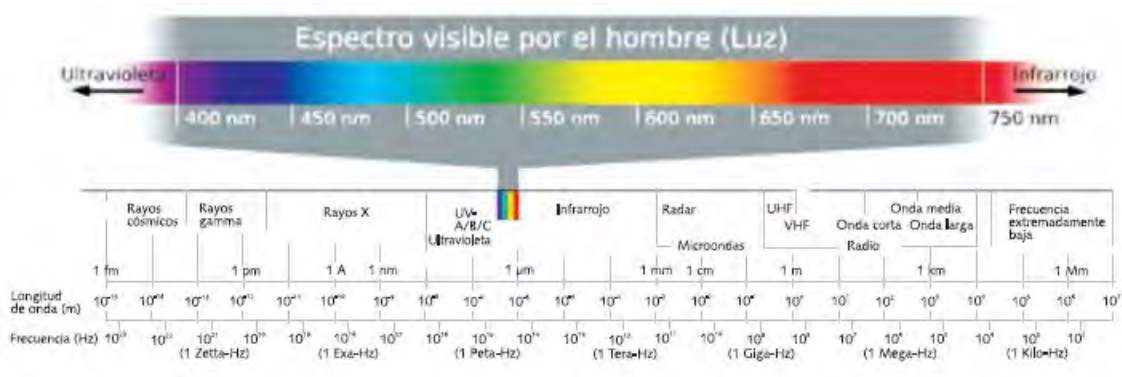


Figura 2.2: Distribución del espectro visible dentro del espectro electromagnético .

La sensación de color es producida por la estimulación física de los detectores de luz en la retina humana [11], que a su vez interpretan y distinguen las distintas longitudes de onda que son capaces de captar del espectro visible. Un cuerpo al ser iluminado absorbe parte de las ondas electromagnéticas y refleja la otra parte. Estas ondas reflejadas son captadas por el ojo e interpretadas según su longitud de onda correspondiente.

El color es un fenómeno psicofísico y, en consecuencia, su percepción es subjetiva. Por lo anterior, una serie de métodos para cuantificar el color han sido propuestos. Entre ellos, los modelos que toman en cuenta la sensibilidad promedio de los conos en el ojo humano a tres colores: rojo, verde y azul, por lo que forman parte de la llamada Teoría Tricromática. En esta, a partir de los espectros de reflexión  $R$  (transmisión  $T$ ) de la muestra, de emisión  $S$  de la fuente de Iluminación y de las funciones de igualación de color  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  y  $\bar{z}$  propuestas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas del francés Commission

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

Internationale de l'Eclairage), tres valores numéricos son generados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$X = k \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} R(\lambda)S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda, \quad (2.9)$$

$$Y = k \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} R(\lambda)S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda, \quad (2.10)$$

$$Z = k \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} R(\lambda)S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda, \quad (2.11)$$

donde  $\lambda_i$  y  $\lambda_f$  definen los puntos inicial y final, respectivamente, del intervalo espectral en el cual los espectros coinciden.  $k$  es una constante de normalización. Estas cantidades son después empleadas para determinar las coordenadas de color en un diagrama de cromaticidad estándar propuesto en 1931. Las coordenadas resultan de las ecuaciones

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (2.12)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (2.13)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (2.14)$$

Debido a que  $x + y + z = 1$ , sólo es necesario graficar  $x$  vs.  $y$ , ver Fig. 2.4. Algunas versiones recientes de los diagramas de cromaticidad han mejorado la cuantificación del color.

### 2.3. Referencia de color

El color “blanco” es una consecuencia de toda la energía radiante reflejada de un cuerpo, constituida por todas las componentes del espectro visible. Un estándar de reflexión es una muestra de referencia física que proporciona una razón entre la cantidad total de luz incidente y la reflejada por la superficie. Existen diferentes sustancias de máxima reflectancia que son consideradas blancos de referencia, las cuales deben responder como un difusor uniforme ideal

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

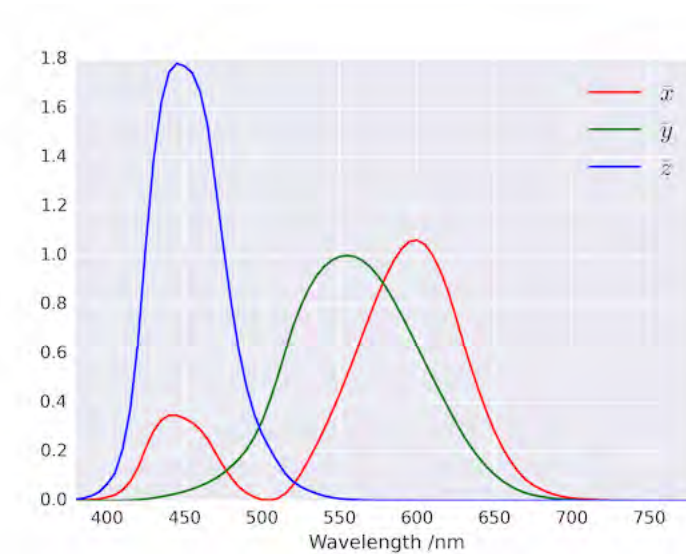


Figura 2.3: Funciones de coincidencia de color  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  y  $\bar{z}$  definidas por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE por sus siglas del francés Commission Internationale de l'Éclairage)

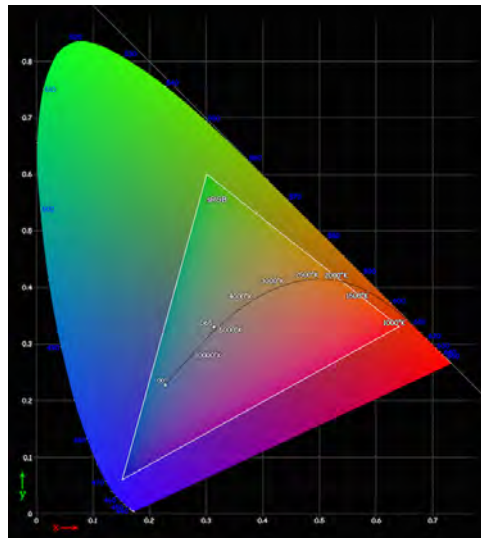


Figura 2.4: Diagrama de cromaticidad de 1931

según la Ley de Lambert con un valor de reflexión igual a la unidad [12]. Los patrones difusos de color se emplean en la calibración y verificación de instrumentos como espectrofotómetros, colorímetros, reflectómetros, espectrómetros de Transformada de Fourier e instrumentación para medir la Función de Distribución de Reflectancia Bidireccional (BRDF). En la práctica

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

se utilizan en las mediciones estándares que superficialmente se comporten de forma similar al dispositivo bajo prueba. Existen dos tipos de estándares: difuso y especular como se ilustra en la figura 2.5. En superficies especulares generalmente la reflexión es máxima en la dirección especular, mientras que en la superficie difusa la energía se distribuye en diferentes componentes[13].

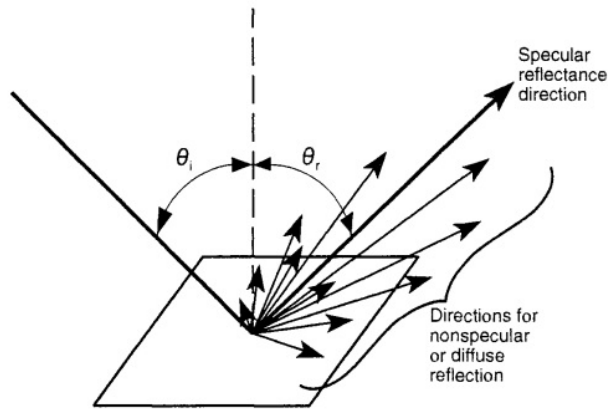


Figura 2.5: Comportamiento de la reflexión especular y difusa de superficies.

Las muestras difusas pueden tener diferentes apariencias o composiciones. Materiales como baldosas de cerámica, sales o polímeros metálicos empacados en polvo, plásticos moldeados simples o polímeros porosos sinterizados se utilizan con éxito como estándares para la reflectancia difusa [14]. Se pueden obtener muestras estándar de reflectancia blanca difusa con una reflectancia difusa del 98% o más. Algunos materiales se pueden lijar con cuidado o limpiarlos para lograr que la superficie alcance sus valores de máxima reflectancia a medida que la superficie se ensucia o se contamina [15].

Los estándares de reflexión deben tener las siguientes propiedades [12]:

- Transportable (si no es transportable, el usuario debe ser capaz de producir su propio estándar con alta confiabilidad según prescripciones bien definidas);
- Estable (con respecto al tiempo, radiación, temperatura, ambiente);
- Superficie homogénea, lisa, plana;

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

- Reflectante Lambertiano;
- Espectralmente no selectivo;
- No transparente;
- No fluorescente;
- Fácil de manejar;
- Limpiable;

### 2.3.1. Emisor Lambertiano

Cualquier superficie, cuya radiancia sea independiente de la dirección considerada se denomina emisor lambertiano [13] puesto que verifica la Ley de Lambert del coseno: la intensidad radiante desde un elemento cualquiera de área sobre la superficie varía como el coseno del ángulo  $\theta$  entre la dirección considerada y la dirección de la normal a la superficie:

$$I_{\theta} = I_0 \cos(\theta) \quad (2.15)$$

y la radiancia es, por tanto, independiente de la dirección en que se evalúa.

### 2.3.2. Polvo de Politetrafluoroetileno (PTFE) prensado

El politetrafluoroetileno (PTFE), comercialmente conocido como Teflón [16] es un material prácticamente inerte con un bajo coeficiente de rozamiento y gran impermeabilidad, manteniendo sus propiedades aún en ambientes húmedos.

Este material posee propiedades físicas y ópticas que lo hacen de gran uso como estándar

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

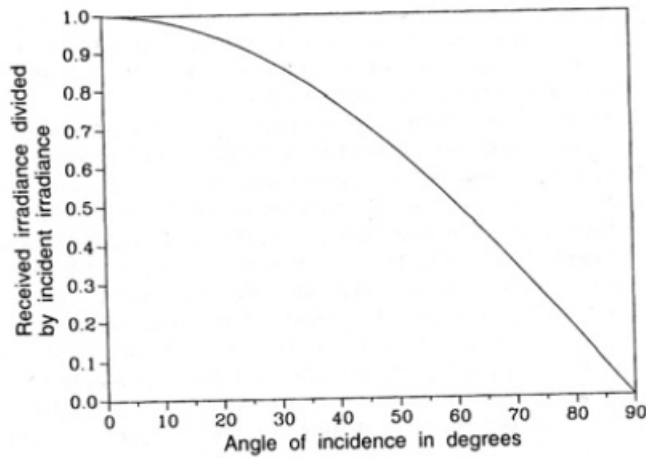


Figura 2.6: Irradiancia medida sobre una superficie en función del ángulo.

de reflectancia difusa y como revestimiento para esferas de integración en aplicaciones de espectrofotometría de reflectancia [17] :

- Tiene una temperatura de fusión de 315 °C - 339 °C
- Es un buen aislante térmico
- Tiene una elevada dilatación térmica
- Presenta una resistencia mecánica baja debido a las fuerzas intermoleculares débiles del polímero
- Tiene poca rigidez
- Presenta poca adherencia con otros materiales debido a las pocas fuerzas superficiales que existen en el polímero, haciéndolo un excelente antiadhesivo
- Si se calienta a 400 °C se descompone dando lugar a vapores nocivos
- Tiene muy buena resistencia al agua, tanto dulce como salada
- Es un material no inflamable

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

- Su resistencia a la radiación UV es buena. Es idóneo para trabajar con Alta Frecuencia (HF)
- Únicamente se puede atacar con metales alcalinos fundidos y con flúor. Resiste los ambientes externos y la tensofisuración.

La combinación de las propiedades físicas del politetrafluoroetileno en polvo con sus propiedades de reflexión al ser prensado, hacen que este material sea excepcional para aplicaciones donde se necesita un buen difusor blanco o un estándar de reflectancia difusa en las regiones del ultravioleta, visible e infrarrojo cercano [17]. La reflectancia difusa del polvo de PTFE alcanza valores de hasta el 99 % o más en el rango de 350-1800nm. El polvo de PTFE es algo grumoso, por lo que es necesario reducirlo a un polvo uniforme de baja densidad. Esto se puede lograr con una licuadora u otro dispositivo de corte, preferiblemente con cuchillas de acero inoxidable y un recipiente de vidrio. El tratamiento de este polvo se debe hacer con materiales como el acero inoxidable o aluminio con el fin de evitar la contaminación del material. El polvo se adhiere a sí mismo al ser presionado, pero no lo hace bien al metal, plástico o vidrio.

Debido a que el polvo prensado repele el agua los recubrimientos de este tipo de material no son afectados por la humedad. La reflectividad puede estar afectada por polvos u otros contaminantes que pueden estar presentes en el momento de la fabricación, debido a que el polvo es muy fino y se mezcla fácilmente en el aire. El prensado del polvo de PTFE debe tratarse en ambientes limpios y libres de polvo. Este polvo se carga electrostáticamente al ser prensado y pueden aparecer pequeñas manchas de suciedad o pelusas, la cuales se pueden remover con un pequeño pincel.

La reflectancia del polvo de PTFE está estrechamente vinculada con la densidad a la cual es prensado el polvo. Los mejores resultados de reflectancia se obtienen para una densidad comprendida entre 0.8-1.2g/cm<sup>3</sup>, para densidades mayores la reflectancia es ligeramente menor y se necesita presión mecánica para alcanzar buenos resultados. El polvo de PTFE se caracteriza por ser altamente traslúcido, por lo que el espesor de la capa de polvo afecta su



## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

reflectancia difusa [17].

### 2.3.3. Spectralon

El politetrafluoroetileno (PTFE) también se puede presentar sinterizado, y es conocido bajo los nombres comerciales Spectralon de Labsphere y OP.DI.MA de Gigahertz - Optik [18]. Este se usa ampliamente en la espectroscopia y la radiometría como un estándar de referencia primario para la reflectancia [19].



Figura 2.7: Muestras de referencia blanca y neutra de Gigahertz - Optik.

Spectralon registra la mayor reflectancia difusa de cualquier material o recubrimiento conocido sobre las regiones ultravioleta, visible e infrarroja cercana. Exhibe un comportamiento altamente Lambertiano[20], y se puede mecanizar en una amplia variedad de formas para la construcción de componentes ópticos para la calibración de instrumentos o para el recubrimiento reflectante de esferas integradoras. El PTFE prensado y el PTFE sinterizado exhiben propiedades ligeramente diferentes en la reflectancia, aunque se basan en la misma materia prima [19].

### **2.3.4. Recomendaciones relativas al estándar de reflexión según CIE15:2004.**

El reporte técnico CIE 15:2004 (Commission Internationale d'Eclairage) recoge lo que es un estándar de referencia de reflectancia, siendo éste un difusor de reflexión perfecto. Además, define el difusor isotrópico ideal como aquel que desarrolla una reflectancia igual a la unidad. Para mediciones reales, los estándares de reflectancia, como el sulfato de bario prensado o PTFE deben calibrarse en términos del difusor de reflexión perfecto para la geometría requerida [21]. Se recomienda que el factor de reflectancia del difusor se calibre sobre la base de patrones ya calibrados y certificados como NBS SRM 2040 [22].

### **2.4. Sistemas de iluminación para aplicaciones espectroscópicas.**

Una parte fundamental para el análisis espectroscópico son las fuentes de radiación óptica empleadas para este fin. Estas consisten de materiales excitados, ya sea mediante descargas eléctricas o por calentamiento, a niveles de mayor energía que al regresar a su estado base emiten energías características correspondientes a la variación de energía ( $\Delta E$ ) entre el estado base y el estado excitado.

Para llevar a cabo las mediciones espectroscópicas, la fuente de iluminación debe emular la radiación de cuerpo negro a cierta temperatura [23], o sea, se necesita una fuente radiante de espectro continuo en el rango de longitudes de onda de interés. Sin embargo, éstas sufren variaciones dependientes de la estabilidad de la energía eléctrica que se le suministra [24] y de la temperatura. Un cuerpo negro es considerado un perfecto emisor de radiación [25] que absorbe toda la luz que incide sobre él, por lo que no refleja ni transmite parte de esta. La radiación emitida por un cuerpo negro se caracteriza por tener una distribución espectral

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

continua con un máximo de intensidad dependiente de la temperatura del material [26].

Las fuentes artificiales de iluminación pueden ser clasificadas como:

- Fuentes incandescentes
- Fuentes de luz química
- Lámparas de descarga de gas
- Fuentes de estado sólido

Para la radiación ultravioleta (UV) las fuentes más comunes son las lámparas de hidrógeno y deuterio, las cuales consisten de un par de electrodos en un tubo de vidrio con ventanas de cuarzo, y que además contiene hidrógeno o deuterio gaseoso. Al aplicar alto voltaje sobre estos electrodos a baja presión se produce un espectro continuo en el rango del ultravioleta y cercano al visible. Un aspecto muy importante a destacar de las lámparas de deuterio es su intensidad, debido a que la esfera de radiación es un poco más grande que la de hidrógeno, lo que la hace mucho más útil para múltiples aplicaciones.

La lámpara de tungsteno o de filamento incandescente es considerada la fuente más común, económica y más satisfactoria en espectroscopia visible e infrarroja. El filamento de tungsteno se encuentra en un bulbo de vidrio herméticamente sellado al vacío o con gas inerte, el cual alcanza altas temperaturas al ser excitado con una fuente de corriente directa. Al ocurrir esto emite una radiación continua en el espectro comprendido entre 350nm y 2500nm. Su distribución de energía está estrechamente vinculada con la temperatura, la cual depende en gran medida del voltaje y la corriente de operación. Las lámparas de arco de xenón también son empleadas para este propósito, ya que emiten una radiación suficientemente intensa como consecuencia del paso de corriente a través de una atmósfera de xenón. Su espectro es continuo aproximadamente en las longitudes de onda comprendidas entre 200 y 1000nm, obteniendo un máximo de intensidad alrededor de los 500nm.

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

Las fuentes emisoras de infrarrojo no son más que sólidos inertes que se calientan a temperaturas entre 1500K y 2200K. El Globar y la lámpara de Nernst son las fuentes primarias de radiación infrarroja. El Globar es un radiador de cuerpo negro homogéneo a temperatura constante en toda el área de emisión. Consiste en una barra de carburo de silicio que se calienta aproximadamente a 1200°C, logrando una emisión muy estable en el rango de 1  $\mu\text{m}$  a 40  $\mu\text{m}$ . La lámpara de Nernst es una barra hueca de óxidos de itrio y de zirconio calentados aproximadamente a 1500°C, emitiendo radiación continua entre 0.4  $\mu\text{m}$  y 20  $\mu\text{m}$ , pero no tan estable como el Globar.

### 2.5. Fuentes de estado sólido: LEDs

Un diodo emisor de luz (LED, Light Emitting Diode), es un dispositivo semiconductor de estado sólido que emite radiación óptica en un espectro reducido. Esto sucede cuando se polariza de forma directa su unión PN y es excitado por una corriente eléctrica [27]. Los LEDs están optimizados para producir la mayor cantidad de luz del color correcto a la potencia más baja [28]. En sus inicios los LED se emplearon como lámparas indicadoras para sustituir las bombillas incandescentes.

Actualmente estos dispositivos ofrecen disímiles ventajas sobre las fuentes de luz convencionales, por lo que han ganado popularidad y han ido invadiendo el mercado. Esto se debe a su fiabilidad, robustez, tamaño pequeño, bajo consumo, costo relativamente bajo. Además estos dispositivos ofrecen una conmutación mucho más rápida que otras lámparas y sobre todo una vida útil superior a las 5mil horas. Este tipo de lámparas LEDs son usadas para aplicaciones de longitud de onda única, en la determinación de propiedades ópticas como Absorción, Reflexión y Transmisión. Las aplicaciones que cubren los LED son tan diversas que envuelven las principales áreas tecnológicas tales como la Medicina, la Nanotecnología, la Bioingeniería, Aeronáutica y la Industria Automotriz (luces traseras, luces de tráfico, tableros de instrumentos de automóviles, etc)[29].

