



CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN ÓPTICA, A.C.

DISPOSITIVO OPTOMECASTRÓNICO PARA LA ADQUISICIÓN DE MEDIDAS ESPECTROSCÓPICAS CON RESOLUCIÓN ANGULAR



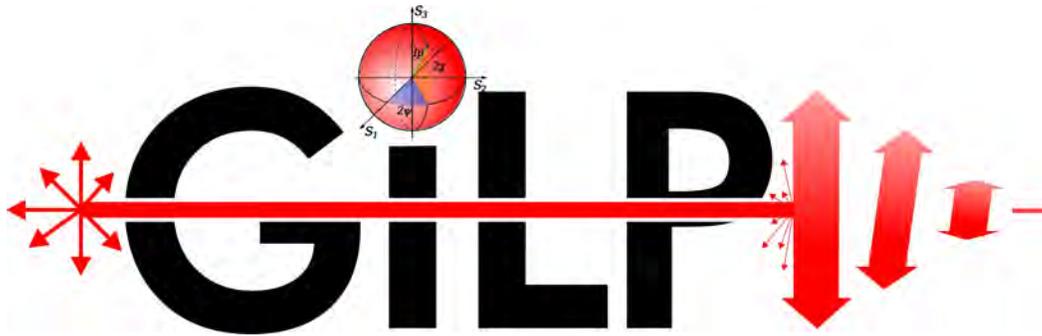
MAESTRÍA EN OPTOMECASTRÓNICA

Versión Definitiva. Incluye cambios sugeridos por revisores

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

Estudiante: Yanier Ojeda Morales, Ing.

Julio de 2019
León, Guanajuato, México



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

Dedicatoria

A mis padres

A mi esposa por su apoyo

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi asesor por su apoyo y oportunos consejos para completar este trabajo.

A CONACYT por el apoyo económico durante mis estudios de maestría

A mis padres por la educación y el cariño que me dieron.

A mi esposa por su dedicación y entrega.

A mis profesores del posgrado por sus enseñanzas.

Además quiero agradecer al M.O. Diego Torres Armenta y al M.O Adrian Coronel por su contribución y apoyo.

A María de los Angeles Sanchez por su ayuda incondicional.

A Marco Troncoso por su apoyo en la manufactura del dispositivo.

Al Dr David Moreno por su contribución como sinodal de la tesis

Al M.O Ulises Mendoza de la Torre por su cooperación en el proyecto.

A mis compañeros por el camino compartido.

Resumen

La percepción visual de la apariencia de un producto es fundamental para capturar la atención del consumidor. Por lo anterior, seleccionar e integrar los materiales que en conjunto logren el efecto deseado de un diseño es una tarea complicada que muchas veces implica una inversión significativa para el fabricante. Por lo anterior, la simulación por computadora de la apariencia de los productos acabados constituye una tendencia que ha cobrado auge en la industria moderna, sobre todo por los beneficios que implica poder valorar este concepto antes de llevar el diseño a una línea de producción. Para efectuar una simulación de apariencia satisfactoria, algunos programas requieren la medición de un conjunto de parámetros ópticos de la materia prima empleada. Este trabajo tiene como objetivo diseñar y construir un dispositivo optomecatrónico con la capacidad de realizar un estudio espectroscópico con resolución angular de varios materiales utilizados en productos relacionados con la industria automotriz.

El instrumento desarrollado puede clasificarse como un goniómetro compacto en el cual pueden ser modificados los ángulos de iluminación y detección a voluntad del usuario. Para ello, el goniómetro consta de dos monturas giratorias accionadas por motores a pasos y que son controladas desde una computadora a través de una interfaz de usuario diseñada en el ambiente de programación Labview. Así, entonces, el sistema puede medir parámetros ópticos como la transmitancia, la reflectancia y la absorbancia de los materiales, además de realizar una caracterización de la distribución angular de la luz esparcida en reflexión o transmisión por la muestra.

Luego de verificar el correcto funcionamiento del dispositivo y el cumplimiento de las normas correspondientes, las propiedades ópticas de varios materiales empleados en el ensamble de los paneles de instrumentos de automóviles (proporcionados por la empresa Continental Guadalajara) fueron cuantificadas. Los resultados obtenidos han sido reportados a la empresa para que sus especialistas los alimenten a la plataforma de simulación SPEOS para evaluar la apariencia del tablero de forma virtual.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis	2
1.2. Objetivo:	2
1.2.1. Objetivos específicos:	2
1.3. Justificación.	2
2. Fundamentos teóricos	4
2.1. Espectroscopia.	4
2.1.1. Espectroscopia de emisión	5
2.1.2. Espectroscopia de absorción	5
2.2. Transmitancia y absorbancia	5
2.2.1. Transmisión regular	6
2.2.2. Transmisión difusa	6
2.3. Reflectancia	7
2.3.1. Reflexión especular.	8
2.3.2. Reflexión difusa.	8
2.4. Clasificación de superficies ópticas.	9
2.4.1. Superficie Especular.	9
2.4.2. Superficie Lambertiana.	9
2.4.3. Superficie mixta.	10
2.5. El espectrofotómetro.	10
2.5.1. Espectrofotómetro discreto	10
2.5.2. Espectrofotómetro de simple haz.	11

ÍNDICE GENERAL

2.5.3.	Espectrofotómetro de doble haz.	11
2.5.4.	Interferométrico o de Transformada de Fourier.	11
2.6.	Componentes de un espectrofotómetro.	12
2.6.1.	Fuente de luz	13
2.6.2.	Monocromador	13
2.6.3.	Compartimento de la muestra.	13
2.6.4.	Detector	13
2.7.	Apariencia	14
2.7.1.	Brillo	14
2.7.2.	Textura	15
2.7.3.	Color	16
2.7.4.	Translucidez	16
2.8.	Espectrofotómetros multi-ángulo.	17
2.8.1.	Espectrofotómetro Multi - Ángulo CM-M6	17
2.8.2.	Espectrofotómetro Multi - Ángulo CM-512M3	18
2.8.3.	MA-T12	20
2.8.4.	CarFlash	21
3.	Presentación del dispositivo	23
3.1.	Descripción General	23
3.2.	Sistema Óptico	24
3.2.1.	Fuente de iluminación	24
3.2.2.	Monocromador	25
3.2.3.	Colimación del haz y obtención de referencia	28
3.2.4.	Detectores de radiación óptica	29
3.3.	Sistema Mecánico	30
3.4.	Sistema Electrónico	31
3.4.1.	Control de motores	32
3.4.2.	Acondicionamiento de señales	32
3.5.	Sistema de Control	33
3.5.1.	Tarjeta de adquisición de datos	33