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

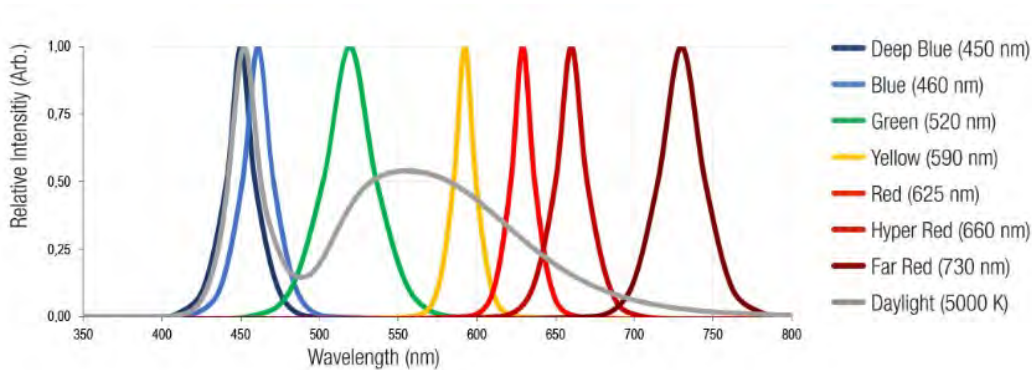


Figura 2.8: Espectro de 8 Leds de Wurth Electronics Inc.[30].

La luz emitida por un diodo emisor de luz tiene una longitud de onda específica y por lo tanto un color específico. Este último depende del material semiconductor del LED. Cada LED tiene un color de luz que se limita a una longitud de onda de alcance muy estrecho, denominada longitud de onda dominante, que representa un color de luz específico. La producción de luz blanca puede hacerse mediante fotoluminiscencia o mediante la mezcla aditiva de colores utilizando luz azul, verde y roja[30].

### 2.5.1. Norma E1164 (Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation)

Esta norma establece que, para la medición de muestras no fluorescentes, la naturaleza espectral exacta de la fuente de iluminación, es irrelevante, siempre y cuando la fuente sea estable con el tiempo y tenga la energía adecuada en todas las longitudes de onda en la región requerida para la medición. También hace mención al uso cada vez más frecuente de las fuentes pseudomonocromáticas (LED) en aplicaciones colorimétricas. Para las mediciones donde es indispensable la precisión se requiere de un intervalo de medición de 1nm en el rango de 360-830nm; de otro modo, un intervalo de 5 nm debe ser suficiente en un rango de 380 - 780nm. El uso de un intervalo más amplio, tal como 10 nm o 20 nm, dará lugar a una pérdida significativa de precisión. Cada usuario debe decidir si la pérdida de precisión en sus

mediciones es insignificante para el propósito para el cual se obtienen los datos [31].

### 2.6. Sistemas de colimación para fuentes de luz extendida.

La luz se considera colimada cuando sus rayos son paralelos entre sí, eliminando totalmente la divergencia y se suele decir que la luz colimada está enfocada en el infinito. La colimación de la luz suele ser un proceso complejo y en la mayor parte de los casos esta no será completa. Este proceso no depende únicamente de la luz, sino también de los elementos ópticos que se empleen y de fenómenos ópticos tales como las aberraciones cromáticas o las interferencias [32]. En los diseños de sistemas de imágenes todo el empeño se centra en la óptica de imágenes. Pero la iluminación puede ser un factor igualmente importante en el éxito de tales sistemas. Las principales preocupaciones en la óptica de iluminación no son las aberraciones y la calidad de la imagen, sino el rendimiento óptico, la buena uniformidad espacial o angular, y la capacidad de dispersar la luz de manera eficiente sobre un área específica a una distancia dada de la fuente [33].

#### 2.6.1. Colimación para fuentes LED.

Para colimar un LED con una distribución de intensidad radiante tal que su cono de luz  $\theta$  (es decir, el ancho total a la mitad del máximo) sea menor a  $180^\circ$  se puede emplear una lente esférica cuya apertura numérica sea igual o mayor a la del LED. La apertura numérica de la fuente de luz ( $NA_{haz}$ ) está dada por la ecuación 2.16:

$$NA_{haz} = n \sin(\theta/2) \quad (2.16)$$

La condición  $NA_{haz} \leq NA_{lente}$  maximiza el rendimiento de la luz al garantizar que la mayoría de las emisiones del LED inciden en la lente colimadora[33]. La divergencia después de la

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

lente esférica estará dada por:

$$\theta' = \frac{D_s}{F_l} \quad (2.17)$$

donde  $\theta'$  es la divergencia del haz colimado,  $D_s$  es el diámetro de la fuente y  $F_l$  es la distancia focal de la lente. La divergencia puede ser mejorada disminuyendo el tamaño de la fuente o aumentando la distancia focal de la lente colimadora. Una forma de determinar el diámetro del haz colimado( $D_c$ ) después de la lente sería según la ecuación 2.18:

$$D_c = 2NA_{haz}F_l \quad (2.18)$$

De la relación 2.18 se puede decir que en la medida que se reduce  $\theta'$  se aumenta el diámetro del haz colimado debido al aumento de  $F_l$  con el diámetro de la fuente constante. Bajo esta misma condición a medida que aumenta la distancia focal de la lente existe un compromiso entre maximizar el rendimiento de la luz y minimizar la divergencia del haz. En casos donde se necesite enfocar la luz en un punto se puede colocar otra lente esférica, preferiblemente con distancia focal mayor a la de colimación de forma tal que la apertura numérica de la fuente disminuya, y con esto la divergencia en el foco( $\theta''$ ).

$$S_d = D_s \frac{F_{foco}}{F_l} \quad (2.19)$$

$$\theta'' = 2NA_{haz} \frac{F_l}{F_{foco}} \quad (2.20)$$

donde  $S_d$  es el diámetro de la mancha en el plano focal, y  $F_l$  es la distancia focal efectiva de la segunda lente esférica.

El uso de las lentes esféricas no es funcional para fuentes LEDs que tienen emisión de todo un hemisferio( $180^\circ$ ), ya que se hace imposible recolectar todo el cono de luz. Para este tipo de fuentes se emplean componentes ópticos como:

**Concentradores parabólicos compuestos(CPC)**. Estos se emplean para coleccionar la luz con la gran virtud de lograr la concentración de energía solar sin el uso de un sistema de

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

seguimiento [34] . Estos son frecuentemente usados para concentrar la luz solar de una celda y pueden ser fabricados como un reflector hueco o como un dieléctrico sólido (vidrio o polímero)[35][36]. Como colimador la abertura del CPC se coloca en contacto o lo más cercano posible al LED para coleccionar la mayor cantidad de luz y disminuir la divergencia del haz del LED.

### 2.6.2. Componentes ópticos para la homogeneización del haz de luz.

Al emplear lentes esféricas, se crea en el plano focal una estructura igual a la del objeto. En el empleo de LEDs se crea una imagen no deseada, o sea la irradiancia resultante puede no ser uniforme, como es requerida en muchas aplicaciones. Con este fin se emplean:

- **Barras de homogeneización de tubos de luz:** Estas se basan en el principio de la reflexión total interna para homogeneizar las fuentes de luz no uniformes, independientemente de sus características espectrales. Se pueden presentar en configuración hexagonal o cuadrada, donde la primera alcanza menores pérdidas de luz que la segunda. Las fuentes de menor apertura numérica requieren de tuberías más largas para lograr una homogeneización uniforme de la luz, mientras que para fuentes con apertura numérica alta con barras más cortas es suficiente. Este tipo de componente óptico es ideal para fuentes LED [37].
- **Arreglo de microlentes:** Este tipo de dispositivo es adecuado en aplicaciones donde se necesite homogeneizar la luz pero existan limitaciones de espacio. Para ello, una buena alternativa puede ser utilizar un solo arreglo de microlentes o un par de ellos. Estas microlentes se encargan de mejorar la uniformidad al dividir la distribución de la luz incidente en varias subregiones y superponerlas [38].



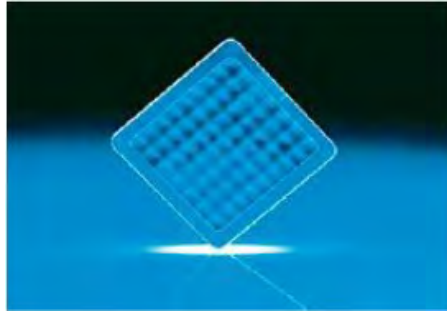


Figura 2.9: Arreglo de microlente con un patrón cuadrado.

## 2.7. Fuentes comerciales

### 2.7.1. Fuente de luz SL3 de Deuterio

Esta fuente UV se presenta con un tamaño versátil que permite su uso en aplicaciones de campo o de espectroscopia móvil, tales como de estudio ambiental, biológicas, de procesamiento químico, etc. Posee emisiones espectrales profundas en el rango del ultravioleta hasta muy cerca del visible(190nm - 450nm), en la figura 2.10 se muestra su espectro medido, utilizando el espectrómetro BLACK-Comet [39].

SL3 es una de las fuentes de luz UV compactas más brillantes disponibles, por lo que puede usarse para espectroscopia de absorbanza, transmisión, fluorescencia e incluso de reflectancia. Cuenta con un diseño especial de flujo de aire, por lo que brinda un rendimiento superior a las 4 mil horas de onda continua, con un tiempo de estabilización de aproximadamente 15 minutos. El bulbo tiene una temperatura de color de 4000K, con una existancia radiante de  $15 \text{ W/m}^2$  con regulación de 0,05 % para un consumo de 30 watts. Tiene incluido un filtro U330 con la intención de eliminar los picos del deuterio cerca de los 485 nm y un cable de fibra óptica para combinar la fuente de halógeno (SL1) con la SL3 con el propósito de cubrir un ancho de banda mucho mayor en el espectro para aplicaciones que así lo requieran [39].

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

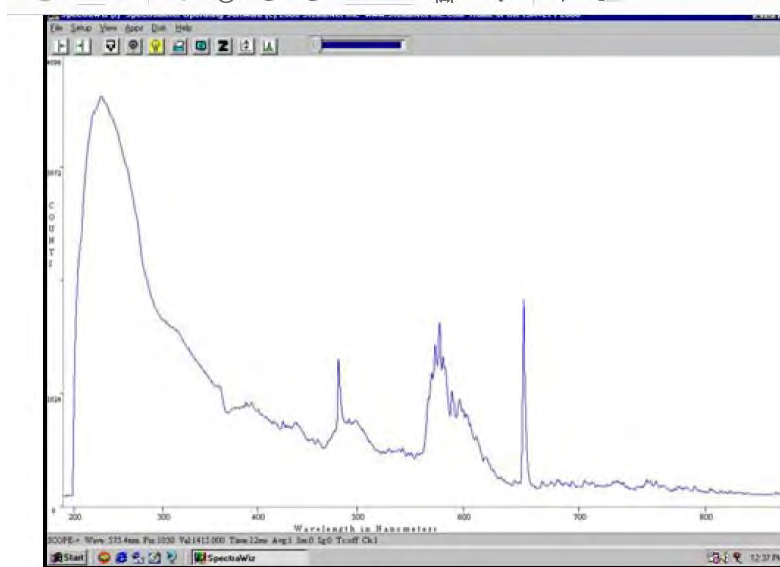


Figura 2.10: Espectro de la fuente SL3.



Figura 2.11: Fuente de luz de Deuterio SL3.

### 2.7.2. Fuente de luz SL5 de Deuterio - Halógeno para UV - VIS.

Esta fuente de luz portátil facilita las mediciones en el rango del espectro UV - VIS para varias muestras y tipos de aplicaciones utilizando conectores ópticos estándar SMA - 905.

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

Estos componentes de bajo costo son robustos, confiables y están diseñados para durar en entornos portátiles e industriales. La fuente de luz SL5 - DH UV - VIS es una fuente de luz en miniatura de deuterio y tungsteno que cubre el rango de 190 - 2500nm, combinando el espectro de deuterio con el espectro de halógeno de tungsteno para formar una única trayectoria óptica, en la figura 2.12 se muestra el espectro de esta fuente.

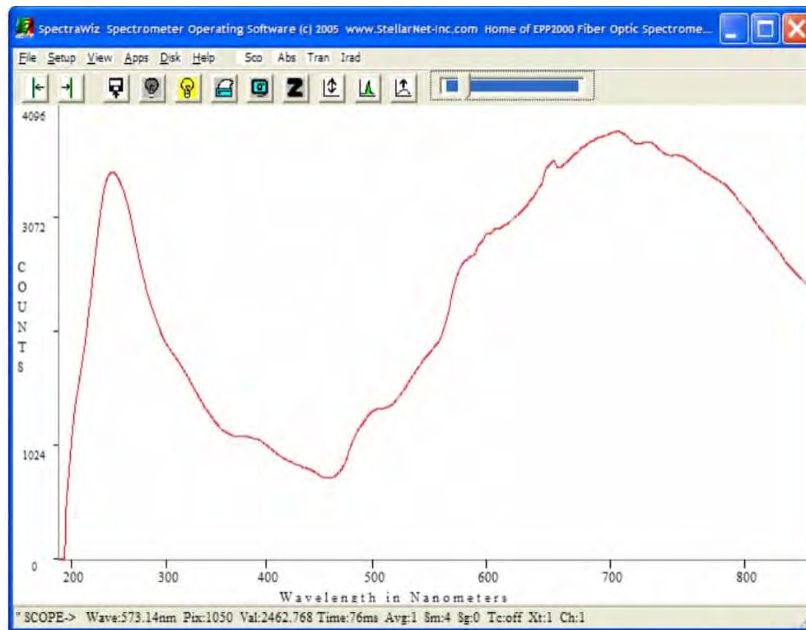


Figura 2.12: Espectro de la fuente SL5.

Cuenta con la opción de manejar las lámparas de forma independiente, pudiéndose ajustar a un nivel máximo deseado y tienen un botón de control del obturador en el panel frontal para tomar una referencia rápida de espectros oscuros. Al combinar ambas lámparas en un gabinete pequeño ahorra dinero y reduce la complejidad para proporcionar la mejor fuente de luz UV - VIS. El contar con una fuente de alimentación de 12 Vcc le permiten utilizar accesorios de batería para el trabajo de campo. Ideal para aplicaciones que solo requieren baja potencia de salida como mediciones de absorbancia y transmisión y en metrología óptica.

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### 2.7.3. Fuente de luz SL1 de Tungsteno – Halógeno para VIS – NIR.

Las lámparas halógenas de tungsteno SL1 tienen un amplio rango espectral, que se puede apreciar en la figura 2.13, entre 350 - 2500nm, efectivo para mediciones de color, reflectancia, transmitancia y absorbancia. Cuenta con una vida prolongada de hasta 10 mil horas, llena de gas Krypton con una temperatura de color de 2800K y una existancia radiante de  $200W/m^2$ . Cuenta con filtros que mejoran el color o atenúan la señal[39].

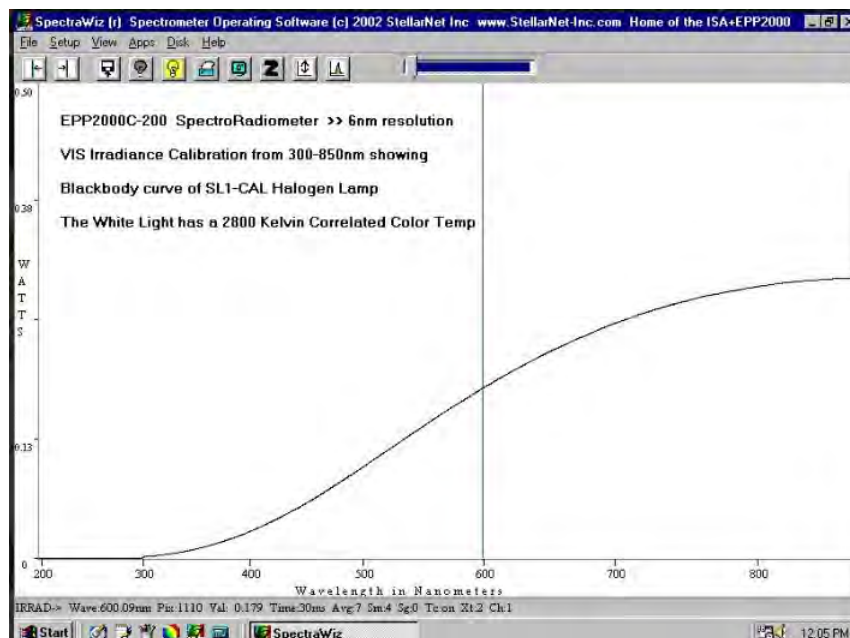


Figura 2.13: Espectro de la fuente SL1.

Esta fuente está diseñada en un pequeño gabinete, que junto a su bajo consumo de energía proporcionan una fuente de luz VIS-NIR portable, capaz de ser usado en diferentes aplicaciones como mediciones de absorbancia VIS-NIR, metrología óptica y fuentes de calibración.

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

### 2.7.4. Lámpara APEX2 - QTH

Este tipo de fuente de luz consiste en una lámpara de tungsteno formada por un compuesto de cuarzo, un filamento y una pequeña porción de gas halógeno en equilibrio térmico en su interior. Con esta combinación de elementos en la lámpara, se logra una mayor eficiencia y una luz mucho más blanca que en bombillas comunes. Este sistema de iluminación de banda ancha (200nm a 1780 nm) está diseñado con el objetivo de proporcionar soluciones de bajo costo para aplicaciones científicas e industriales.

Facilita el remplazo de la lámpara y no necesita colimación. Tiene un haz de salida altamente colimado de un diámetro aproximado a 1.3 pulgadas. Tiene una potencia de operación fija de 100W, sin necesidad de ajustes de corriente o voltaje. Incluye un filtro integrado de seis posiciones, las cuales se pueden controlar a través de Oriel Instruments' Cornerstone o los monocromadores MS257, por medio de USB 2.0 o manualmente [40].

En la figura 2.14 se puede observar el espectro medido de la lámpara APEX2-QTH en la banda de 200nm a 1780 nm[40].

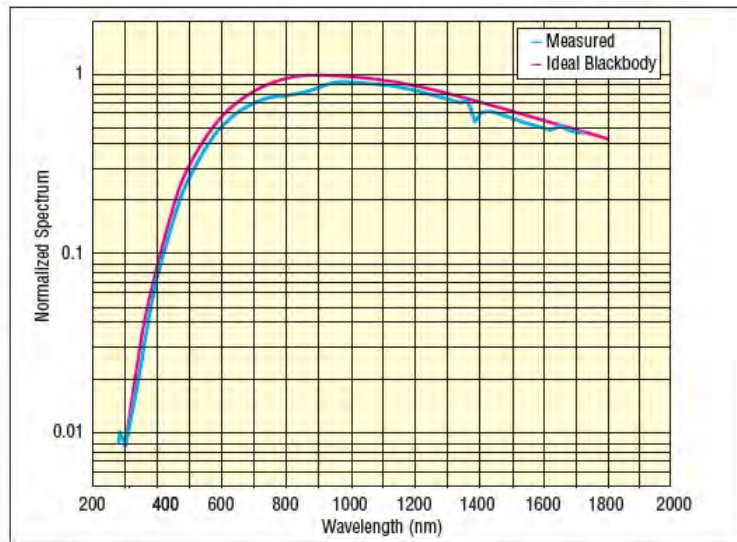


Figura 2.14: Espectro de la fuente APEX2-QTH.

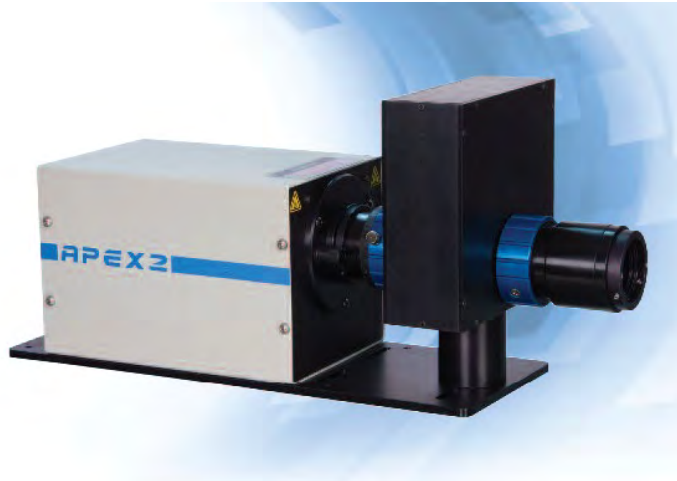


Figura 2.15: Fuente APEX2-QTH.

### 2.7.5. SL1-LED

Esta fuente de luz está basada en un conjunto de LED de diferentes longitudes de onda (380nm, 410nm, 470nm, 502nm, 590nm, 660nm) y un LED blanco opcional, los cuales pueden ser intercambiados sin necesidad de cambios en el cableado (Ver figura 2.16). Estos LEDs pueden ser usados para inducir fluorescencia en diversas aplicaciones. Esta fuente cuenta con un rango espectral dependiente del LED que se seleccione para trabajar, su vida útil es muy larga debido al empleo de LEDs como lámpara de emisión. Es muy flexible debido a su tamaño pequeño y la facilidad de intercambiar LEDs en lapsos de tiempo muy cortos. Cuenta con una fuente regulada de 12Vdc estándar y otra de 5Vdc opcional. En la figura 2.17 se puede observar el espectro de la fuente, en cada una de las longitudes de onda utilizadas. Esta lámpara puede ser empleada en aplicaciones de Fluorimetría, Absorbancia UV-VIS y Metrología Óptica [39].

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES



Figura 2.16: Fuente SL1-LED.

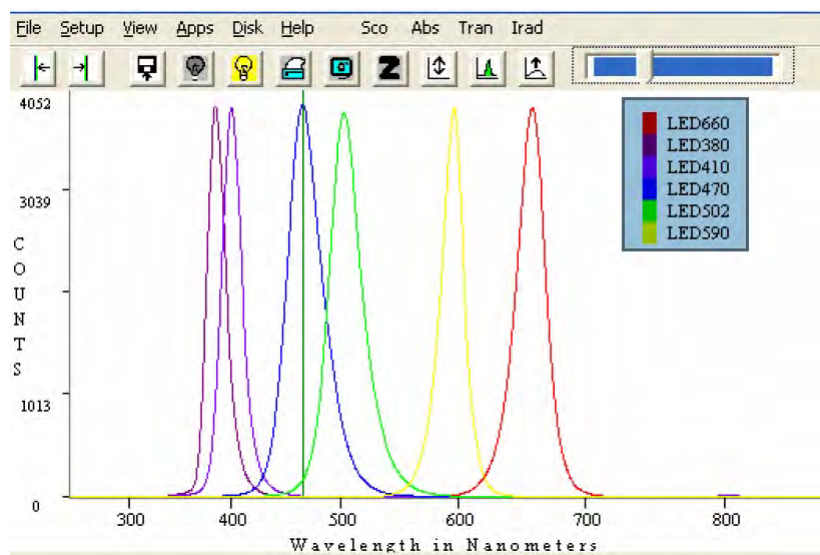


Figura 2.17: Espectro de la fuente SL1-LED.

### 2.7.6. Fuente LED de alta potencia de 4 longitudes de onda.

Esta fuente de luz LED cuenta con 4 longitudes de onda seleccionables por el usuario, dentro de 14 disponibles por el fabricante, con emisión estable y repetible. Esta fuente es totalmente configurable por el usuario, con conmutación de LED y modulación de intensidad controlada de forma individual. Es ideal para aplicaciones que requieran hasta 4 longitudes de ondas,

## 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

---

las cuales se combinan de manera eficiente a la salida en un solo haz colimado.

Funciona sin vibraciones debido a la ausencia de piezas móviles, cuenta con un controlador de cuatro canales que permite variar la intensidad de iluminación controlando la corriente que circula por cada LED. Además, posee acopladores opcionales para puertos de luz de microscopios Olympus, Nikon, Zeiss y Leica [41].

Esta fuente ofrece muchas ventajas en comparación con el resto de las fuentes convencionales. Posee una mejor relación señal a ruido, mayor estabilidad, mejores costos de reemplazo, mejores requerimientos en cuanto al sistema de enfriamiento. La luz de la fuente es guiada a través de un sistema de espejos y colimada a la salida con una lente condensadora esférica. Debido a este arreglo óptico, hay combinaciones de longitudes de onda que no se pueden ofrecer al usuario.



Figura 2.18: Fuente LED de 4 Longitudes de onda con su controlador.



# Capítulo 3

## PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo proponemos un prototipo de fuente de iluminación LED con estándar de reflexión difusa para la caracterización espectroscópica de materiales automotrices. En esencia se hizo el diseño de modo tal que cumpla con las necesidades de la empresa para la caracterización de las muestras, y además con el fin de lograr una variante económica y eficiente para la medición de las propiedades ópticas que se desean obtener. Paralelo a esto se hizo un estudio para la obtención de referencias blancas de reflexión difusa, las cuales se emplean en la calibración de instrumentos espectroscópicos y en este caso se empleará como referencia de las mediciones en todo momento. A continuación se describen los módulos que componen el sistema y finalmente se muestra el prototipo.

Este módulo de iluminación referenciado se puede dividir en los siguientes bloques:

1. Módulo de iluminación LED.
2. Módulo mecánico.
3. Módulo electrónico.
4. Módulo óptico

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

5. Referencia blanca difusa.
6. Interfaz de usuario.
7. Fuente de voltaje externa estándar.

La figura 3.1 detalla el esquema de funcionamiento de la fuente de iluminación sin incluir la parte de la referencia blanca difusa.

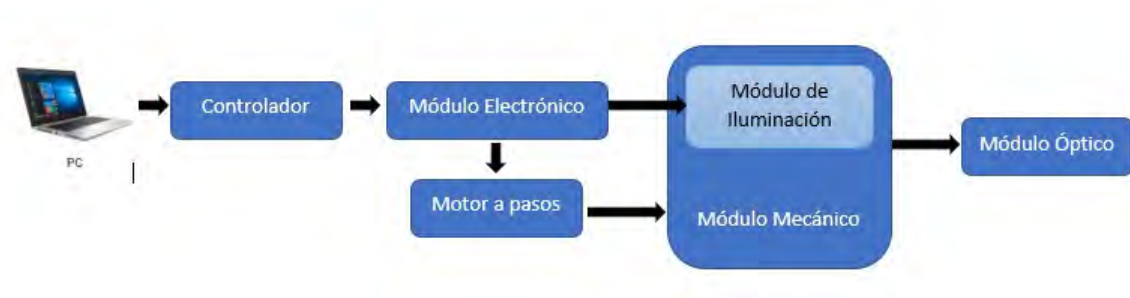


Figura 3.1: Esquema general de la fuente de iluminación

#### 3.1. Módulo de iluminación LED.

Actualmente, existe una gran variedad de LEDs en el mercado los cuales se pueden seleccionar teniendo en cuenta las necesidades a satisfacer y las aplicaciones para las cuales serán seleccionados. Para ello se debe tener en cuenta la potencia, longitud de onda de emisión, ancho de banda espectral y voltaje de alimentación. En este caso, la empresa Continental emplea para iluminar sus paneles de instrumentos 4 tipos de LEDs específicos.

Con la finalidad de que las simulaciones resulten lo más reales posibles, se intencionó diseñar la fuente de iluminación con los propios LEDs que utilizan en la fábrica. El arreglo consta de 4 LEDs con las longitudes de onda de interés para la caracterización de las muestras, las cuales son 465nm(azul), 525nm(verde), 590nm(ámbar) y 633nm(rojo). Estos LEDs son

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

del tipo TOPLED de montaje superficial, de bajo consumo eléctrico y tiene integrado su reflector. El LED azul es de NICHIA y los tres restantes son de OSRAM. En el cuadro 3.1 se muestran algunos de los datos generales de los LEDs empleados y en la figura 3.3 el espectro medido para cada uno de ellos[42][43][44][45].

Figura 3.2: Datos generales de los LEDs.

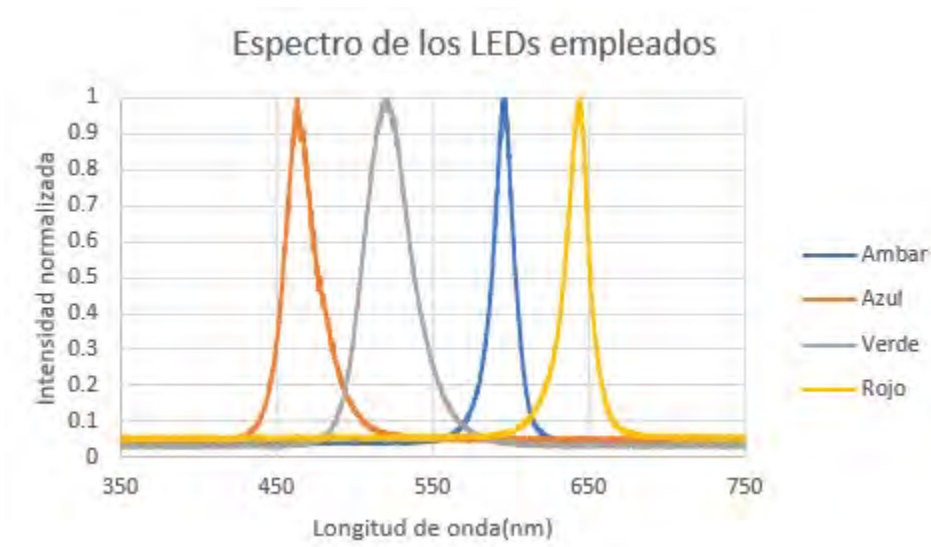


Figura 3.3: Espectro de los LEDs empleados, capturados con el espectrómetro UV-VIS USB 4000 de Ocean Optics.

Tabla 3.1: Información general de los LEDs empleados.

Código	$\lambda_{pico}$	Ancho espectral	Intensidad	$\angle_{emisión}$
Fabricante	(nm)	(nm)	Luminosa(mcd)	
NHSB064T	465	14	126	120°
LTTTSD	525	33	477	120°
LYT67D	590	16	483	120°
LST67D	633	17	385	120°

## 3.2. Módulo mecánico.

Este módulo forma una parte importante para el diseño final del prototipo. Esta sección se encarga de posicionar los LEDs a la salida de la fuente. Para esto se emplea un motor a pasos Nema 17 que se encarga de mover todo el sistema con una resolución angular de  $1.8^\circ$  por paso[46], controlado por una tarjeta Arduino, a través de un *driver* de micropaso A4988.

El uso de este tipo de motores a paso permite:

- Alta precisión
- Fácil control(estos se realiza mediante pulsos)
- Se puede controlar posición, velocidad y sentido de giro.
- Alto torque desde el arranque.

Este sistema cuenta con una base de latón de una longitud de 22cm, sobre la que se desplaza una pieza de aluminio gracias a la corredera en forma de cola de milano de 11cm de largo. Al emplear estos tamaños permite que la fuente pueda ser adaptada con facilidad para aplicaciones donde se requiera aumentar el número de LEDs. El motor se une a la varilla roscada de 1mm de paso de rosca mediante un acoplador flexible(6) de aluminio de 5mm x 5mm. Este acople permite disminuir los efectos que puedan aparecer debido a errores de alineación. En ambos extremos de la base se encuentran los soportes laterales que llevan empotrados un rodamiento 624zz de acero inoxidable con el fin de servir de soporte a la varilla ,mantenerla centrada, alineada y además facilitar el giro evitando rozamientos y desgaste en esta. La figura 3.4 muestra el diseño final del módulo mecánico.

Elementos del sistema:

1. Motor Nema 17-GN

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

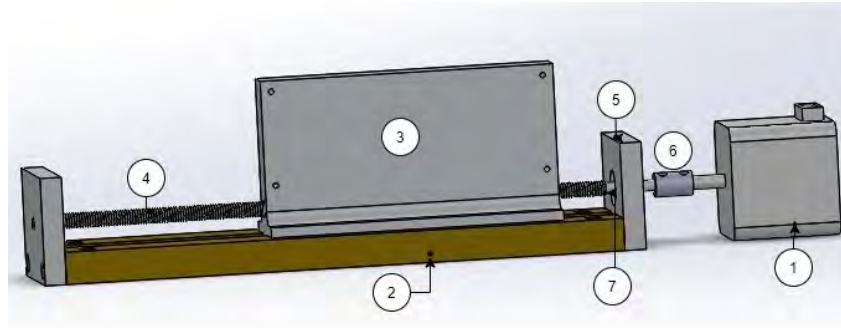


Figura 3.4: Sistema mecánico

2. Base
3. Pieza deslizante
4. Varilla roscada
5. Soporte lateral
6. Acople motor-varilla
7. Rodamiento 624zz

Para realizar todo el recorrido de extremo a extremo, el motor desarrolla 3500 pasos con una resolución de 0.003cm por paso en la configuración antes mencionada. Los LEDs están nivelados horizontalmente y distanciados a 2.54cm, lo que hace que la alineación del LED con la salida de la fuente sea viable, sobre todo por la alta resolución lograda. Para realizar el cálculo de la equivalencia entre la distancia de los LEDs y el número de pasos del motor se llevó a cabo un procesamiento de imágenes de las manchas de luz proyectadas por los LEDs en una pantalla, como se muestra en la figura 3.5. Se utilizó una cámara Canon EOS-Rebel XSi alineada a la salida con un tiempo de exposición de 1/50 y una sensibilidad ISO de 800 para la captura de las imágenes y el procesamiento se realizó en el programa libre GNU Octave.

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

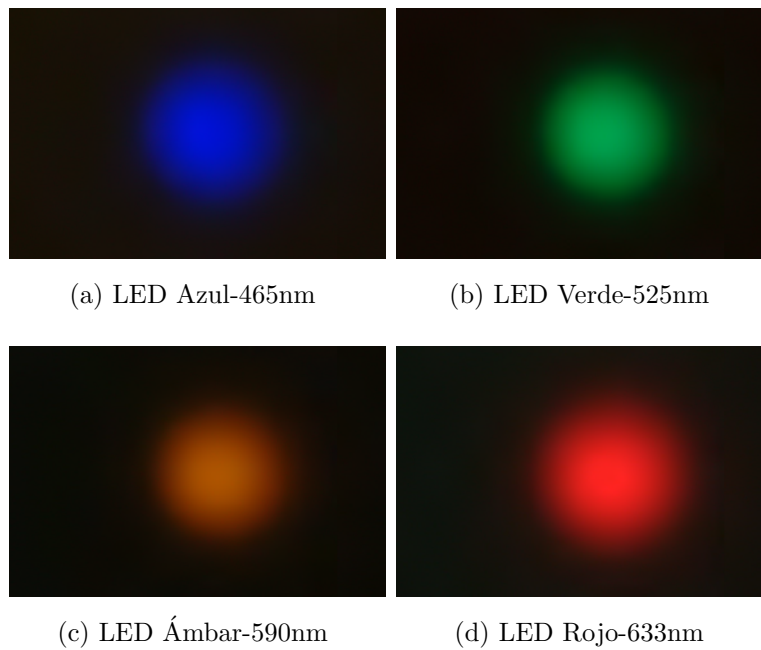


Figura 3.5: Imágenes de la luz proyectada por cada uno de los LEDs en la pantalla

El análisis consistió en varias corridas de posicionamiento de cada uno de los LEDs y determinar el centroide de cada mancha proyectada en la pantalla a la salida de la fuente.

### 3.3. Módulo electrónico.

Este módulo se divide en dos secciones, una se encarga de la habilitación del motor para el control del módulo mecánico y la otra se encarga de la habilitación del módulo de iluminación LEDs.

#### 3.3.1. Habilitación de motor Nema17

El motor *Nema 17* es un motor a pasos bipolar que se alimenta con un voltaje directo de 12Vdc con un consumo de 1,2A. Debido a que la corriente en sus bobinados es alta respecto a

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

los puertos del controlador, se hace necesario el uso de un manejador, en este caso se emplea uno de micropaso del tipo A4988. Este manejador ofrece varias opciones de configuración de pasos para el motor (Paso completo, medio paso, 1/4 paso, 1/8 paso y 1/16 paso), como se muestra en la tabla 3.2 [47].

Tabla 3.2: Tabla de verdad del manejador de micropasos A4988.

MS1	MS2	MS3	Resolución
Bajo	Bajo	Bajo	Paso completo
Alto	Bajo	Bajo	Medio Paso
Bajo	Alto	Bajo	Cuarto de Paso(1/4)
Alto	Alto	Bajo	Octavo de Paso (1/8)
Alto	Alto	Alto	Dieciséis partes de Paso (1/16)

En este caso la configuración empleada fue de paso completo, donde las entradas M1, M2 y M3 son puestas en nivel bajo (Tierra) para simular un cero lógico. En caso de ser necesario mejorar la resolución antes mencionada (Sección 3.2) se puede emplear cualquiera de las configuraciones restantes. A través de la tarjeta Arduino Mega se envían las señales de Paso (Step) y Dirección (Direction) como se muestra en la figura 3.6.

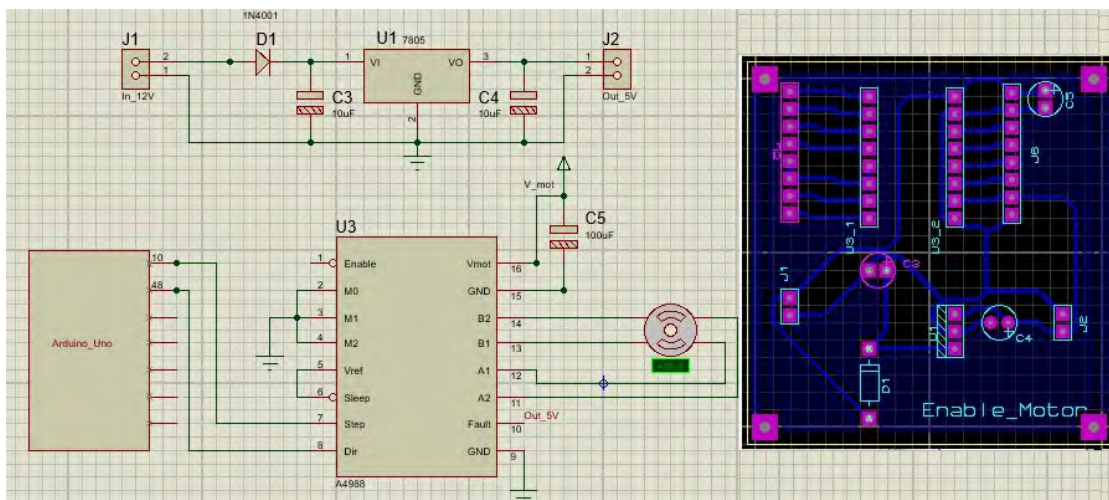


Figura 3.6: Esquemático y PCB de la fuente de 5Vdc y el circuito A4988.