ÍNDICE GENERAL

3.5.2. Software	34
3.6. Interfaz de usuario	34
3.6.1. Control de la muestra.	34
3.6.2. Control del sensor.	34
3.6.3. Longitud de onda y grados a barrer	34
3.6.4. Calibración de la transmisión.	35
3.6.5. Calibración de la reflexión.	35
3.6.6. Escanear la reflexión.	36
3.6.7. Escanear la transmisión.	36
3.6.8. Reflectancia Especular.	36
3.6.9. Reflectancia difusa.	36
3.6.10. Transmitancia directa.	36
3.6.11. Transmitancia difusa	37
4. Resultados	38
4.1. Características estáticas	38
4.1.1. Exactitud	38
4.1.2. Precisión	40
4.1.3. Repetibilidad del posicionamiento angular	41
4.1.4. Linealidad	42
4.1.5. Estabilidad	44
4.2. Caracterización de superficies automotrices	44
4.2.1. Determinación de la reflectancia de los plásticos	46
4.2.2. Panel de instrumentos	48
5. Conclusiones	51

Índice de figuras

2.1. Reflexión y refracción de la luz.	7
2.2. Reflexión Especular.	9
2.3. Reflexion difusa.	10
2.4. Espectrofotómetro discreto.	11
2.5. Espectrofotómetro de simple haz.	11
2.6. Espectrofotómetro de transformada de Fourier.	12
2.7. Componentes de un Espectrofotómetro.	12
2.8. Diagrama esquemático de la medición de brillo.	15
2.9. Geometrías típicas para la medición de brillo.	15
2.10. Curvas de reflectancia para los colores rojo, azul y verde.	16
2.11. Geometría de medición de color para pinturas metálicas.	17
2.12. Espectrofotómetro CM-M6.	18
2.13. Espectrofotómetro CM-M6.	19
2.14. Espectrofotómetro MA-T12.	21
2.15. Espectrómetro CarFlash.	22
3.1. Esquema en bloques del dispositivo.	24
3.2. Espectro de la lámpara QTH.	25
3.3. Configuración óptica del MS260i Imaging Spectrograph.	26
3.4. Configuración Czerny-Turner.	27
3.5. Ancho de la línea espectral centrada en 633 nm asociada a la radiación electromagnética entregada por el monocromador usado en el dispositivo como fuente de luz.	28
3.6. Arreglo de lentes cilíndricas a la salida del monocromador	29

ÍNDICE DE FIGURAS

3.7. Responsividad de fotodiodo FDS010.	30
3.8. Sistema mecánico.	31
3.9. Control de los motores a pasos.	32
3.10. Circuito de polarización del fotodiodo FDS-010.	33
3.11. Aplicación del sistema.	35
3.12. Dispositivo.	37
4.1. Transmitancia del divisor de haz 50/50 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.	39
4.2. Reflectancia del divisor de haz 50/50 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.	39
4.3. Transmitancia del divisor de haz 70/30 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.	40
4.4. Reflectancia del divisor de haz 70/30 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.	40
4.5. Dispersión de los datos en las mediciones de transmitancia.	41
4.6. Dispersión de los datos en las mediciones de Reflectancia.	41
4.7. Repetibilidad del posicionamiento.	42
4.8. Linealidad de la escala de transmitancia para 530 nm.	43
4.9. Linealidad de la escala de la reflectancia para 530 nm.	44
4.10. Deriva de la reflectancia. a) Primera hora de trabajo. b) Segunda hora de trabajo	46
4.11. Panel de vehículo	46
4.12. Reflexión del material TIO 15%	47
4.13. Direccionales	48
4.14. Mediciones del material del panel (parte 1)	49
4.15. Mediciones del material del panel (parte 2)	49
4.16. Distribución angular de la luz transmitida por el material del direccional	50

Índice de tablas

4.1. Transmitancia de los filtros de densidad óptica neutra	43
4.2. Deriva en la primera hora	45
4.3. Deriva en la segunda hora	45
4.4. Caracterización de materiales del encapsulado	47

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz tiene una gran relevancia en la economía mundial y representa uno de los sectores más importantes del mundo debido a sus altos ingresos. A pesar de que el margen de ganancia por unidad ensamblada es, en promedio, del 6 %, el volumen de ventas y los servicios de posventa siguen dando una dinámica atractiva a esta actividad. La industria del automóvil genera encadenamientos productivos que benefician las economías de países en vías de desarrollo. En el ámbito laboral, se estima que por cada empleo consolidado en esta área se crean 5 en otras ramas de la economía. Sobre todo, porque existen muchas industrias que se relacionan directamente con el sector automotriz como el caso de la metalurgia, pieles, neumáticos, electrónica, etc [1].

México, es el primer productor de automóviles de América Latina y el séptimo a nivel mundial. Durante el 2018 la industria automotriz (terminal y de autopartes) representó el 3.7 % del PIB nacional [2]. Cuenta con una ubicación geográfica privilegiada al estar al lado del mayor mercado de consumo del mundo: Estados Unidos. Además, se beneficia de los tratados comerciales, la transferencia de tecnología y posee mano de obra calificada y una infraestructura consolidada en esta rama. Por todo lo anterior la industria del auto representa un sector priorizado en la economía nacional.