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

Al manejador de micropaso utilizado, se le suministran 2 voltajes diferentes, el correspondiente a la alimentación del motor y el voltaje de la propia pastilla que son 5Vdc generados desde una fuente interna. Esta fuente interna está basada en un regulador de voltaje (circuito integrado LM7805) que tiene como entrada un voltaje de 12Vdc suministrado desde la fuente externa. La diferencia de potencial entre los pines 1 y 3 del integrado ( $>3V$ ) hace que este funcione en un rango de trabajo adecuado. A la salida se obtienen 5Vdc filtrados y muy estables.

#### 3.3.2. Habilitación de los LEDs

Para la habilitación de cada uno de los LEDs empleados en el módulo de iluminación, se utiliza un circuito electrónico que protege los puertos de la tarjeta Arduino a través de los cuales se envía la señal de activación.

Este circuito fue diseñado como se muestra en la figura 3.7, de modo tal que las 4 señales de control procedentes de la placa Arduino(conector J4) excitan la base de los transistores 2N2222 correspondientes a cada uno de los LEDs. El conector J7 representa del lado izquierdo el ánodo y del lado derecho el cátodo de los 4 LEDs, esto debido a que los LEDs se encuentran dispuestos en la pieza deslizante del módulo mecánico.

Los cálculos fueron realizados teniendo en cuenta un voltaje de alimentación de 12V, asegurando que los valores de R1-R4 limitan la corriente que circula por los LEDs y en combinación con R5-R8 permiten que los transistores operen en su zona activa. Como criterio de diseño se considera que el voltaje de colector emisor ( $V_{ce}$ ) es la mitad del voltaje de alimentación( $V_{cc}$ ). Bajo este criterio y determinando las corrientes y voltajes directos( $I_f$ ,  $V_f$ ) para cada uno de los LEDs según sus hojas de datos se procedió al diseño de cada una de las etapas correspondientes.

En la figura 3.8 se muestra el circuito de simulación de los cálculos realizados, en este caso



### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

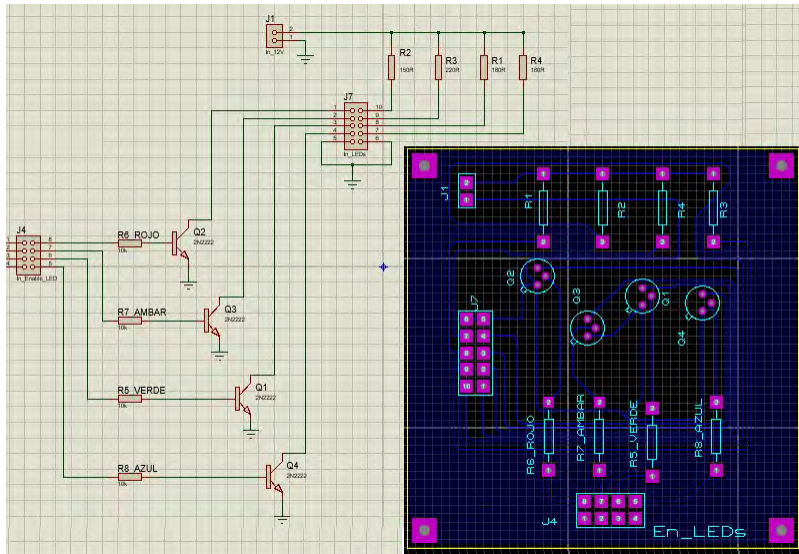


Figura 3.7: Circuito de habilitación de los LEDs

se muestra específicamente para el LED azul. Teniendo en cuenta la hoja de especificaciones de este LED se tomaron como datos de diseño:

- $I_f = 15\text{mA}$
- $V_f = 3.1\text{V}$

Aplicando Ley de Kirchhoff de voltaje (LKV) en la malla de  $V_{cc}$  a tierra, se tiene la ecuación:

$$-V_{cc} + R_1 * I_{colector} + V_f + V_{ce} = 0 \quad (3.1)$$

$$-12\text{V} + R_1 * 15\text{mA} + 3,1\text{V} + 6\text{V} = 0 \quad (3.2)$$

Despejando  $R_1$  de la ecuación 3.2 se obtiene:

$$R_1 = 192\Omega \quad (3.3)$$

Como este valor de resistencia no es comercial se escoge el valor más cercano al ideal. En este caso  $180\Omega$ . Una vez calculada la resistencia de carga se determina la resistencia de base ( $R_8$ ). Aplicando una LKV en la base del transistor se obtiene:

$$-V_{control} + R_8 * I_{base} + V_{be} = 0 \quad (3.4)$$

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

Considerando que:

$$\beta * I_{base} = I_{colector} \quad (3.5)$$

para una  $\beta$  igual a 50 y substituyendo (3.5) en (3.4) se obtiene:

$$-V_{control} + R_8 * I_{colector}/\beta + V_{be} = 0 \quad (3.6)$$

$$-5V + R_8 * 15mA/50 + 0,7V = 0 \quad (3.7)$$

$$R_8 = 14,3k\Omega \quad (3.8)$$

Como este no es un valor comercial de resistor se escogió un valor de  $10k\Omega$  y se recalcula el valor de voltaje base emisor ( $V_{be}$ ), siendo este de  $1.3V$ , lo que asegura que el transistor se mantiene en la región activa.

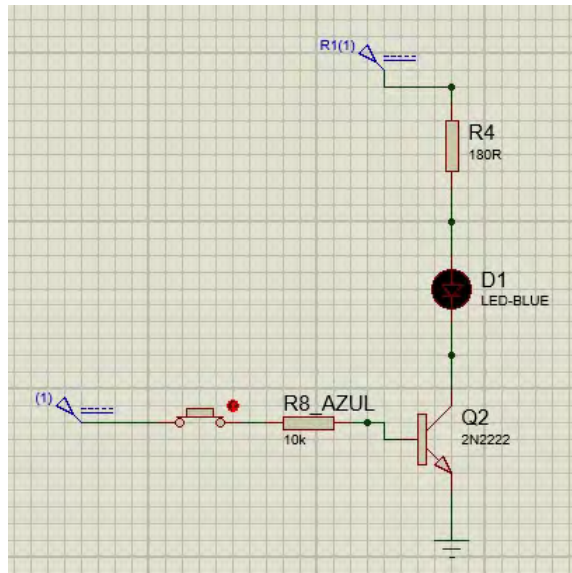


Figura 3.8: Circuito de simulación del diseño para LED azul.

Este procedimiento se realiza para todos los LEDs a emplear en el diseño de prototipo, para cada uno se toman en cuenta los mismos parámetros que ofrecen los fabricantes en sus hojas de datos.

Los circuitos electrónicos finales tanto para el control de motor Nema 17 como para la habilitación de los LEDs se muestran en la figura 3.9. Además en la figura 3.10 se puede apreciar el prototipo de módulo mecánico y módulo de iluminación terminado.

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

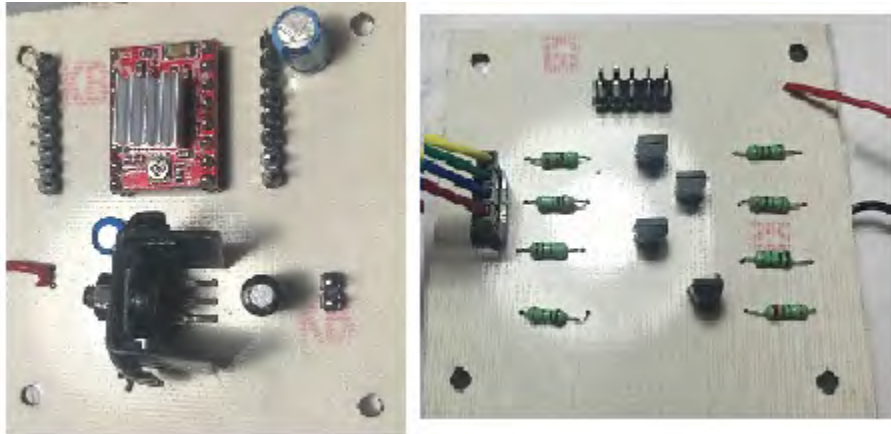


Figura 3.9: Circuito físico para el manejo del motor a pasos y los LEDs.



Figura 3.10: Módulo mecánico y de iluminación empotrados.

#### 3.4. Módulo óptico.

Una condición necesaria para lograr mediciones confiables es la colimación del haz de salida de la fuente de iluminación. En todos los casos de los LEDs empleados, se comportan como emisores Lambertianos, por lo que un patrón de radiación de este tipo hace que los rayos de luz salgan en todas las direcciones. Al tener un encapsulado que contiene una lente primaria y reflector hacen que los rayos se redireccionen a  $120^\circ$ . Para el fin que se empleará la fuente este patrón de radiación no es conveniente.

Con el fin de lograr una divergencia mínima en la salida de la fuente se empleó un sistema de lentes compuesto por dos lentes condensadoras esféricas de Thorlabs(ACL 2520U-DG 15-A,

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

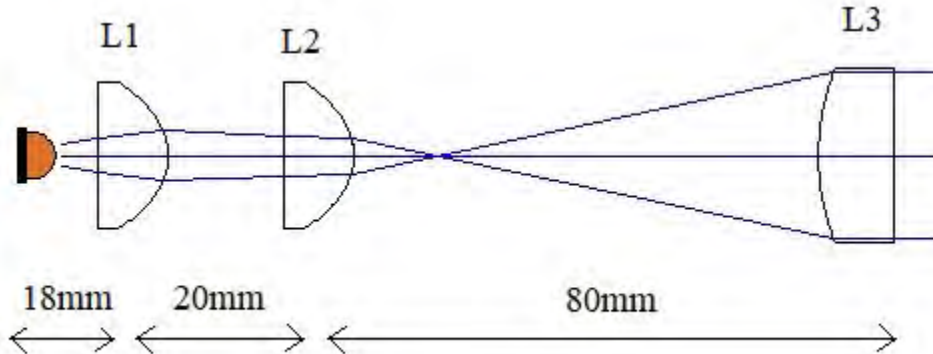


Figura 3.11: Arreglo Óptico para la colimación del haz de salida de la fuente.

ACL 2520U-A ). Estas dos lentes(L1 y L2) presentan una constante de conicidad de  $-0.6265$ , para un perfil de superficie *Elipsoide de revolución cerca del eje mayor* [48]. Sus diámetros son de 25mm con distancia focal efectiva de  $20\text{mm} \pm 8\%$  . Los LEDs son colocados a una distancia de 18mm de la lente L1, la cual en su superficie plana cuenta con un difusor para homogeneizar la mancha de luz . La segunda lente(L2) y la tercera lente es plano convexa de 30mm de diámetro y distancia focal equivalente a 105mm. Esta lente está sujeta del extremo de un cañón de salida con 80mm de largo, por lo que L3 no se coloca a su distancia focal, sino a 80mm. Con este arreglo óptico se logra un haz de salida de la fuente de 3cm de diámetro con una divergencia de aproximadamente  $2^\circ$ .

### 3.5. Referencia blanca difusa.

Para la fabricación de la referencia blanca difusa se siguieron las especificaciones de la norma como se mostró en el capítulo anterior. El polvo empleado es de politetrafluoroetileno(PTFE) conocido comercialmente como Teflón, de SIGMA-ALDRICH . Para este proceso se emplearon 4 tamaños de partículas de polvo:  $1\mu\text{m}$ ,  $35\mu\text{m}$ ,  $200\mu\text{m}$  y un polvo con partículas de tamaño superior a  $350\mu\text{m}$ (350-650 $\mu\text{m}$ ).

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

Para lograr estas referencias se siguieron diferentes procesos:

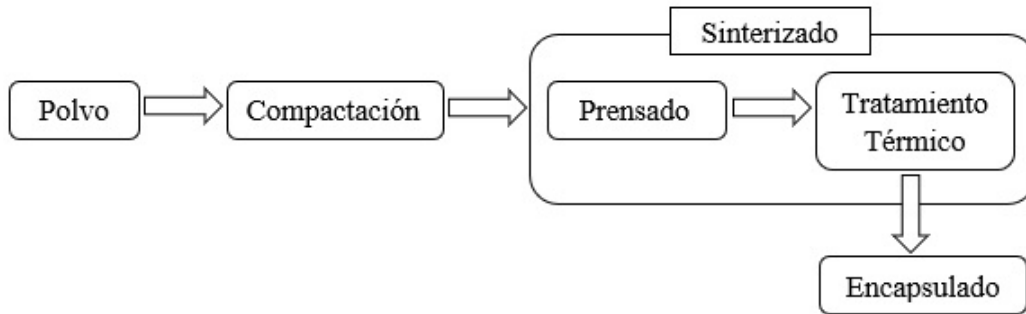


Figura 3.12: Proceso para la obtención de las muestras de referencia blanca difusa.

#### 3.5.1. Compactación

En este punto el paso inicial es determinar la densidad( $D$ ) a cual se va a construir la referencia y realizar los cálculos pertinentes para ser consecuentes con el valor de densidad establecido. Las variables a tener en cuenta son el volumen de la pastilla( $V_{ref}$ ) y la masa del polvo ( $M_{polvo}$ ).

$$D = \frac{M_{polvo}}{V_{ref}} \quad (3.9)$$

Una vez hechos los cálculos y seleccionado el tamaño del polvo con el que se desea trabajar, comienza el proceso de compactación. En este paso el polvo pasa a tomar una forma inicial con un nivel de compactación tal que puede pasar al siguiente nivel. Para el moldeo de la muestra se utiliza un troquel diseñado para este fin como se puede observar en la figura 3.13 . Por cuestiones prácticas para la aplicación final de este trabajo se fabricaron muestras de 3cm de diámetro. Debido a esto el troquel se diseñó y se maquinó respetando estas dimensiones. Este dispositivo está hecho de aluminio 6063-T teniendo en cuenta que las presiones manejadas no son altas y aprovechando las bondades de este material en el proceso de maquinado.

En dependencia del tamaño del grano de polvo va a ser necesario saltar el paso de prensado

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---



(a) Piezas que conforman el troquel para la fabricación de referencias.



(b) Troquel armado.

Figura 3.13: Troquel maquinado para la fabricación de referencias de Teflón en polvo.

e ir directo al horneado de la pastilla. Esto se debe a que en tamaños muy pequeños de partículas de polvo con tan solo la presión manual se alcanzan las densidades deseadas.

#### 3.5.2. Sinterizado

Después de someter las muestras a un moldeo inicial, el criterio más importante a tener en cuenta es el control del volumen de la pastilla con la prensa. En esta parte de la fabricación es indispensable tener un adecuado control de la presión que se aplica sobre el troquel. Debido a que el politetrafluoroetileno es no adherible y altamente traslúcido (este último es un efecto no deseado en las referencias blancas difusas), las presiones que se manejan son bajas. La

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

prensa empleada tiene una escala de hasta 10 MPa. En la figura 3.14 se muestra como se realiza este procedimiento de prensado.



Figura 3.14: Prensado de las muestras a bajas presiones.

La intención principal es lograr una compactación tal que además de satisfacer la densidad como se mencionó anteriormente, se logre una superficie difusa con alta reflectancia. Una vez obtenidas las referencias con las características deseadas se procede al proceso de horneado. Esta parte del proceso va a permitir obtener muestras con mayor dureza, capaces de cumplir con los requisitos propuestos para una referencia blanca difusa, discutidos en la Sección 2.3 del capítulo anterior.

El proceso de tratamiento térmico se realizó a temperatura inferior a la de fusión del material. Después de varias iteraciones se comprobó que la temperatura más indicada para este proceso es de 240°, aproximadamente el 76 % de la temperatura de fusión. Este proceso se llevó a cabo en un horno MTI VBF-1200 al que se le programó una curva como se muestra en la figura

### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---

3.15. Las pastillas se hornearon 1 hora en la rampa de subida desde temperatura ambiente hasta 240°, una vez alcanzada esta temperatura se mantuvo por un periodo de 3 horas y luego una rampa de bajada de 1 hora hasta alcanzar nuevamente la temperatura ambiente.



Figura 3.15: Curva de sinterizado de las pastillas de PTFE.

Una vez terminado este proceso las referencias obtenidas no modifican su tamaño ni sus características superficiales, por lo que están listas para su terminación.

#### 3.5.3. Encapsulado

Con el objetivo de que las referencias no sufran contaminación durante su uso y para facilitar su manejo, se diseñaron encapsulados de acero inoxidable cilíndricos con tapa. Estos fueron diseñados a la medida de las pastillas de teflón, que por su estructura, no se necesita adherente para fijarlas.



Figura 3.16: Porta referencias con maquinado final.



### 3. PRESENTACIÓN DEL SISTEMA

---



Figura 3.17: Referencia con terminación final.

### 3.6. Interfaz de usuario.

El control de este sistema de iluminación se realiza desde la computadora y a través de una interfaz de usuario. La misma fue desarrollada en Labview 2018 e implementada utilizando una tarjeta Arduino Mega. Esta tarjeta es utilizada para la adquisición de bajas señales y a través de Labview se realiza la gestión por medio de la comunicación serial USB. El usuario puede seleccionar la longitud de onda con la que desea realizar las mediciones, de una forma sencilla y práctica.

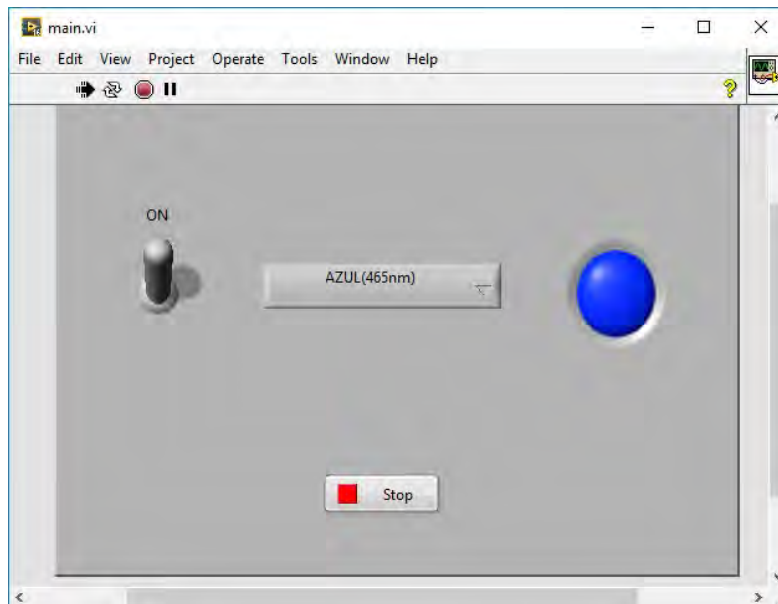


Figura 3.18: Interfaz de usuario.

# Capítulo 4

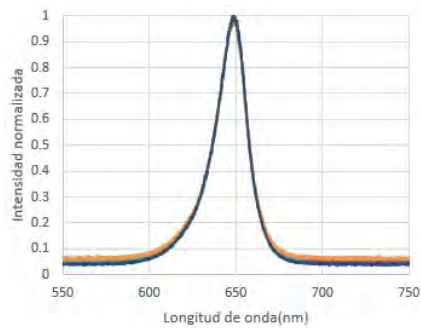
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Propiedades estáticas de la fuente LED

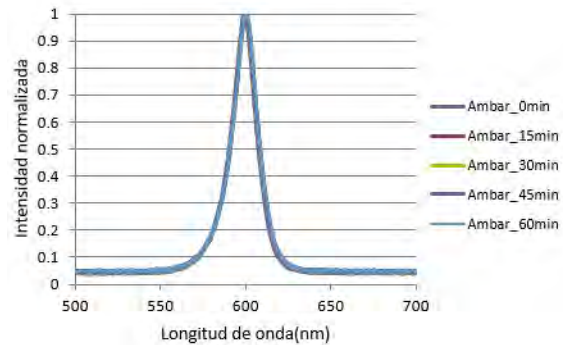
#### 4.1.1. Estabilidad de los LEDs.