La incorporación de las nuevas tecnologías y la automatización de procesos en la línea de producción juegan un papel fundamental en el desarrollo de las industrias hoy día. Para los fabricantes de autos este campo representa la posibilidad de elevar la eficiencia y productividad de sus plantas, así como disminuir los costos y el tiempo de producción incrementando el margen de ganancia. Un caso especial de estas tecnologías lo constituye los programas para la simulación por computadora de superficies y acabados automotrices que permitan evaluar la apariencia de un producto final. Este proceso consiste en utilizar un conjunto de propiedades ópticas de una probeta estandarizada obtenidas de un instrumento espectroscópico y, a través de un software, simular la apariencia de las diferentes superficies y materiales del producto. De esta forma se puede evaluar la factibilidad de utilizar o no cierto material antes de ser llevado a la línea de producción. El propósito fundamental es asegurar la calidad, mejorar los tiempos de desarrollo y satisfacer las demandas del mercado.

1.1. HIPÓTESIS

Por lo anteriormente expuesto, los departamentos de diseño automotriz requieren contar con la información adecuada para modelar correctamente estos materiales y tener acceso a un instrumento espectrofotométrico (o un proveedor de servicios que lo tenga) es el primer paso antes de simular la apariencia final en un automóvil. La calidad y precisión de las medidas espectroscópicas de los materiales determinan la cercanía a la realidad de los acabados simulados.

1.1. Hipótesis

La calidad de una simulación por computadora de la apariencia final de los acabados automotrices puede incrementarse considerando algunas medidas experimentales de las propiedades ópticas de los materiales usados en su elaboración.

1.2. Objetivo:

Diseñar y construir un instrumento para la medición de las propiedades ópticas de una superficie y con la capacidad de medir el esparcimiento variando de forma independiente el ángulo de incidencia y el de detección.

1.2.1. Objetivos específicos:

- Diseñar y construir un mecanismo automatizado para determinar las propiedades ópticas (Reflectancia, Transmitancia y Absorbancia) de una probeta de material empleado en los acabados de un automóvil a diferentes ángulos de incidencia.
- Extender las capacidades del mecanismo automatizado para obtener la distribución angular de las medidas de irradiancia en reflexión o en transmisión para la clasificación de las superficies rugosas o volúmenes traslúcidos, respectivamente.
- Desarrollar una interfaz usuario-máquina en el entorno de programación gráfica Labview para gestionar el uso del instrumento.

1.3. Justificación.

La simulación por computadora de acabados automotrices es requerida por los fabricantes de automóviles antes de aprobar la compra de insumos. La empresa Continental México con sede en Guadalajara, Jalisco ofrece este servicio empleando el paquete de programas SPEOS®), el cual debe ser alimentado con algunas medidas de las propiedades ópticas de los materiales usados en el acabado. Por lo anterior, Continental tiene interés en contar

1.3. JUSTIFICACIÓN.

con un instrumento versátil y de bajo costo para caracterizar las propiedades ópticas de los materiales utilizados, por ejemplo, en la fabricación de tableros de automóviles. El objetivo final es aprovechar estas mediciones para mejorar la precisión de los parámetros ópticos empleados en las simulaciones y lograr que estas simulaciones se acerquen cada vez más a la realidad.

La mayoría de los instrumentos presentes en el mercado que se emplean para ese fin poseen una geometría de iluminación y detección fija lo que impide realizar mediciones a ángulos diferentes a los preestablecidos. En este caso las necesidades del usuario requieren una caracterización exhaustiva de la reflectancia, la absorbancia y la transmitancia de los materiales por lo que fue necesario la creación de este módulo. Teniendo en cuenta los parámetros que requiere la plataforma de simulación, el instrumento a desarrollar debe ser capaz de variar el ángulo de iluminación de la muestra en un rango 0 a 90° con pasos de 5° . Además, debe modificar el ángulo de medición a voluntad del usuario y con una resolución de 1° . Esto con el objetivo de caracterizar la transmisión y reflexión difusas resueltas angularmente y determinar si se trata de una superficie Gaussiana o Lambertiana.

Por último, para realizar una simulación adecuada, el software necesita que las mediciones de los parámetros ópticos se realicen en todo el espectro visible. Por lo tanto, el instrumento debe ser capaz operar en el rango 380-750nm.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

La simulación por computadora de la apariencia de un producto requiere de la caracterización espectroscópica de las propiedades ópticas de los materiales empleados para su manufactura. Por lo anterior, algunos conceptos relacionados con la tarea de cuantificar estos parámetros son revisados a continuación.

2.1. Espectroscopia.

Cuando un haz de luz policromática interactúa con la materia en su trayectoria de propagación, en la interfaz que forman los medios de incidencia y de transmisión tienen lugar algunos procesos físicos, tales como el de reflexión o el de transmisión que son descritos mediante las Ecuaciones de Fresnel. Otro proceso que forma parte de las respuestas ópticas fundamentales de un medio es la absorción de radiación electromagnética. La condición para que un átomo o molécula que conforma el medio de propagación absorba un cuanto de energía electromagnética está dada por

$$\Delta E = h\nu, \tag{2.1}$$

donde $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s es la constante de Planck y ν , expresada en hercios ([Hz]), es la frecuencia de la onda electromagnética asociada a ese cuanto de luz. ΔE es la diferencia de energía entre el estado base y un estado excitado del átomo o molécula del medio de propagación. Es por esto que, al analizar la distribución de intensidad de la energía electromagnética absorbida por un cuerpo en función de la frecuencia ν (o longitud de onda λ ya que $\lambda = c/\nu$, siendo c la velocidad de la luz en el vacío), se obtiene información de la naturaleza electrónica de las sustancias que componen ese cuerpo. De forma análoga, los componentes de una fuente de luz pueden ser determinados a partir del análisis de la radiación emitida en función de la longitud de onda (o frecuencia). Dependiendo del fenómeno óptico que ocurre, la espectroscopía se clasifica en espectroscopía de absorción o de emisión. Además de obtener la naturaleza electrónica de los componentes del medio, la espectroscopia también puede arrojar luz sobre propiedades tanto vibracionales como rotacionales de las moléculas o átomos.