Para determinar el corrimiento del pico de emisión de cada uno de los LEDs empleados en la fuente, se obtuvieron sus espectros en diferentes intervalos de tiempo. El periodo de prueba cuenta desde el instante en que fueron encendidos a intervalos de 15min hasta transcurrida 1hora. En la figura 4.1 se puede observar que los corrimientos durante las pruebas son relativamente pequeños, siendo así, el rojo desarrolla un corrimiento de 0.98nm, el verde de 2.45nm, el ambar de 0.79nm y el azul no desarrolla desplazamiento apreciable. Estos resultados apuntan a que las mediciones espectroscópicas realizadas con la fuente no deben tener errores considerables por este concepto.

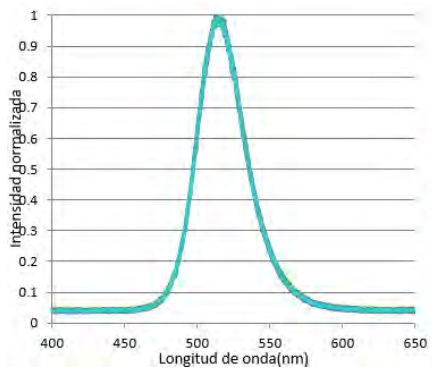
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



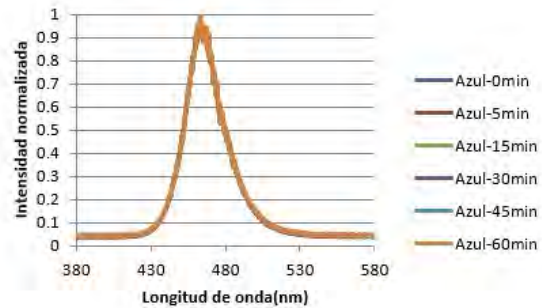
(a) LED Rojo-633nm



(b) LED Ambar-590nm



(c) LED Verde-525nm



(d) LED Azul-465nm

Figura 4.1: Estabilidad de los picos de emisión de los LEDs empleados.

### 4.1.2. Repetibilidad del posicionamiento.

Para confirmar el correcto posicionamiento de los LEDs se realizó un procesamiento de imágenes como se explicó en la sección 3.2. Para ello se aplicó un igual número de pasos para la distancia entre LEDs de modo que se obtuvieron las siguientes coordenadas para el centroide de todas las imágenes tomadas. Se hicieron un total de 12 corridas en las dos direcciones (Rojo  $\Leftrightarrow$  Azul), para un total de 48 imágenes procesadas. Debido a la correcta colocación de los LEDs en la placa deslizante y a la alineación del sistema óptico, el centroide de las imágenes obtenidas siempre se encuentra en la misma posición.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1.3. Homogeneidad de la mancha de luz de salida.

Las imágenes obtenidas de la mancha de luz de cada uno de los LEDs fueron convertidas en imágenes cuadradas, a las cuales se les extrajo el vector de la diagonal de la matriz que representa a cada una de las imágenes para mostrar su perfil gaussiano.

Luego se sustituyó la pantalla donde se proyectaron las imágenes por un papel milimétrico, de donde se obtuvo una relación de aproximadamente 25 píxeles/mm (ver figura 4.2 ). Considerando que todos los LEDs no son igual de intensos, se determinó el máximo de amplitud para cada uno y se estableció un criterio de análisis de homogeneidad en 1 cm de diámetro para todos los LEDs, de un haz de salida de 3 cm de diámetro. Las figuras 4.3- 4.6 muestran respectivamente las *manchas* proyectadas en la pantalla de cada uno de los LEDs a la salida de la fuente y el perfil gaussiano que representa su vector diagonal.

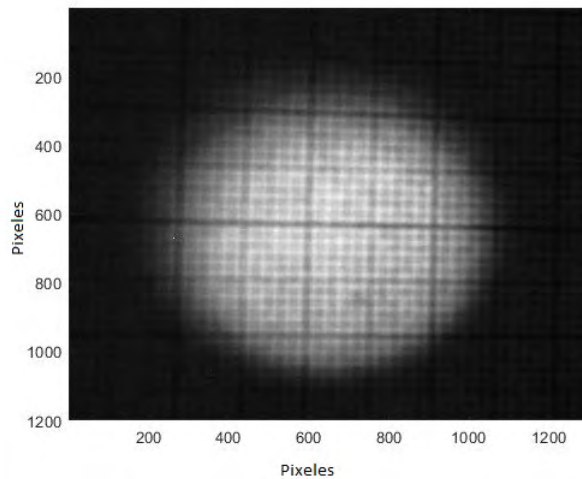


Figura 4.2: Mancha de luz de salida de la fuente proyectada en una pantalla milimétrica.

Cada uno de los perfiles gaussianos tiene marcado en rojo el rango de análisis de homogeneidad para el cono de luz de salida de la fuente.

En la tabla 4.1 se muestran las desviaciones estándar de los niveles de gris en el diámetro más efectivo de la mancha (10 mm ) de los cuatro LEDs de la fuente.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

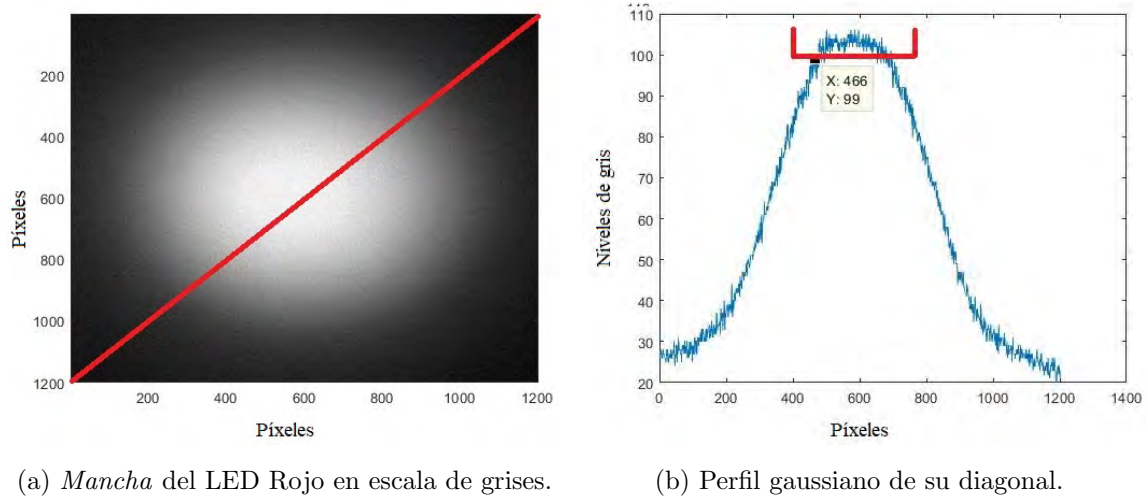


Figura 4.3: Mancha de luz del LED Rojo con su perfil de intensidad.

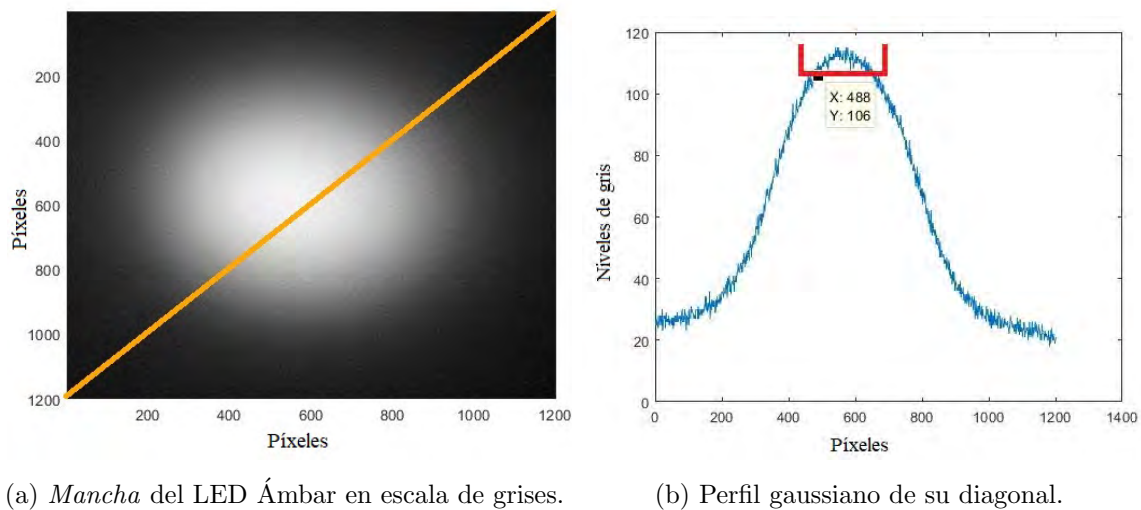


Figura 4.4: Mancha de luz del LED Ámbar con su perfil de intensidad.

### 4.2. Medición de propiedades ópticas.

Para comprobar la factibilidad de la fuente LED en las mediciones de propiedades ópticas se determinó la reflectancia y la transmitancia de tres divisores de haz con las razones de división de 70/30E, 70/30 y 50/50. Estas propiedades ópticas fueron obtenidas con un goniofotómetro diseñado y maquinado en el laboratorio. La calibración del instrumento se realizó con una de

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

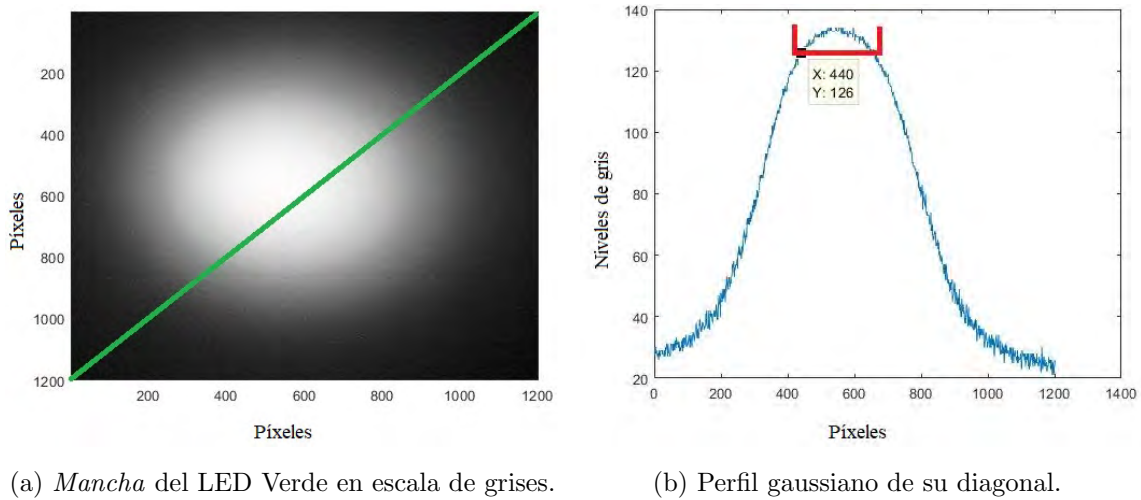


Figura 4.5: Mancha de luz del LED Verde con su perfil de intensidad.

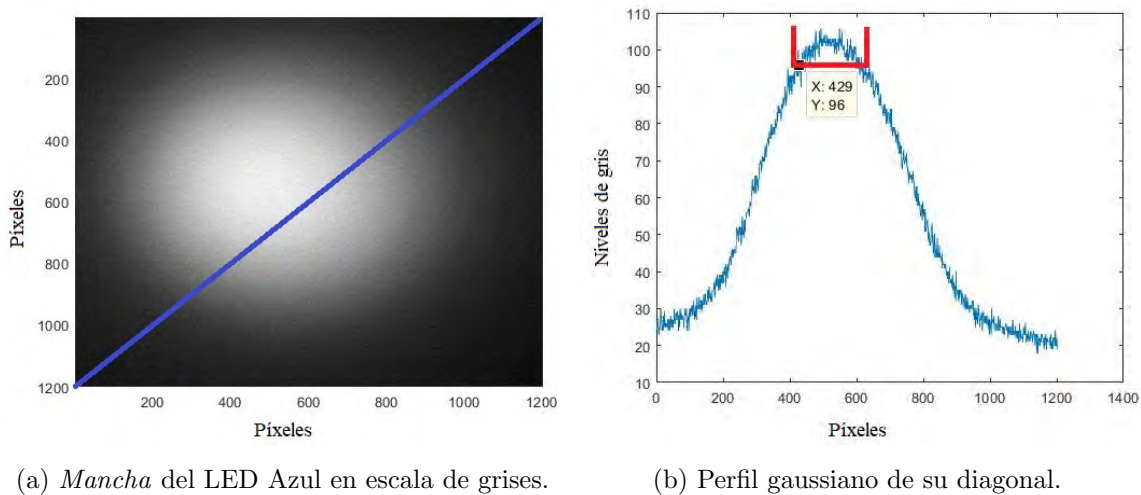


Figura 4.6: Mancha de luz del LED Azul con su perfil de intensidad.

las referencias blancas difusas obtenidas con reflectancia difusa del 99% y que en la Sección 4.3 se especifican sus propiedades. En todos los casos se tomaron 5 mediciones por cada longitud de onda de interés.

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran las curvas de reflectancia y transmitancia respectivamente, con sus barras de error para cada longitud de onda de interés con la fuente de iluminación

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.1: Desviación estándar de los niveles de gris en el diámetro más efectivo de la mancha de luz.

Color (nm)	Desviación estándar (Niveles de gris)
R rojo (633)	2
Ámbar(590)	2
Verde(525)	2
Azul(465)	2

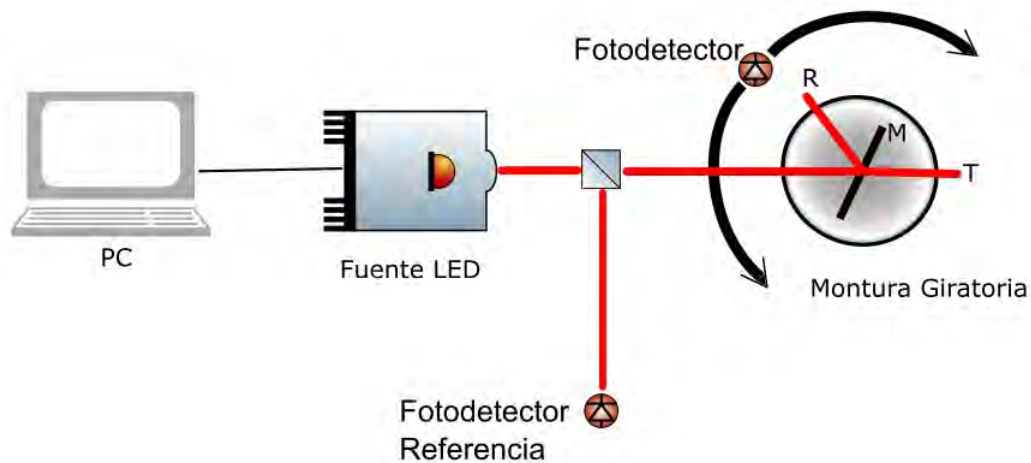


Figura 4.7: Esquema para la obtención de propiedades ópticas. M:muestra, R:haz reflejado, T: haz transmitido.

LED. En las tablas 4.2 y 4.3 se establece una comparación de los resultados obtenidos con la fuente LED contra los obtenidos con el espectrómetro de prueba(Lambda900). Además con el dispositivo multiangular diseñado y fabricado en el laboratorio se hicieron comparaciones entre la fuente LED y la fuente espectral QTH.

De los datos mostrados se obtiene una diferencia promedio en la medición con respecto a la realizada con el espectrómetro Lambda 900 de 1.06 % en reflectancia y en transmitancia

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

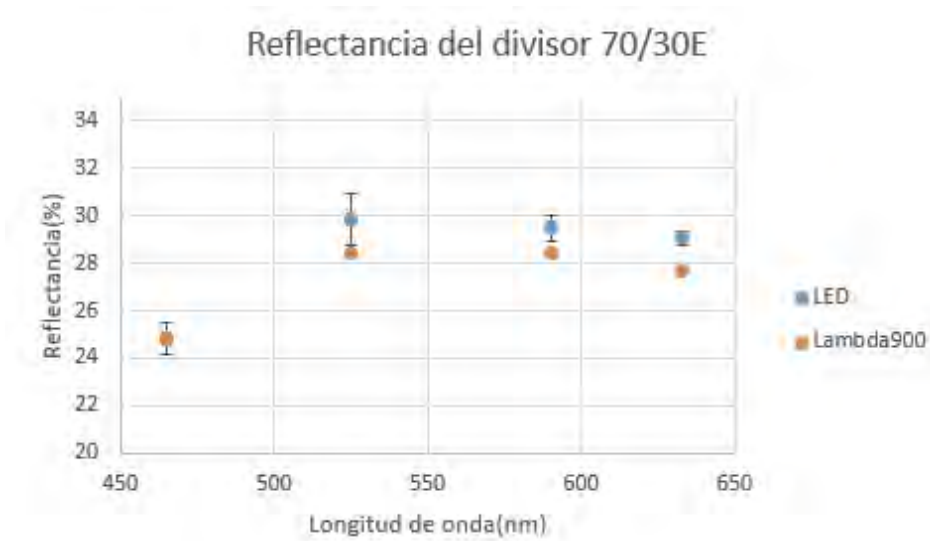


Figura 4.8: Reflectancia del divisor 70/30E.

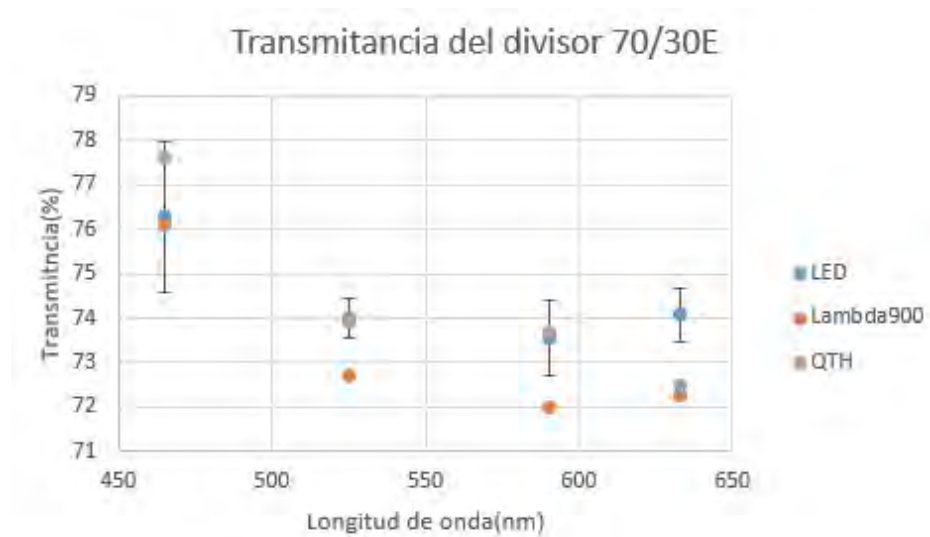


Figura 4.9: Transmitancia del divisor 70/30E.

1.27 % para el Lambda 900 y 0.79 % para la fuente QTH.

Para el segundo divisor(70/30) se obtuvo un error en la medición de reflectancia y transmitancia como se muestran en las tablas 4.4 y 4.5, de modo que se tiene un error absoluto promedio de reflectancia y transmitancia respectivamente para Lambda 900 de 0.2 % y 1.7 %. Mientras que estableciendo comparaciones con la fuente QTH las diferencias absolutas son



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Tabla 4.2: Reflectancia obtenida con el divisor 70/30E.

Longitud de onda(nm)	Reflectancia Prom.(%)	Incertidumbre (%)	LED vs QTH (%)	LED vs Lambda900 (%)
465	24.84	0.65	1.34	0.04
525	29.88	1.1	2.1	1.48
590	29.48	0.55	1.1	1.08
633	29.06	0.3	1.56	1.6

Tabla 4.3: Transmitancia obtenida con el divisor 70/30E.

Longitud de onda(nm)	Transmitancia Prom.(%)	Incertidumbre (%)	LED vs QTH (%)	LED vs Lambda900 (%)
465	76.288	1.7	1.31	0.18
525	74	0.45	0.1	1.3
590	73.54	0.85	0.16	1.53
633	74.08	0.44	1.58	1.8

de 0.15 % para reflectancia y 0.79 % para transmitancia. Las figuras 4.10 y 4.11 muestran las barras de error para los resultados anteriormente descritos.

Para el divisor 50/50 se obtuvo un error en la medición de reflectancia y transmitancia como se reflejan en las tablas 4.6 y 4.7 y en las figuras 4.12 y 4.13 respectivamente. La diferencia promedio en la medición con respecto a la realizada con el espectrómetro Lambda 900 es de 0.26 % y con respecto a las mediciones realizadas con la fuente QTH se obtuvo una diferencia de 0.99 % en reflectancia. Con respecto a la transmitancia se obtuvo una diferencia para el espectrómetro Lambda 900 y la fuente QTH de 0.64 % y 0.72 % respectivamente.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

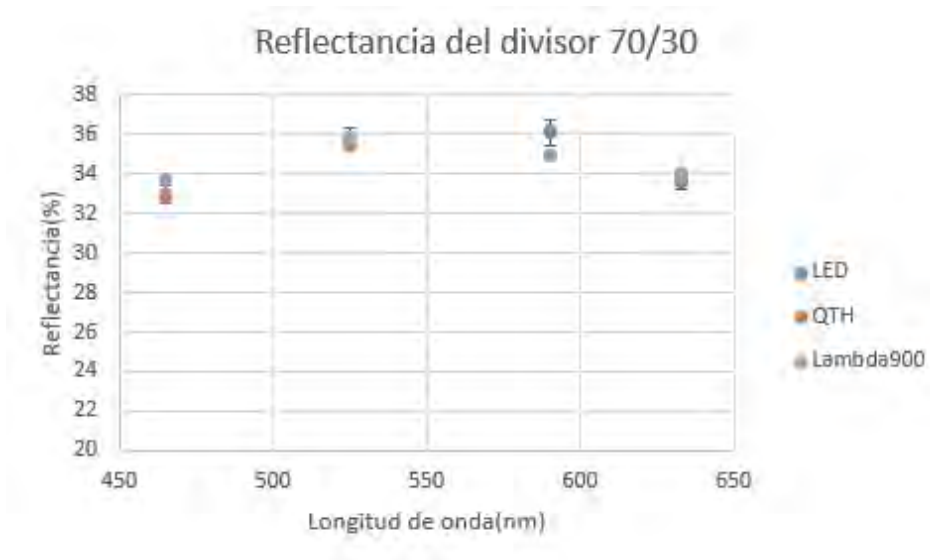


Figura 4.10: Reflectancia del divisor 70/30.

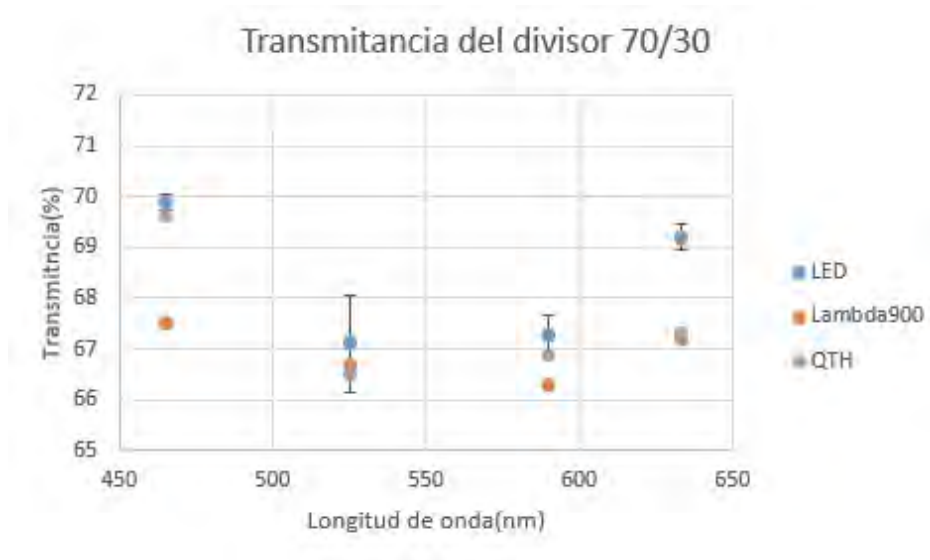


Figura 4.11: Transmitancia del divisor 70/30.

### 4.2.1. Estabilidad de las mediciones

Para hacer un análisis de la estabilidad de las mediciones obtenidas con la fuente LED se midió la transmitancia del divisor 50/50 por un periodo de tiempo de 60 minutos en intervalos de 5 minutos. Debido a que el LED verde es el que más se desplaza en su pico de emisión

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Tabla 4.4: Reflectancia obtenida con el divisor 70/30.

Longitud de onda(nm)	Reflectancia Prom.(%)	Incertidumbre (%)	LED vs QTH (%)	LED vs Lambda900 (%)
465	32.95	0.465	0.154	0.746
525	35.84	0.5	0.44	0.038
590	36.1	0.65	1.2	1.21
633	33.62	0.4	0.38	0.28

Tabla 4.5: Transmitancia obtenida con el divisor 70/30.

Longitud de onda(nm)	Transmitancia Prom.(%)	Incertidumbre (%)	LED vs QTH (%)	LED vs Lambda900 (%)
465	69.89	0.15	0.29	2.39
525	67.1	0.95	0.6	0.4
590	67.28	0.4	0.38	0.98
633	69.2	0.25	1.9	2.0

para este mismo periodo de prueba, las mediciones de transmitancia se realizaron para esta longitud de onda(525nm). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.8. En la figura 4.14 no se aprecian derivas, esto debido a que la estabilización de los LEDs es inmediata, condición esta que no se presenta en las fuentes espectrales tradicionales. La desviación estándar obtenida es de 0.35 % en el intervalo de medición.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

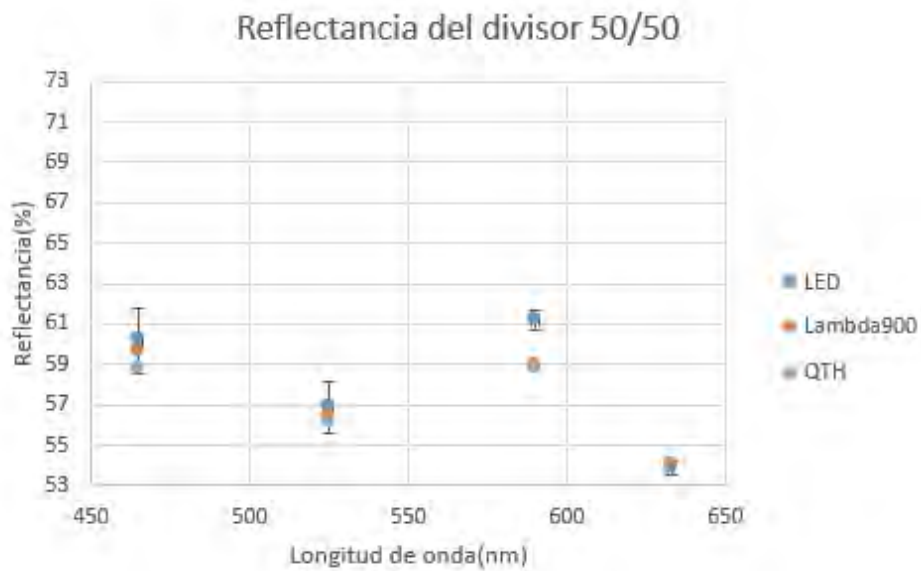


Figura 4.12: Reflectancia del divisor 50/50.

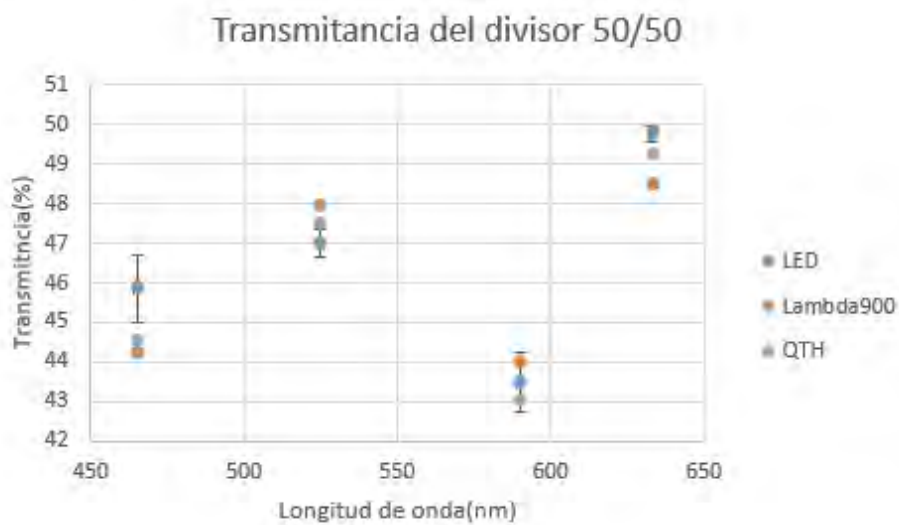


Figura 4.13: Transmitancia del divisor 50/50.

### 4.3. Referencia blanca difusa

El fabricante de estándares de reflectancia difusa, Labsphere, reporta que todos los materiales de Spectralon son químicamente inertes con una reflectancia de hasta el 99%. Además son

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Tabla 4.6: Reflectancia obtenida con el divisor 50/50.

Longitud de onda(nm)	Reflectancia Prom.(%)	Incertidumbre (%)	LED vs QTH (%)	LED vs Lambda900 (%)
465	60.16	1.65	1.36	0.56
525	56.87	1.3	0.67	0.47
590	61.22	0.5	2.42	2.27
633	53.88	0.35	0.98	0.22

Tabla 4.7: Transmitancia obtenida con el divisor 50/50.

Longitud de onda(nm)	Transmitancia Prom.(%)	Incertidumbre (%)	LED vs QTH (%)	LED vs Lambda900 (%)
465	45.85	0.875	1.35	1.65
525	47	0.35	0.5	0.9
590	43.48	0.75	0.48	0.51
633	49.74	0.2	0.54	1.28

ópticamente planos con  $\pm 4\%$  en el rango de 250-2500nm y  $\pm 1\%$  sobre la región fotópica del espectro. La figura 4.15 muestra la curva de reflectancia reportada para un estándar de reflectancia del 99%.

Como se mencionó en la Sección 3.5, se emplearon 4 polvos de diferentes tamaños de partículas, para los cuales se fabricaron pastillas de distintos valores de densidad. En la figura 4.16 se puede observar las curvas de reflectancia obtenidas para pastillas con densidades entre  $1.09g/cm^3$  y  $1.46g/cm^3$ , con el objetivo de alcanzar valores de reflectancia cercanos al 99% y una curva de respuesta lineal en el espectro visible. En la tabla 4.9 se muestran las condiciones bajo las cuales se obtuvieron tales resultados.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

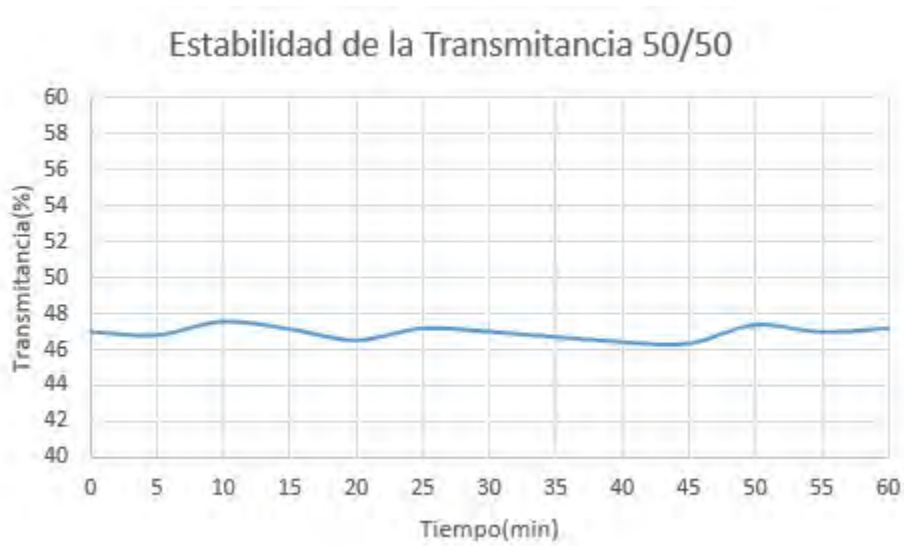


Figura 4.14: Estabilidad de la Transmitancia para el divisor de haz 50/50.

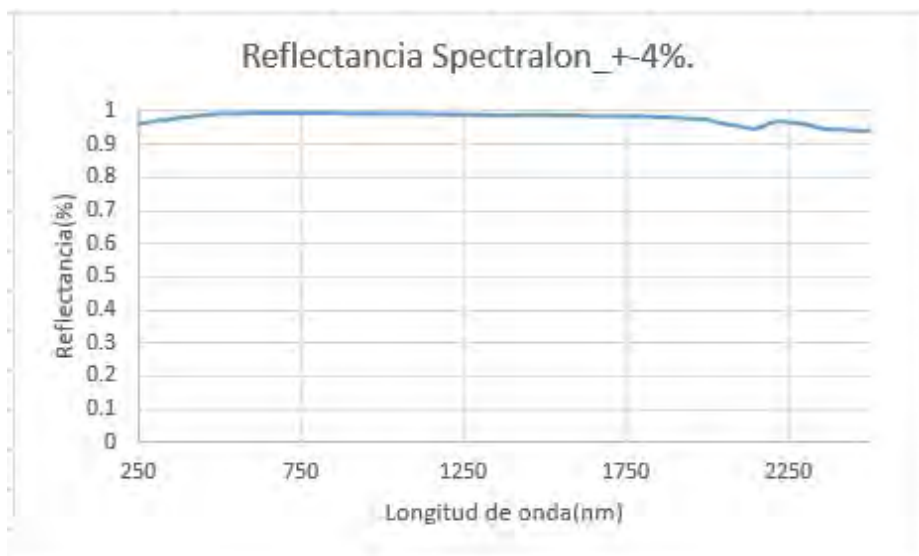


Figura 4.15: Curva de Reflectancia reportada por Labsphere para estándares de Spectralon de 99 %.

En la tabla 4.9 puede apreciarse el valor de densidad para el cual se logró una reflectancia promedio del 99.17% con una desviación estándar de 0.866 en el rango de 350nm-750nm. Además puede notarse el efecto de la contaminación al momento de la fabricación de la referencia. Este es el caso de las muestras S3 y S8 bajo las mismas condiciones de densidad,

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Tabla 4.8: Transmitancia obtenida con el divisor 50/50 en 60 minutos.

Tiempo (min)	Transmitancia (%)	Valor esperado (%)
0	47	47.5
5	46.8	47.5
10	47.6	47.5
15	47.16	47.5
20	46.5	47.5
25	47.2	47.5
30	47	47.5
35	46.7	47.5
40	46.4	47.5
45	46.6	47.5
50	47.4	47.5
55	46.98	47.5
60	47.2	47.5

sin embargo, sus reflectancia promedio son notablemente distintas debido a que se mancharon durante la etapa de horneado.

En la figura 4.17 se muestran las curvas de reflectancia obtenidas para un tamaño de grano de  $35\mu\text{m}$ , en las cuales se puede apreciar una adecuada linealidad para densidades entre  $1.48\text{-}2\text{g}/\text{cm}^3$ , los valores obtenidos de reflectancia son entre el 95.8-96.85 %. También es observable que para muestras de la misma densidad pero de distinto grosor los valores de reflectancia son notablemente diferentes, si tomamos las muestras S2 y S7 estas tienen una densidad de  $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ , con la salvedad que S7 tiene un grosor de 2.5mm y S2 de 5mm, en ambos casos no se observa contaminación, por lo que su diferencia de reflectancia se ve afectada por el

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

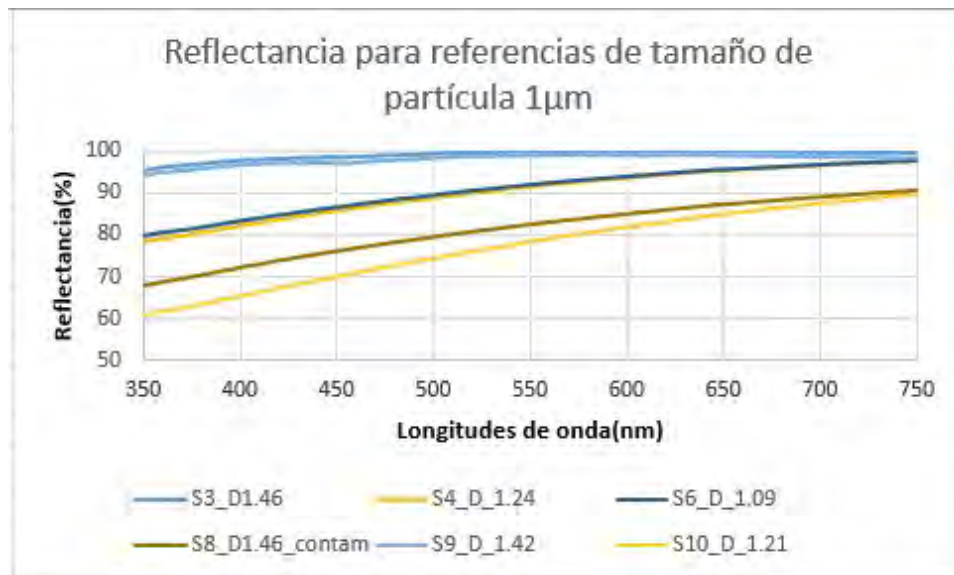


Figura 4.16: Reflectancia obtenida para tamaño de  $1\mu\text{m}$ .

grosor de la muestra.

Para muestras con densidades entre  $0.99\text{-}1.42\text{g}/\text{cm}^3$  los valores de reflectancia están por debajo del 95% y la respuesta no es plana, este efecto es apreciable para las muestras S5, S12, S13. Todas las condiciones en las cuales se obtuvieron estos resultados se recogen en la Tabla 4.10.

Para los polvos de teflón con tamaño de partículas de  $200\mu\text{m}$  y mayores de  $350\mu\text{m}$  se obtienen curvas más planas, aunque los valores de reflectancia promedio no superan el 98%. Para las muestras de  $200\mu\text{m}$  el mejor valor de reflectancia (97.29%) se obtuvo con una densidad de  $1.13\text{g}/\text{cm}^3$  (S1).

Sin embargo para densidades por encima de  $1.7\%$  (S7) los valores de reflectancia disminuyen hasta valores de 83%, que al ser incrementada la densidad estos valores de reflectancia disminuyen aún más, como es el caso de la muestra S8 con densidad de  $1.87\text{g}/\text{cm}^3$  y una reflectancia de 74.36%. En ambos casos las muestras resultan con una terminación traslúcida.

En el caso de las muestras con tamaño de partículas de  $350\text{-}600\mu\text{m}$  se obtienen buenos resul-



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.9: Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de  $1\mu\text{m}$ .