2.2. TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA

Cuando la luz incide sobre una superficie con rugosidad alta o cuando se propaga a través de un medio turbio experimenta una redistribución espacial hacia el medio de incidencia o hacia el interior del medio de transmisión. Los procesos son denominados retroesparcimiento (reflexión difusa) y esparcimiento (transmisión difusa), respectivamente. El estudio de la distribución angular de la luz en función de la longitud de onda recibe el nombre de espectroscopia de reflexión (transmisión) difusa. Para terminar, cuando el haz de luz empleado es coherente es posible observar el fenómeno de difracción. Si el objeto iluminado tiene estructura periódica, la distribución angular de la luz muestra características regulares asociadas al ordenamiento estructural. En el caso de que el material iluminado tenga propiedades ópticas heterogéneas, el estudio es conocido como espectroscopia de retroesparcimiento mejorada.

2.1.1. Espectroscopia de emisión

La espectroscopia de emisión analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas cuando pasan de un estado excitado a un estado de energía inferior. Cada elemento emite un conjunto característico de longitudes de onda discretas en función de su estructura de bandas.

2.1.2. Espectroscopia de absorción

A ciertas longitudes de onda los fotones son absorbidos por la materia y ocurre un proceso atómico o molecular. Ya sea que un electrón cambie de nivel de energía o que una molécula vibre. En este fenómeno se basa la espectroscopía de absorción, en poder diferenciar las sustancias gracias a que cada una tiene un espectro de absorción único condicionado por los niveles de energía disponibles en su estructura de bandas [3].

2.2. Transmitancia y absorbancia

Las propiedades de transmitancia y absorbancia están fuertemente ligadas. Sea un haz de luz que en su trayectoria de propagación incide y atraviesa un medio dieléctrico no transparente de espesor l . Si la razón entre la disminución de la intensidad del haz de luz y la distancia de propagación dentro del medio es proporcional a la intensidad local, entonces la intensidad o irradiancia del haz de luz transmitida a la salida del medio está descrita por la ley de Beer-Lambert. Esto es [4],

$$I_{out} = I e^{-A}, \quad (2.2)$$

donde I es la intensidad incidente, I_{out} es la intensidad a la salida y $A = \alpha l$ es la absorbancia del medio, siendo α un coeficiente de proporcionalidad que determina la eficiencia de la absorción de luz (coeficiente de absorción).

2.2. TRANSMITANCIA Y ABSORBANCIA

Así, desde el punto de vista técnico, para conocer la transmitancia y la absorbancia de un medio se hace pasar luz a través de la muestra midiendo la intensidad a la entrada y a la salida de la misma. Luego, la transmitancia será:

$$T = \frac{I_{out}}{I}. \quad (2.3)$$

Y de la Ec. (2.2), la absorbancia resulta ser:

$$A = \ln \left(\frac{I}{I_{out}} \right) = -\ln T \quad (2.4)$$

De manera que la absorbancia es la capacidad que presenta un medio para absorber luz, mientras que la transmitancia es su capacidad de transmitir esa energía. Son dos aspectos del mismo fenómeno relacionados de forma logarítmica. Un cuerpo con una absorbancia muy alta tiene una transmitancia baja y viceversa.

2.2.1. Transmisión regular

Ocurre cuando la luz tiene una propagación a través de un objeto sin experimentar difusión, observándose una desviación de su trayectoria, cuando el ángulo de incidencia es oblicuo, que sigue la ley Snell. Este tipo de transmisión es observada en los materiales transparentes con propiedades ópticas homogéneas.

2.2.2. Transmisión difusa

Ocurre cuando la luz que se propaga a través de la muestra experimenta una difusión en múltiples direcciones diferentes a la dirección regular. Describe el comportamiento de los materiales translúcidos, tales como algunos plásticos, vidrio esmerilado o papel vegetal. La redistribución angular de la luz es referida como esparcimiento. Este fenómeno está asociado a medios que son transparentes pero que, debido a que las propiedades ópticas en el volumen varían aleatoriamente, existen múltiples refracciones que ensanchan el cono de luz transmitido. En este caso, la transmitancia espectral es la razón del flujo espectral transmitido $\Phi_{\lambda t}$ y el incidente $\Phi_{\lambda i}$,

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda t}}{\Phi_{\lambda i}}. \quad (2.5)$$

La transmitancia total resulta, entonces, de

$$T = \frac{\int_0^{\infty} T(\lambda) \Phi_{\lambda i} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda i} d\lambda}. \quad (2.6)$$

2.3. REFLECTANCIA

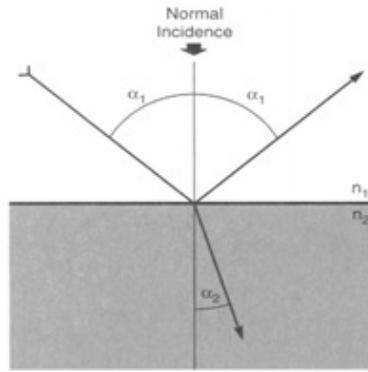


Figura 2.1: Reflexión y refracción de la luz.

El resultado anterior puede escribirse también en función de la radiancia. Esto es,

$$T = \frac{\int_0^{\infty} \int_{\Omega} L_{\lambda t} d\Omega_t d\lambda}{\int_0^{\infty} \int_{\Omega} L_{\lambda i} d\Omega_i d\lambda}, \quad (2.7)$$

donde $L_{\lambda i}(\lambda, \theta_i, \phi_i)$ es la radiancia espectral que incide sobre el medio con una dirección definida por los ángulos polar (θ_i) y acimutal (ϕ_i) y $L_{\lambda t}(\lambda, \theta_t, \phi_t)$ es la radiancia espectral que se propaga en transmisión en una dirección definida por los ángulos polar (θ_t) y acimutal (ϕ_t). $d\Omega = \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi$ es el ángulo sólido elemental proyectado.

La función de distribución bidireccional de transmitancia (BTDF, f_t) relaciona la radiancia transmitida con la radiancia incidente [5],

$$f_t(\lambda, \theta_i, \phi_i) = \frac{dL_{\lambda t}}{dL_{\lambda i} d\Omega_i} = \frac{dL_{\lambda t}}{dE_{\lambda i}}, \quad (2.8)$$

donde $dE_{\lambda i}(\theta_i, \phi_i)$ es la irradiancia incidente.

2.3. Reflectancia

Cuando un haz de luz incide sobre la frontera de dos medios con índice de refracción diferentes una parte se transmite al segundo medio y la otra parte se refleja. El ángulo entre la normal de la superficie y el haz reflejado es igual al ángulo de incidencia[6]. El rayo incidente, el reflejado y la normal se encuentran en el mismo plano.

Dependiendo de las irregularidades que presente la superficie pueden existir dos tipos de reflexión: Reflexión especular y reflexión difusa[7].

2.3. REFLECTANCIA

2.3.1. Reflexión especular.

Ocurre cuando la mayor parte de la radiación se refleja en un ángulo igual y opuesto a la radiación incidente. Se presenta en superficies lisas donde del tamaño de las imperfecciones no son comparables con la longitud de onda de la luz.

2.3.2. Reflexión difusa.

La luz es esparcida en varias direcciones. Se produce debido a que las rugosidades de la superficie desvían la reflexión en diversos ángulos. Aunque definitivamente se cumple la ley de la reflexión lo que sucede es que la normal en cada punto posee ángulos diferentes. Muchas superficies presentan un comportamiento intermedio, o sea una parte de la luz es reflejada de manera difusa y otra de forma especular. Es por esto que la reflectancia puede darse como una medida de cuanta luz es reflejada en la dirección especular (Reflectancia especular), o del total de la luz esparcida en el hemisferio de reflexión (Reflectancia total).

La distribución angular de la luz esparcida es cuantificada en función de la longitud de onda λ mediante la función bidireccional de reflexión difusa (*BRDF*, por las siglas del inglés Bidirectional Reflectance Distribution Function) [8–10],

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \lambda, \theta_r, \phi_r) = \frac{L_r}{E_i}, \quad (2.9)$$

donde θ_i y ϕ_i (θ_r y ϕ_r) son los ángulos polar y acimutal de la luz incidente (reflejada). L_r es la radiancia retroesparcida y E_i es la irradiancia incidente. En el caso de una área de iluminación muy estrecha, la *BRDF* puede obtenerse de

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \lambda, \theta_r, \phi_r) = \frac{d\Phi_r}{\Phi_i d\Omega_r \cos \theta_r}, \quad (2.10)$$

donde Φ_i (Φ_r) es el flujo o potencia espectral radiante incidente (reflejado) y $d\Omega_r$ es el ángulo sólido que describe el área de detección.

Otras cantidades que son usadas con frecuencia en lugar de la *BRDF* en el *Vocabulario Internacional de Iluminación* son coeficiente de radiancia, el factor de radiancia y el factor de reflectancia. El coeficiente de radiancia resulta de considerar una distribución de irradiancia incidente no unidireccional $L(\theta_i, \phi_i)$ y la radiancia reflejada en una reflexión específica,

$$q_e = \frac{\int f_r L_i \cos \theta_i d\Omega_i}{\int L_i \cos \theta_i d\Omega_i}, \quad (2.11)$$

lo cual se reduce a la *BRDF* cuando la iluminación es unidireccional. El factor de radiancia β considera una superficie reflejante Lambertiana perfecta como referencia en la normalización de las medidas de la radiancia,

$$\beta = \frac{\int f_r L_i \cos \theta_i d\Omega_i}{\int L_i^{RDI} \cos \theta_i d\Omega_i}. \quad (2.12)$$

2.4. CLASIFICACIÓN DE SUPERFICIES ÓPTICAS.

Bajo condiciones de iluminación idénticas para el reflector difuso ideal y el medio bajo análisis resulta que $\beta = \pi q_e$. Si, además, la iluminación es unidireccional $\beta = \pi f_r$. Por último, el factor de reflectancia R es la razón entre el flujo radiante reflejado en un conjunto de direcciones Ω_r y aquel reflejado por un difusor Lambertiano ideal iluminado de la misma forma, esto es,

$$R = \frac{\pi \int_{\Omega_r} \int f_r L_i \cos \theta_i \cos \theta_r d\Omega_i d\Omega_r}{\int_{\Omega_r} \int f_r L_i \cos \theta_i \cos \theta_r d\Omega_i d\Omega_r}. \quad (2.13)$$

Un término más empleado con frecuencia y con significado similar es el esparcimiento con resolución angular (*ARS* por sus siglas del inglés Angle-Resolved Scatter). La forma de cuantificarlo requiere de obtener la razón entre Φ_r y Φ_i sin considerar el ángulo θ_r ,

$$ARS = \frac{d\Phi_r}{\Phi_i d\Omega_r}. \quad (2.14)$$

2.4. Clasificación de superficies ópticas.

Dependiendo de qué tipo de reflexión predomina cuando un haz de luz incide sobre una superficie, esta puede clasificarse de Especular o Lambertiana.

2.4.1. Superficie Especular.

Es una superficie ideal que cumple perfectamente la ley de reflexión. En la práctica la intensidad de la luz reflejada presenta un lóbulo de ancho finito y con el máximo de intensidad en la dirección de la reflexión especular (Ver figura 2.2) [11].

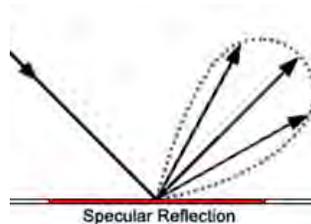


Figura 2.2: Reflexión Especular.

2.4.2. Superficie Lambertiana.

Es aquella superficie donde la intensidad de la radiación reflejada no depende del ángulo de detección ni del ángulo de iluminación sino tiene un comportamiento isótropo (figura 2.3).