Muestra	Densidad ( $g/cm^3$ )	Reflectancia Prom. (%)	Grosor (mm)	Desviación estándar (%)
S3	1.46	99.17	3.5	0.866
S4	1.24	90.23	4	5.6
S6	1.09	90.8	4	5.2
S8-c	1.46	81.32	3	6.47
S9	1.42	97.95	3	1.1
S10-c	1.21	77.23	3.5	8.57

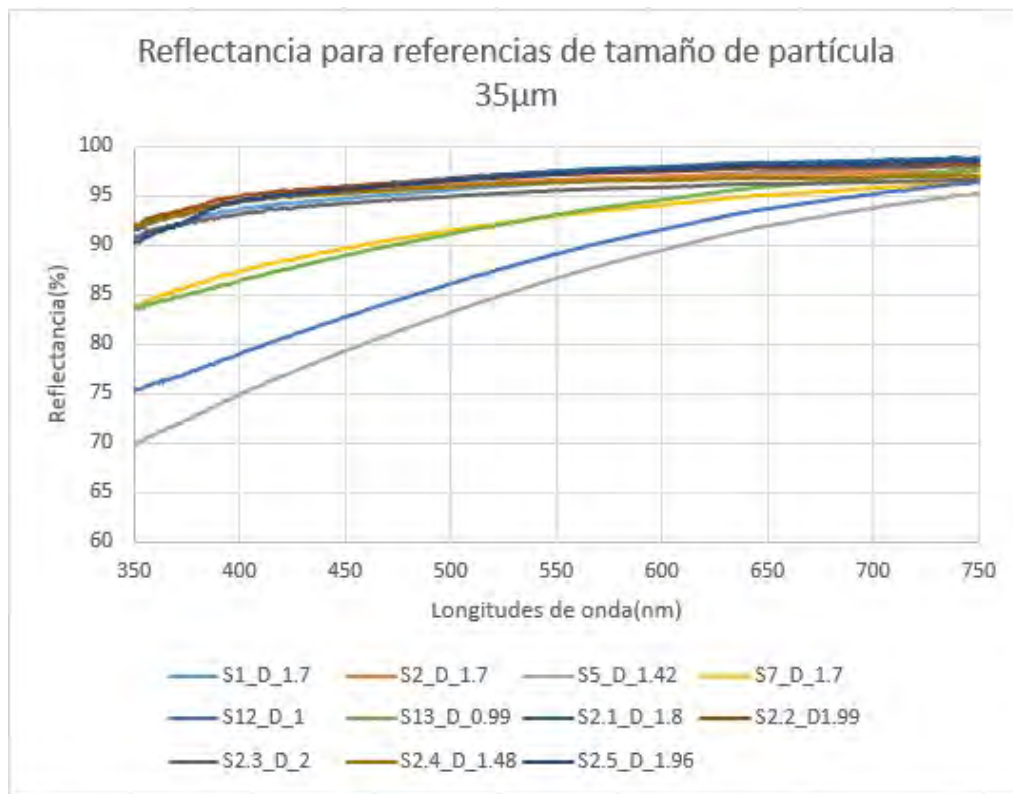


Figura 4.17: Reflectancia obtenida para tamaño de  $35\mu\text{m}$ .

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Tabla 4.10: Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de  $35\mu\text{m}$ .

Muestra	Densidad ( $g/cm^3$ )	Reflectancia Prom. (%)	Grosor (mm)	Desviación estándar (%)
S1	1.7	95.81	5	1.76
S2	1.7	96.09	5	1.36
S5	1.42	85.28	6	7.46
S7	1.7	92.11	2.5	3.4
S12	1.0	87.85	8	6.28
S13	0.99	92.23	5	4.1
S2-1	1.8	96.85	4.5	1.8
S2-2	1.99	96.54	2.2	1.41
S2-3	2	95.02	2.1	1.41
S2-4	1.48	95.8	2	1.22
S2-5	1.96	96.5	8.5	1.89

tados para una densidad comprendida entre  $1.53\text{-}1.57\text{ g/cm}^3$ , donde la reflectancia alcanza valores de 97.89 %.

Comparando la mejor referencia obtenida en el laboratorio(S3.D1.46) y el estándar tomado como referencia(figura 4.15) en el rango del espectro visible se obtienen resultados muy similares.Estos pueden ser observados en la figura 4.20.

Un aspecto muy importante a analizar en las muestras obtenidas es la distribución angular de su intensidad reflejada. Para ello se tomaron 4 muestras con distinto tamaño de partícula y haciendo incidir un haz de luz de  $525\text{nm}$  se hizo un barrido alrededor de la muestra de  $10^\circ\text{-}90^\circ$ . En todos los casos se realizó un ajuste a una superficie Lambertiana ideal. Obteniendo un factor de correlación lineal superior al 95 % en todos los casos. En la figura 4.21 se muestra la distribución angular de la luz reflejada por la muestra S3 de  $1\mu\text{m}$  con densidad igual a

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.11: Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de  $200\mu\text{m}$ .

Muestra	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Reflectancia Prom. (%)	Grosor (mm)	Desviación estándar (%)
S1	1.13	97.29	13	0.69
S5	1.09	95.64	3.5	1.28
S6	0.99	96.34	3.87	0.68
S7-Trasl	1.7	83.13	3.5	2.47
S8-Trasl	1.87	74.36	4	4.25
S9	1.1	92.43	6.79	0.74
S10	1.8	91.43	4.58	0.66

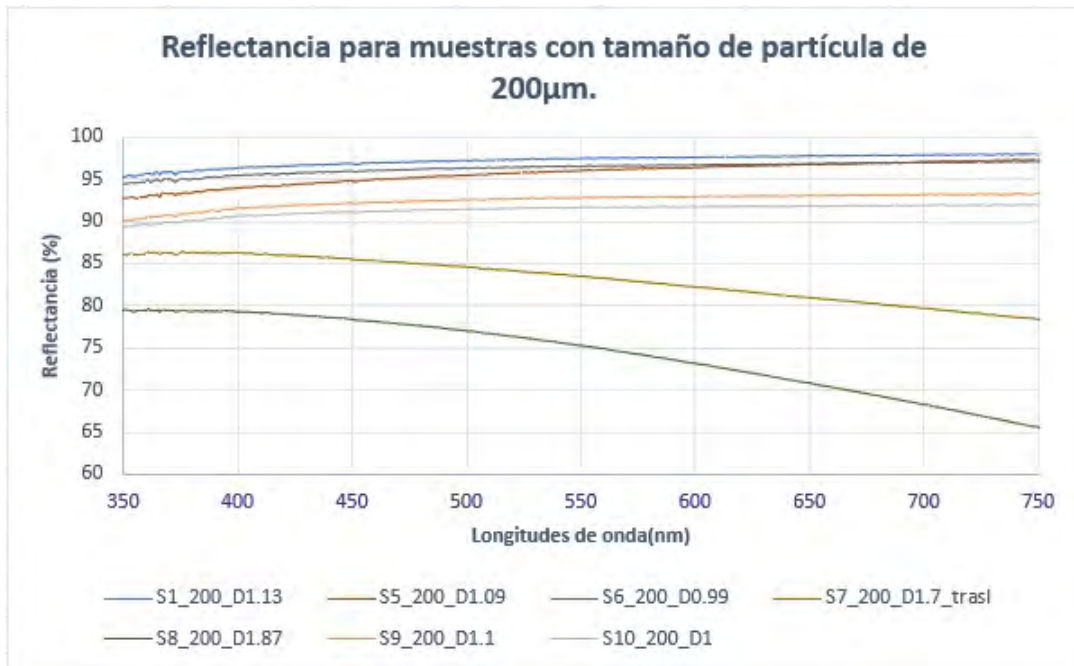


Figura 4.18: Reflectancia obtenida para tamaño de  $200\mu\text{m}$ .

$1.46 \text{ g}/\text{cm}^3$ . En la figura 4.22 para la muestra S2.1 de  $35 \mu\text{m}$  con densidad igual a  $1.8 \text{ g}/\text{cm}^3$ . En la figura 4.23 para la muestra S1 de  $200 \mu\text{m}$  con densidad igual a  $1.13 \text{ g}/\text{cm}^3$ . En la figura

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.12: Condiciones para pastillas de tamaño de partícula de más de  $350\mu\text{m}$ .

Muestra	Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Reflectancia Prom. (%)	Grosor (mm)	Desviación estándar (%)
S2	1.54	97.27	4.6	0.57
S3	1.53	97.89	2.85	0.47
S4	1.57	97.89	2.85	0.47

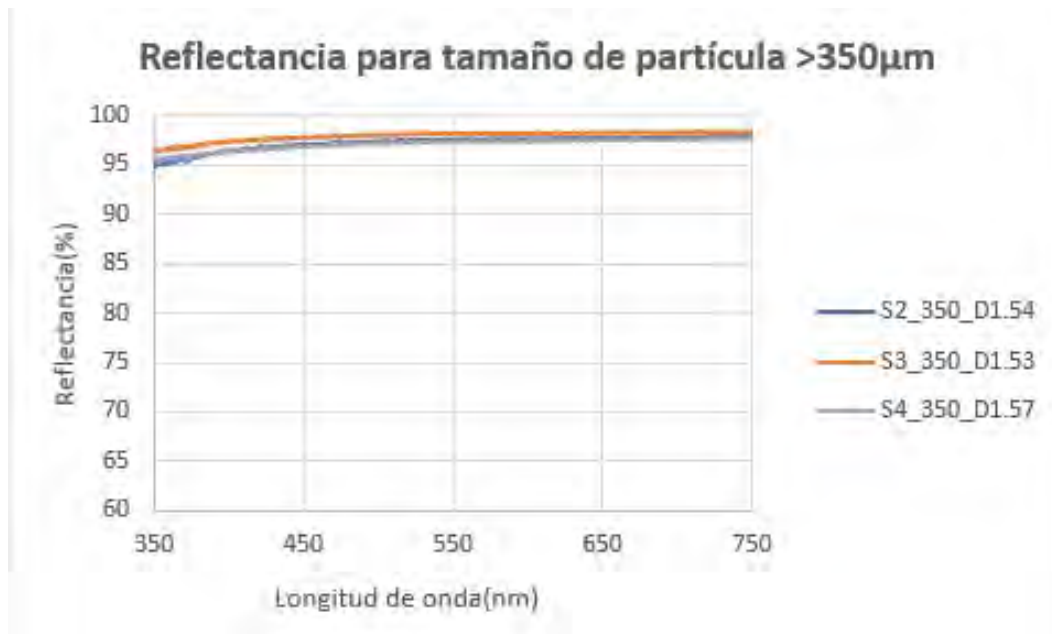


Figura 4.19: Reflectancia obtenida para tamaño mayor a  $350\mu\text{m}$ .

4.24 para la muestra S3 de  $350\mu\text{m}$  con densidad igual a  $1.53\text{ g}/\text{cm}^3$ .

### 4.3.1. Análisis microscópico de las pastillas.

Para comprender el efecto del tratamiento térmico de las pastillas de polvo de Teflón se realizó un análisis microscópico de éstas. La figura 4.25 muestra la porosidad para una pastilla de tamaño de partícula de polvo de  $35\mu\text{m}$  con una reflectancia del 96.54 % con tratamiento

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

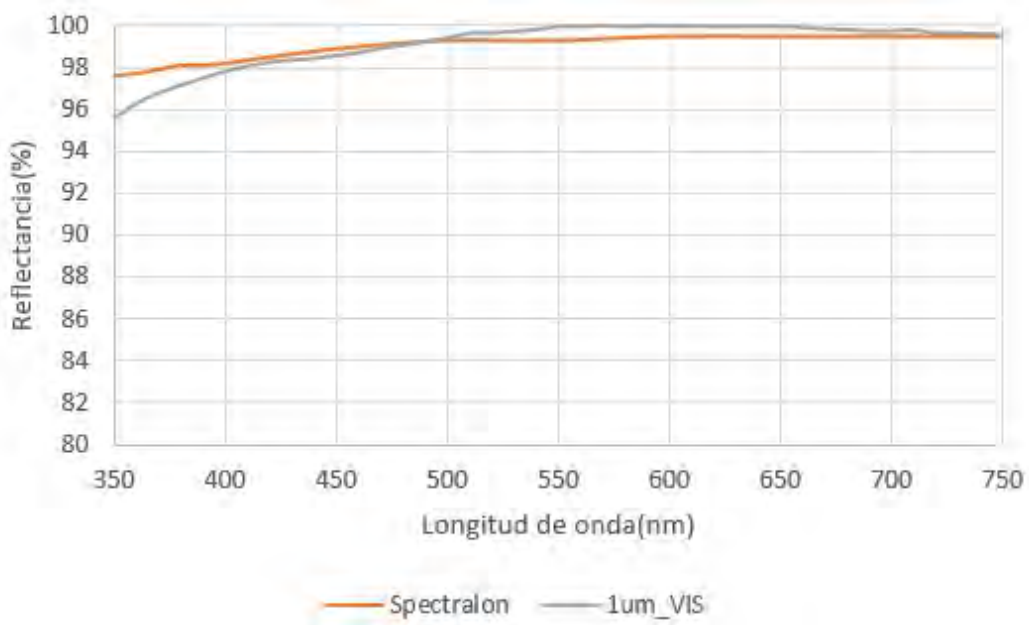


Figura 4.20: Comparación entre la referencia de Labsphere y la lograda en el laboratorio.

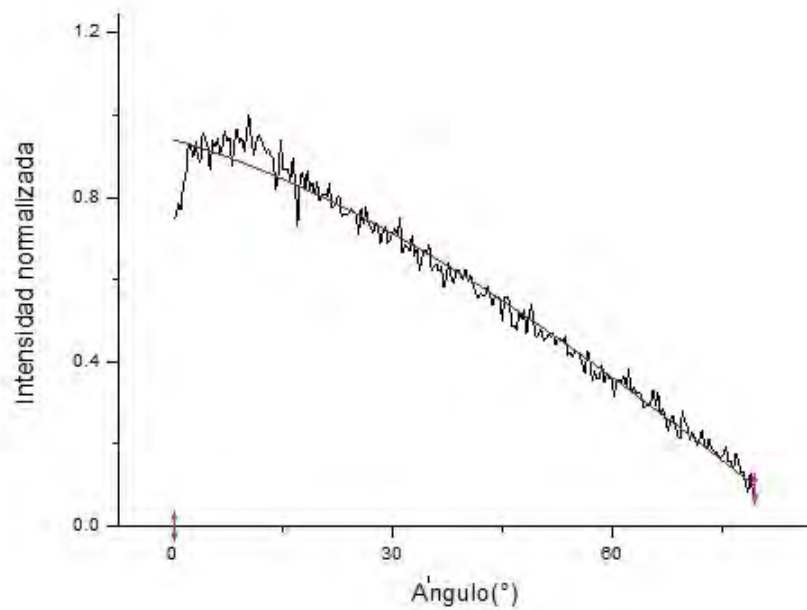


Figura 4.21: Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de  $1\mu\text{m}$  con  $R^2=0.9775$

térmico(S2-2), mientras que en la figura 4.26 se observa la superficie de una pastilla de polvo solamente prensado(S9) con reflectancia del 92.43 %. El análisis se llevó a cabo con un micros-

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

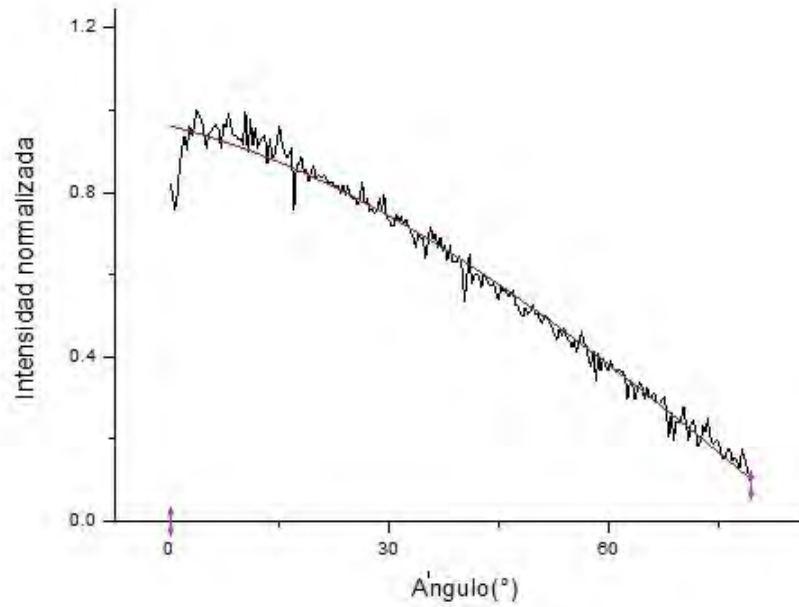


Figura 4.22: Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de  $35\mu\text{m}$  con  $R^2=0.9818$

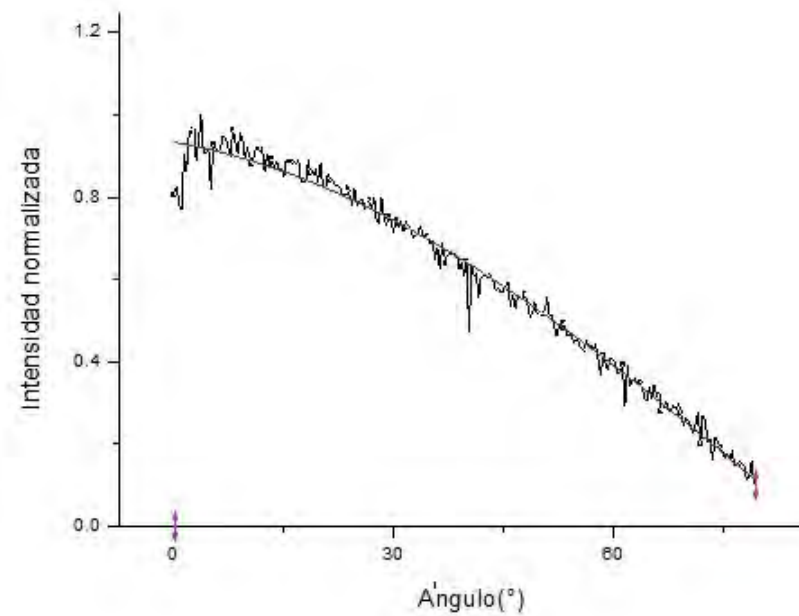


Figura 4.23: Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de  $200\mu\text{m}$  con  $R^2=0.9841$

copio electrónico de barrido(SEM) con una amplificación de 500X. El proceso de horneado se realiza para lograr la coalescencia de las partículas de polvo previamente compactados.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

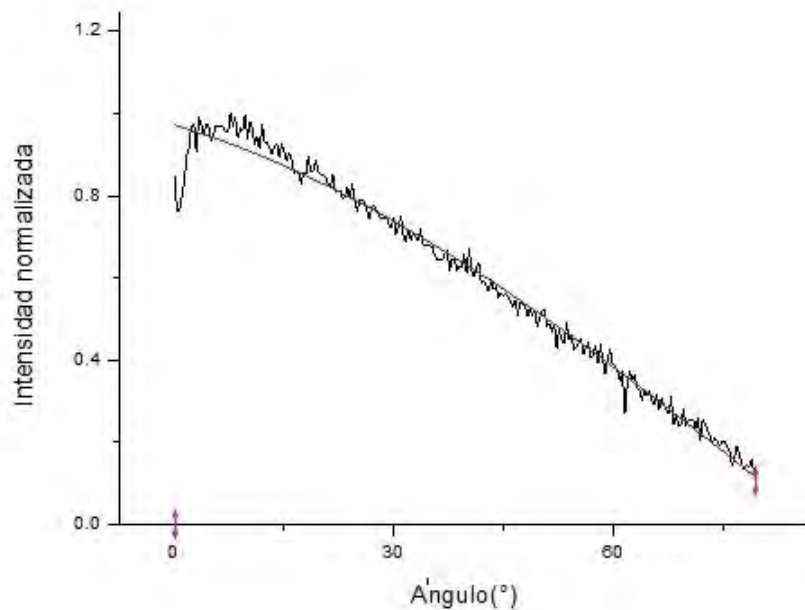


Figura 4.24: Distribución angular de la luz reflejada por la referencia de  $350\mu\text{m}$  con  $R^2=0.9810$

De manera que se forma entre ellas una unión (cuello) con diámetro menor al tamaño de las partículas de polvo. Con este proceso se logra una superficie más compacta y homogénea, sin modificar el tamaño de las pastillas. Al realizar el proceso de forma lenta y a una temperatura menor a la de fusión, se evitan tensiones térmicas y fracturas del material. Además se garantiza que las pastillas mantengan sus propiedades de reflectancia difusa.