2.5. EL ESPECTROFOTÓMETRO.

O sea, a los ojos de un observador una superficie Lambertiana presenta un brillo uniforme independientemente del ángulo que se mire. La intensidad luminosa obedece a la ley de Lambert del coseno. Esto es.

$$I(\theta) = I_0 * \cos(\theta) \quad (2.15)$$

Donde I_0 es la intensidad reflejada por un elemento de superficie observado de forma normal y θ es el ángulo al cual se requiere conocer la intensidad.

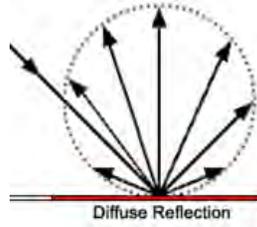


Figura 2.3: Reflexion difusa.

2.4.3. Superficie mixta.

Son aquellas superficies que presentan una distribución de la reflectancia tal que no se comportan ni como un difusor ideal ni como un espejo ideal. Para el estudio de estos casos se propone un método donde se analiza esta distribución como dos componentes separadas; una perfectamente Lambertiana y otra perfectamente especular.[12]

2.5. El espectrofotómetro.

El instrumento que permite cuantificar la reflectancia, la absorbancia y la transmitancia de una muestra en este intervalo del espectro es llamado espectrofotómetro. Para esto proyecta un haz de luz monocromático sobre la muestra y mide que parte de esa luz es absorbida. Para obtener el espectro de absorción se debe realizar este procedimiento en todo el rango de longitudes de onda de interés desplazando la fuente de luz de una longitud de onda a otra en pequeños pasos. Aunque el principio de funcionamiento es el mismo existen varios tipos de espectrofotómetros dependiendo de su configuración, intervalo de trabajo o de la aplicación para la que es diseñado.

2.5.1. Espectrofotómetro discreto

Está compuesto por una fuente de irradiancia, un conjunto de filtros pasabanda interferométricos discretos, un compartimento para la muestra y una etapa de detección debidamente amplificada y estabilizada.[13]

2.5. EL ESPECTROFOTÓMETRO.

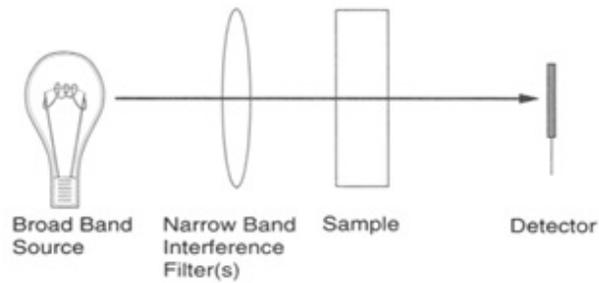


Figura 2.4: Espectrofotómetro discreto.

2.5.2. Espectrofotómetro de simple haz.

Posee un único canal óptico que es utilizado para medir la referencia y la muestra, pero no simultáneamente. Es necesario calibrar el instrumento con la referencia y luego retirar la misma para efectuar la medición de la muestra. Esto obliga a que los parámetros de ajuste se mantengan estables durante el tiempo de medición.[13]

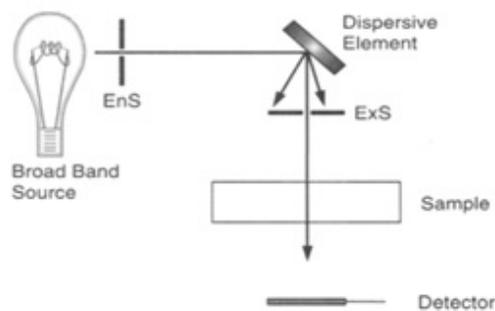


Figura 2.5: Espectrofotómetro de simple haz.

2.5.3. Espectrofotómetro de doble haz.

El haz de luz es dividido, una parte va a la referencia y otra a la muestra. El detector compara ambas lecturas simultáneamente de esta manera la medición es referenciada. Así se compensan las variaciones que puedan existir debido a fluctuaciones en la intensidad de la fuente luminosa, cambios de voltaje, ruido, etc.[13]

2.5.4. Interferométrico o de Transformada de Fourier.

La luz a analizar se hace pasar por un interferómetro de Michelson. La señal de irradiancia a la salida es modulada por el desplazamiento de uno de los espejos del interferómetro. Al

2.6. COMPONENTES DE UN ESPECTROFOTÓMETRO.

aplicar la transformada de Fourier a la señal adquirida se obtienen las frecuencias contenidas en el interferograma y por tanto información espectroscópica de la fuente de luz. Este tipo de espectrómetros es muy utilizado para las mediciones en el infrarrojo [13],[14](Ver figura 2.6).

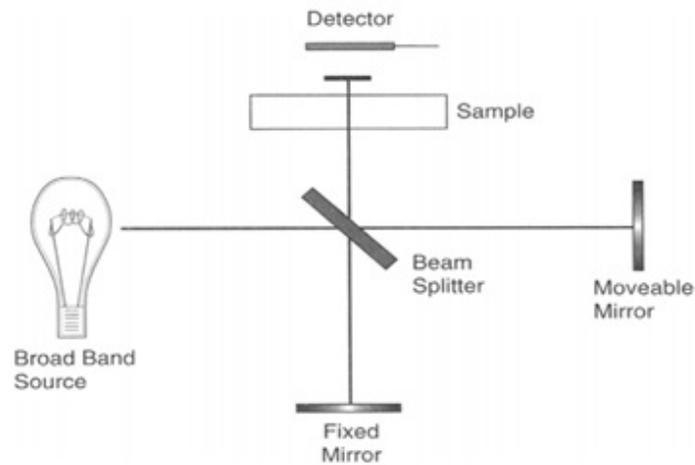


Figura 2.6: Espectrofotómetro de transformada de Fourier.

2.6. Componentes de un espectrofotómetro.

En la figura 2.7 se muestra un esquema general que describe gráficamente las partes fundamentales de un espectrofotómetro.