El material a estudiar finalmente es una muestra del panel de instrumento de un vehículo. Se espera que el comportamiento de todo el material sea similar, por lo que con la caracterización de una sola muestra debe ser suficiente. En este caso se toma una porción del direccional (figura 4.27), por ser la sección más manejable para las mediciones.

La caracterización final estuvo en la determinación de la Reflectancia Difusa y Especular, Transmitancia Directa y Difusa y la Absorbancia en las 4 longitudes de onda de interés. Además estos valores fueron obtenidos para las geometrías de incidencia de  $i(^{\circ})$  y a un barrido de lectura de  $10^{\circ}$  hasta  $90^{\circ}$ . Estos resultados serán usados para alimentar el programa de simulación de apariencia Speos. Las figuras 4.28 y 4.29 muestran los resultados obtenidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

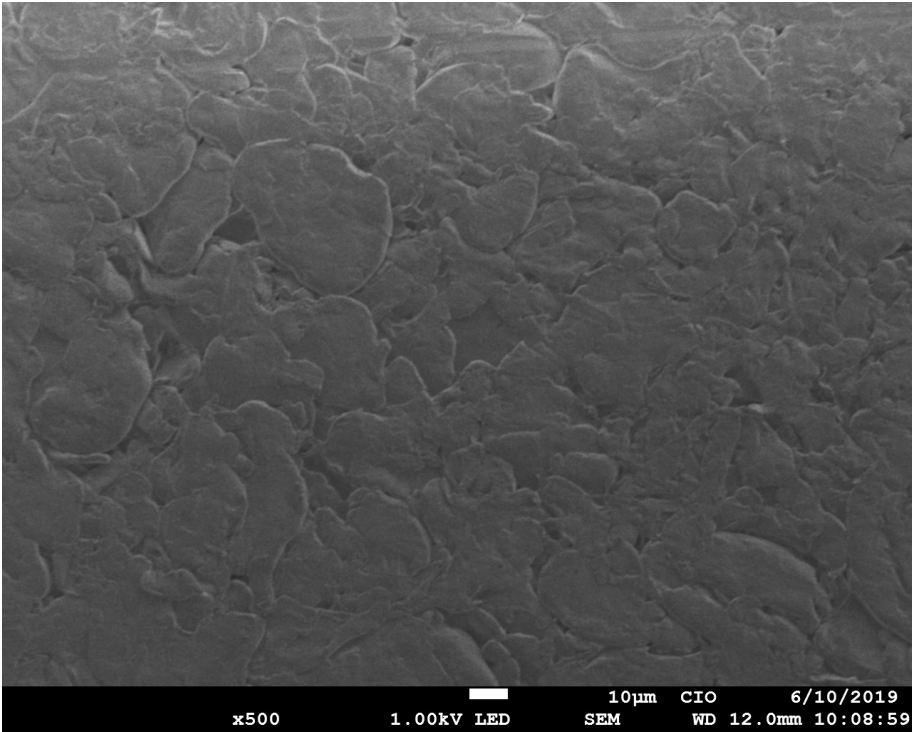


Figura 4.25: Imágen microscópica de una pastilla de Teflón de 35µm con proceso térmico.

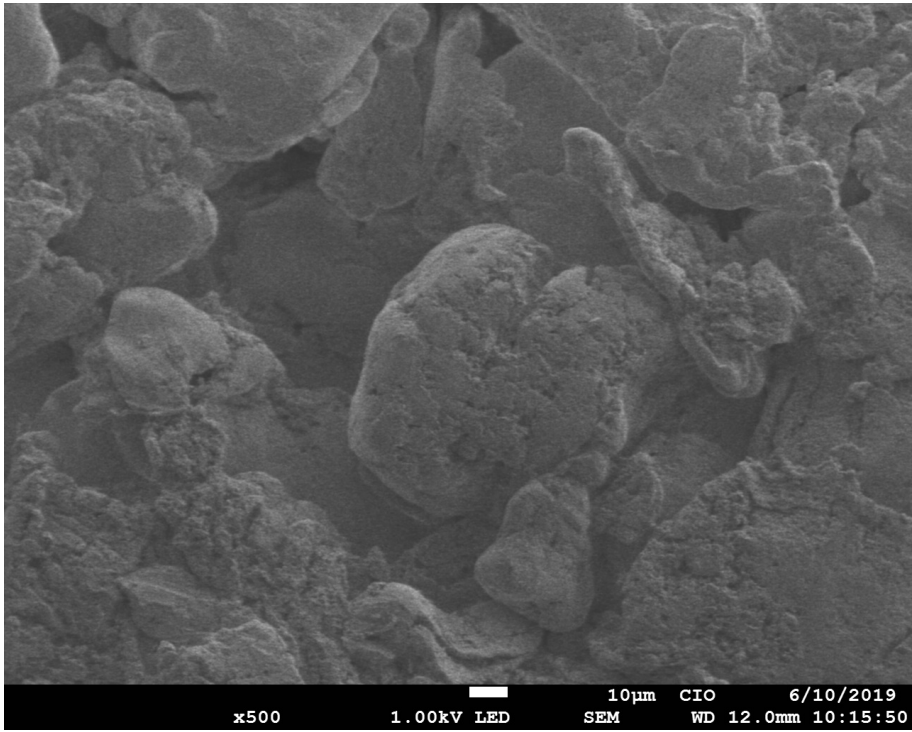


Figura 4.26: Imágen microscópica de una pastilla de Teflón de 350µm sin tratamiento térmico.



#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 4.27: Direccional tomado como muestra del panel de instrumentos de un vehículo.

$i(^{\circ})$	465nm				525nm		
		R(%)	T(%)	A(%)	R(%)	T(%)	A(%)
10	Spec./Direc	13.4	1.1	81.48	10	0.1	85.9
	Difusa	0	4.02		0	4	
	(%) Gauss	99	22		100	1	
	(%) Lamb	1	78		0	99	
20	Spec./Direc	13.25	1	82.15	11.9	0.11	84.29
	Difusa	0	3.6		0	3.7	
	(%) Gauss	99	20		99	1	
	(%) Lamb	1	80		1	99	
30	Spec./Direc	13.1	0.8	82.1	11.8	0.1	85.3
	Difusa	1.2	2.8		0	2.8	
	(%) Gauss	98	0		99	2	
	(%) Lamb	2	100		1	98	
40	Spec./Direc	13.4	0.56	82.67	12.4	0.1	85.2
	Difusa	1.3	2.07		0.1	2.2	
	(%) Gauss	96	1		98	0	
	(%) Lamb	4	99		2	100	

Figura 4.28: Propiedades ópticas de la muestra para 465nm y 525nm.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

$i(^{\circ})$		590nm			630nm		
		R(%)	T(%)	A(%)	R(%)	T(%)	A(%)
10	Spec./Direc	13.9	1.1	81.6	9.2	1	83.85
	Difusa	0.2	3.2		1	4.95	
	(%) Gauss	96	2		99	1	
	(%) Lamb	4	98		1	99	
20	Spec./Direc	13.3	1	81.7	9.4	0.8	85.6
	Difusa	1	3		0	4.2	
	(%) Gauss	99	1		99	1	
	(%) Lamb	1	99		1	99	
30	Spec./Direc	12.3	0.9	84.25	9.8	0.6	86.2
	Difusa	0.1	2.45		0	3.4	
	(%) Gauss	98.2	1.9		100	1	
	(%) Lamb	1.8	98.1		0	99	
40	Spec./Direc	11.3	0.5	86.3	11.1	0.5	85.8
	Difusa	0.2	1.7		0.1	2.5	
	(%) Gauss	94	1		98	1	
	(%) Lamb	6	99		2	99	

Figura 4.29: Propiedades ópticas de la muestra para 590nm y 633nm.

# Capítulo 5

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### Conclusiones

El diseño y construcción de un sistema optomecatrónico de iluminación LED para la caracterización espectroscópica de superficies automotrices fue desarrollado en este trabajo. El uso de esta fuente de iluminación crea una alternativa viable y económica para aplicaciones espectroscópicas. El sistema está diseñado con dispositivos semiconductores cuasimonocromáticos LEDs. Las fuentes comerciales a base de estos elementos no cuentan con las longitudes de onda implicadas en la caracterización de superficies automotrices, o en su defecto, las longitudes de onda que permiten combinar en sus arreglos ópticos no contemplan estas cuatro longitudes de onda empleadas en este trabajo (465nm, 525nm, 590nm y 633nm). Debido a las condiciones de monocromaticidad de los LEDs, este módulo de iluminación permite prescindir de instrumentación como las fuentes espectrales tradicionales y monocromadores en las mediciones. Los rangos de error de la fuente diseñada con respecto a la fuente de referencia QTH no superan el 1 %, para una aplicación final que maneja tolerancias de error en la me-

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

dición del 5 %. El sistema mecánico en el que se basa esta fuente permite ser adaptada para aplicaciones donde se requieran mayor cantidad de longitudes de onda, con una resolución de  $30\mu\text{m}/\text{paso}$  con oportunidad de mejorar estos valores. Se comprobó que los LEDs utilizados tienen una estabilidad adecuada para el tipo de aplicación en la que son empleados. Este tipo de fuentes basadas en LEDs tienen una velocidad de conmutación alta, y no requieren de un tiempo de estabilización. Debido a esto las mediciones de las propiedades ópticas no se ven afectadas por la deriva de la fuente de radiación, obteniendo una desviación estándar del 0.35 % en 1 hora de prueba.

Por otro lado, se diseñó un kit de fabricación de referencias blancas difusas funcional para bajas presiones aplicadas en el proceso. Con esto se demostró que se necesitan condiciones ideales para evitar la contaminación de las muestras durante la fabricación. Para obtener resultados repetitivos en cuanto a reflectancia la densidad es un factor importante, y va acompañado del tamaño de partícula de polvo que se utilice. En las mediciones de reflectancia es indispensable el uso de un estándar de reflexión para calibrar las mediciones y de este modo incrementar la confiabilidad de las mismas.

### Trabajo Futuro

- Diseñar una tarjeta electrónica completa que incluya todo el control y la habilitación de los LEDs con las necesidades específicas de la aplicación, con el fin de independizarla del Arduino Mega.
- Fabricar el troquel de aluminio en Acero inoxidable con el objetivo de poder aplicar mayores presiones en el proceso de fabricación de los estándares en caso de ser necesario.
- Incrementar el número de diodos emisores de luz de diferentes longitudes de ondas de la fuente hasta alcanzar su capacidad total, cubriendo la mayor parte del espectro VIS.
- Diseñar un sistema de realimentación de modo tal que disminuyan las variaciones de intensidad a la salida de la fuente.

# Bibliografía

- [1] Alejandro Pulido Morán Adriana Barrera Franco. La industria automotriz mexicana: Situación actual, retos y oportunidades. <https://www.promexico.mx/documentos/biblioteca/industria-automotriz-mexicana.pdf>, 2016. Accedido 15-01-2019.
- [2] Alejandro Pulido Morán Adriana Barrera Franco. Asociación mexicana de la industria automotriz (amia). u.s. embassy mexico city auto industry factsheet. <https://photos.state.gov/libraries/mexico/31032%9/april2014/201401AutoIndustry.pdf>, 2014. Accedido 16-01-2019.
- [3] Marco Antonio González Cantellano and Luis Manuel Montaña Zetina. La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo xxi. *Latin-American Journal of Physics Education*, 9(4):13, 2015.
- [4] Francisco J Burgos-Fernández, Meritxell Vilaseca, Esther Perales, Elisabet Chorro, Francisco M Martínez-Verdú, José Fernández-Dorado, and Jaume Pujol. Validation of a gonio-hyperspectral imaging system based on light-emitting diodes for the spectral and colorimetric analysis of automotive coatings. *Applied optics*, 56(25):7194–7203, 2017.
- [5] John O’M Bockris and Amulya KN Reddy. *Electroquímica moderna*, volume 2. Reverté, 1980.

## Bibliografía

---

- [6] Peter William Atkins and Loretta Jones. *Principios de química: los caminos del descubrimiento*. Ed. Médica Panamericana, 2006.
- [7] JM Albella. *Introducción a la ciencia de materiales: técnicas de preparación y caracterización*. 1993.
- [8] Daniel J Pasto and Carl R Johnson. *Determinación de estructuras orgánicas*. Reverté, 1981.
- [9] Jerry Workman Jr and Art Springsteen. *Applied spectroscopy: a compact reference for practitioners*. Academic Press, 1998.
- [10] Juan J González and Jovani Alberto Jiménez Builes. La robótica como herramienta para la educación en ciencias e ingeniería. *IE Comunicaciones: Revista Iberoamericana de Informática Educativa*, (10):31–36, 2009.
- [11] Daniel Malacara. Color vision and colorimetry: Theory and applications. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, 28(1):77–78, 2003.
- [12] W Erb. Requirements for reflection standards and the measurement of their reflection values. *Applied optics*, 14(2):493–499, 1975.
- [13] William Ross McCluney. *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House, 2014.
- [14] Art Springsteen. Standards for the measurement of diffuse reflectance—an overview of available materials and measurement laboratories. *Analytica chimica acta*, 380(2-3):379–390, 1999.
- [15] Bor-Jiunn Wen. *Reflectance Standards*, pages 1107–1110. Springer New York, New York, NY, 2016.

- [16] Lasse Ylianttila and Josef Schreder. Temperature effects of ptfe diffusers. *Optical materials*, 27(12):1811–1814, 2005.
- [17] Victor R Weidner and Jack J Hsia. Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder. *JOSA*, 71(7):856–861, 1981.
- [18] Gigahertz Optik. Odmp, diffuse reflective synthetic material in grayscale. [https://www.gigahertz-optik.de/en-us/product/ODMP\\_description](https://www.gigahertz-optik.de/en-us/product/ODMP_description)., 2019. Accedido 19 – 04 – 2019.
- [19] Christopher P Ball, Andrew P Levick, Emma R Woolliams, Paul D Green, Martin R Dury, Rainer Winkler, Andrew J Deadman, Nigel P Fox, and Martin D King. Effect of polytetrafluoroethylene (ptfe) phase transition at 19 c on the use of spectralon as a reference standard for reflectance. *Applied optics*, 52(20):4806–4812, 2013.
- [20] Labsphere. Technical guide, reflectance materials and coatings. <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2553/a-guide-to-reflectance-materials-and-coatings.pdf>, 2019. Accedido 27-05-2019.
- [21] CIE CIE. 15: 2004 colorimetry. *Vienna: Central Bureau of the CIE*, 2004.
- [22] National Institute of Standards and Technology. Archived certificates reports of investigation. <https://www-s.nist.gov/srmors/certArchive.cfm>, 2001. Accedido 27-05-2019.
- [23] M Ronnier Luo. The quality of light sources. *Coloration Technology*, 127(2):75–87, 2011.
- [24] DOUGLAS A Skoog, F James Holler, and Stanley R Crouch. Principios de análisis instrumental (sexta edición ed.). *Santa Fe, Mexico: Cengage Learning*, 2008.
- [25] David Warren Ball. The basics of spectroscopy. SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001.
- [26] Arne Valberg. *Light vision color*. John Wiley & Sons, 2007.

- [27] Diario Oficial de la Federación. Norma oficial mexicana nom-030-ener-2016, eficacia luminosa de lámparas de diodos emisores de luz (led) integradas para iluminación general. límites y métodos de prueba. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo = 5469188&fecha = 17/01/2017](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo = 5469188&fecha = 17/01/2017), 2017. Accedido 27-05-2019.
- [28] Ron Lenk and Carol Lenk. *Practical lighting design with LEDs*. John Wiley & Sons, 2017.
- [29] Digikey. Iluminación led para horticultura. <https://www.digikey.es/es/product-highlight/w/wurth-electronics/led-it-grow>, 2019. Accedido 27-05-2019.
- [30] LEDVANCE GmbH. Conocimiento ledvance: los colores de luz led. <https://www.ledvance.es/productos/conocimiento-del-producto/elementos-basicos-led/colores-de-luz-led/index.jsp>, 2019. Accedido 27-05-2019.
- [31] Fred W Billmeyer Jr and Harry K Hammond III. Astm standards on color-difference measurements. *Color Research & Application*, 15(4):206–209, 1990.
- [32] José Manuel Prat Fernández. *DESARROLLO INSTRUMENTAL DE UN MICROSCOPIO MEDIANTE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN LÁSER Y LED*. PhD thesis, Escuela Politécnica Superior. Ferrol. Universidad de Coruña, Junio 2015.
- [33] E Diaz and M Knobl. Prototyping illumination systems with stock optical components. *edmundoptics.com [Internet]. [cited 27 Jul 2015]. Available: http://www.edmundoptics.com/TechSupport/resource\_center/downloads/published\_articles/prototyping-illumination-systems-photonik.pdf*, 2012.
- [34] William Cassarly. Nonimaging optics: concentration and illumination. *Handbook of optics*, 3:20, 2001.
- [35] Bill Cassarly. *NONIMAGING OPTICS: CONCENTRATION AND ILLUMINATION*. 01 2009.



- [36] W.T. WELFORD and R. WINSTON. Chapter 4 - nonimaging concentrators: The compound parabolic concentrator. In W.T. WELFORD and R. WINSTON, editors, *High Collection Nonimaging Optics*, pages 53 – 76, 201 – 221. Academic Press, 1989.
- [37] Terry A Bartlett, Keith H Elliott, and DJ Segler. Optical architectures for combining multiple lamps in light valve projectors, April 8 2003. US Patent 6,545,814.
- [38] Tasso RM Sales. Random microlens array for optical beam shaping and homogenization, February 22 2005. US Patent 6,859,326.
- [39] Stellarnet. Spectroscopy lamps and light sources. <https://www.stellarnet.us/light-sources/>, 2019. Accedido 28-01-2019.
- [40] Newport. Apex2 illumination system. [https://www.newport.com/medias/sys\\_master/images/images/hda/h33/9132030459934/DS-111701\\_APEX2Illumination-System.pdf](https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/hda/h33/9132030459934/DS-111701_APEX2Illumination-System.pdf), 2018. Accedido 27-05-2019.
- [41] Thorlabs. 4-wavelength high-power led source. [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3836](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3836), 2019. Accedido 27-05-2019.
- [42] OSRAM. *TOPLED® First SMT LED with integrated reflector*, 05 2018. Ver. 1.1.
- [43] OSRAM. *TOPLED® TOPLED SMT LED with integrated reflector.*, 05 2018. Ver. 1.6.
- [44] OSRAM. *TOPLED® TOPLED SMT LED with integrated reflector.*, 09 2018. Ver. 1.4.
- [45] NICHIA CORPORATION. *SPECIFICATIONS FOR BLUE LED, Cat.No 111130*, 2012.
- [46] Schneider Electric Motion USA. *NEMA size 17 1.82-phase stepper motor. NEMA17 stepper motor Quick Reference R060210*.
- [47] Allegro MicroSystem, Inc. *DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection*, 2010.
- [48] Alma A Camacho and Cristina Solano. Superficies esféricas aplicadas a la óptica. *Revista Mexicana de Física*, 45(3):315–321, 1999.