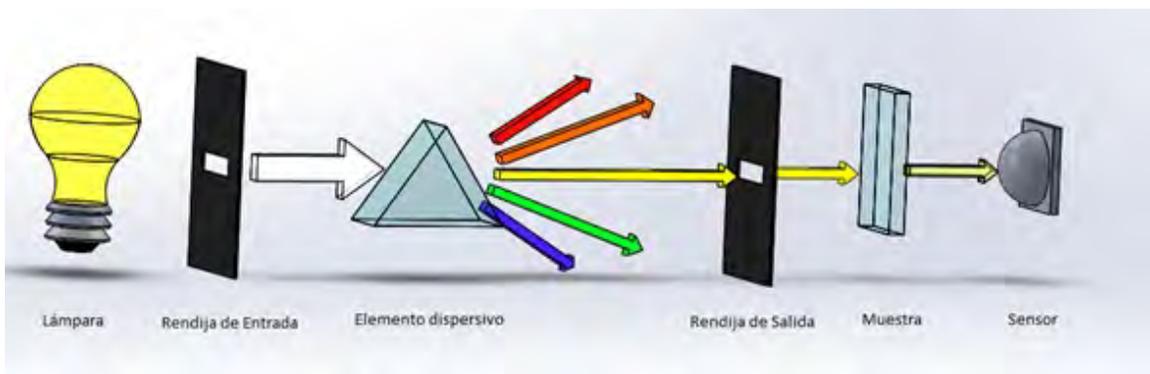


Figura 2.7: Componentes de un Espectrofotómetro.

2.6. COMPONENTES DE UN ESPECTROFOTÓMETRO.

2.6.1. Fuente de luz

La fuente de luz debe cumplir ciertas características. Debe ser estable, relativamente direccional y poseer una distribución de energía espectral continua. Entre las fuentes más empleadas se encuentran la lámpara de tungsteno, la de arco de xenón y las basadas en LEDs.

2.6.2. Monocromador

Con el objetivo de resolver el haz policromático en bandas estrechas de longitudes de onda se emplea el monocromador. El mismo está formado por:

- Una abertura de entrada que regula el paso de la luz que proviene de la fuente
- Un sistema óptico compuesto de lentes colimadores o un arreglo de espejos para producir un haz paralelo.
- Un elemento dispersivo que se encarga de separar la radiación
- Un elemento óptico para enfocar la luz en el plano de salida.
- Una abertura de salida para seleccionar la componente deseada.

2.6.3. Compartimento de la muestra.

Es donde tiene lugar la interacción con la materia y ocurre la absorción de fotones.

2.6.4. Detector

El detector es el encargado de captar la radiación y, a su vez, dejarla en evidencia para su estudio posterior. Básicamente existen dos tipos.

- Los fotoemisivos. Representados generalmente por los tubos fotomultiplicadores.
- Los de estado sólido. Representados por fotodiodos, sensores piroeléctricos y detectores infrarrojos.

En algunos espectrofotómetros el detector está compuesto por un arreglo de fotodetectores [15]. Esto hace que sea posible analizar simultáneamente todo el espectro de interés, reduciendo las partes móviles y el tiempo de medición. El arreglo de detectores se posiciona en lugar de la rendija de salida del monocromador. Una limitación de los espectrofotómetros que usan arreglos de detectores es que no se les puede cambiar la resolución espectral fácilmente. La resolución está determinada por la dispersión del monocromador y la distancia entre los elementos del arreglo [4].

2.7. Apariencia

La apariencia de una superficie está determinada por atributos como: el color, el brillo, la textura y la translucidez, pero es la interrelación de estos elementos la que define la percepción de esa apariencia a los ojos del observador. Por supuesto se trata de un proceso complejo condicionado por la subjetividad. Sin embargo, cuando la luz interactúa con un objeto ocurren fenómenos ópticos que pueden ser medidos. Es por esto que los conceptos del color, el brillo y la opacidad no son más que la interpretación que hacemos a los efectos que provoca el objeto a la luz que incide sobre él. Reconocer la relación entre cada elemento de apariencia y un fenómeno óptico específico es el primer paso antes de diseñar instrumentos que puedan medir lo que vemos[16]. Los cuatro procesos más importantes que pueden ocurrir cuando la luz se encuentra con un objeto son:

- Reflexión especular en la primera superficie (asociado con el brillo).
- Esparcimiento dentro del material (asociado con la reflexión difusa y a veces con la transmisión difusa).
- Absorción dentro del material (directamente asociado al color).
- Transmisión regular directamente a través del objeto (asociado con la translucidez).

Para hacer un estudio de apariencia es necesario además de medir la transmitancia, la reflectancia y la absorbancia; caracterizar la dispersión que sufre la luz al interactuar con el objeto, o sea la distribución angular de la luz reflejada y transmitida. Esta distribución angular de la luz esparcida brinda detalles sobre la microestructura del material como por ejemplo rugosidad, inhomogeneidades, etc[17] El goniómetro es el instrumento que mide la cantidad de luz emitida por el objeto en diferentes ángulos o su distribución espacial. De esta forma provee información acerca de atributos geométricos de su apariencia[16]

2.7.1. Brillo

El brillo constituye un elemento de apariencia fundamental para los fabricantes que intentan diseñar un producto visualmente atractivo. El mismo está determinado por muchos factores como el pulido y la homogeneidad de la superficie. Por esto un cambio en los niveles de brillo de una superficie puede indicar imperfecciones en el proceso de fabricación. De ahí que la medición del brillo forme parte importante del control de calidad en muchas líneas de producción [18]. Desde el punto de vista técnico, el brillo es una propiedad óptica que indica la capacidad de una superficie para reflejar la luz en la dirección especular. Existen múltiples instrumentos para medir el brillo pero los más comunes son los goniómetros, ya que permiten conocer la distribución espacial del flujo luminoso. [19],[20]

La experiencia ha demostrado que una única geometría de medición, como 60° puede arrojar valores de brillo que no se correspondan correctamente con la apreciación visual. Es

2.7. APARIENCIA

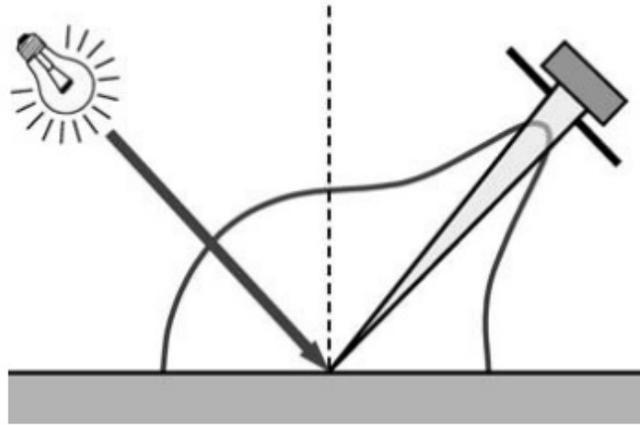


Figura 2.8: Diagrama esquemático de la medición de brillo.

por esto que típicamente se utilizan tres geometrías de medición con los ángulos de incidencia 20° , 60° , 85° que permiten medir superficies con alto, medio y bajo brillo.[21]

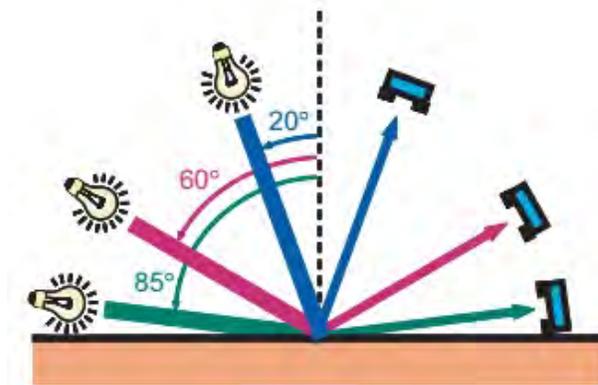


Figura 2.9: Geometrías típicas para la medición de brillo.

2.7.2. Textura

La textura de una superficie está ligada a la rugosidad de la misma. Así se definen categorías de rugosidad atendiendo al tamaño característico y distribución superficial de las partículas. El principal efecto de la rugosidad sobre la luz es redistribuir angularmente la radiación recibida, produciendo efectos sobre otros atributos perceptivos como el color y el brillo.[22]

2.7. APARIENCIA

2.7.3. Color

El color depende de tres componentes fundamentales. El primero es una fuente de luz, necesaria para iniciar el proceso de visión. Luego esta energía es modulada por las propiedades físicas y químicas del objeto. Y por último esa energía modulada es convertida en una imagen por nuestro ojo.[23]

La uniformidad y la consistencia del color son necesarias para lograr la impresión de un acabado de alta calidad. Los pigmentos con efectos especiales tienen un papel importante en la industria automotriz [24]. A diferencia de los colores sólidos las pinturas metálicas cambian su apariencia cuando cambian las condiciones de iluminación y observación. En otros tipos de pinturas de efectos también se observan cambios en la cromaticidad y en el tono de la superficie en la medida que cambian los ángulos de iluminación y observación [25].

Debido a que la apreciación del color es un proceso subjetivo y que además está fuertemente condicionado por la naturaleza de la fuente de luz, Para realizar un estudio del color el primer paso consiste en estandarizar el observador y el iluminante. Así surgieron estándares como el CIE(Commission Internationale d' Eclairague) para normar estos aspectos[26]. Así la medición de color se reduce a conocer las propiedades ópticas del objeto en cuestión. El instrumento de medición de color contiene una fuente de luz que se incide sobre el objeto y la luz refejada es resuelta en sus componentes espectrales para medir su amplitud. Analizando la curva espectral de la luz reflejada se puede determinar el color del objeto [21].

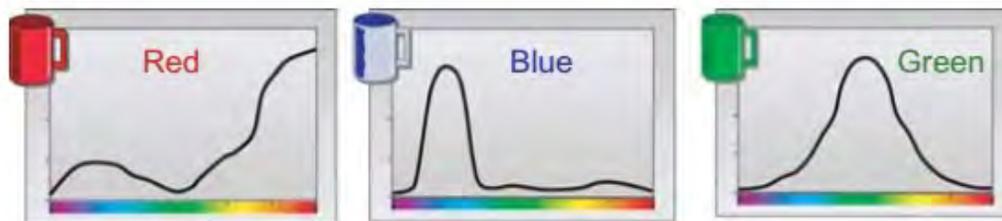


Figura 2.10: Curvas de reflectancia para los colores rojo, azul y verde.

Cuando se trata de colores sólidos basta con iluminar la muestra a 45° y medir la luz reflejada a 0° . Para el caso de pigmentos especiales el estudio debe realizarse a varios ángulos como se muestra en la figura 2.11.

2.7.4. Translucidez

Cuando se habla de translucidez se hace referencia a la pérdida de transmitancia especular frente a la total y al ensanchamiento de la región del material iluminada frente al tamaño de

2.8. ESPECTROFOTÓMETROS MULTI-ÁNGULO.

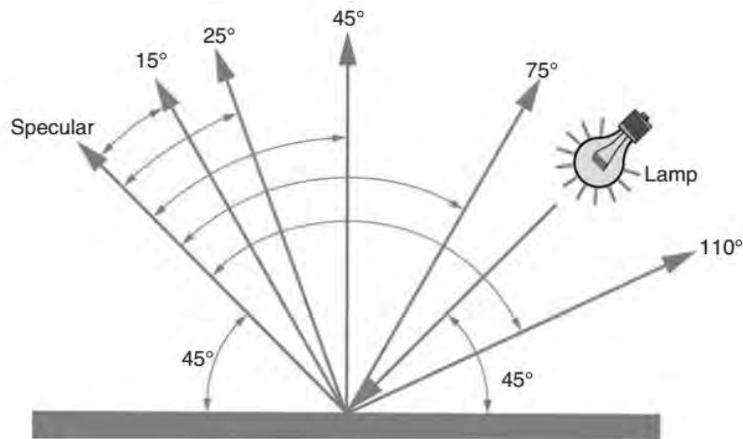


Figura 2.11: Geometría de medición de color para pinturas metálicas.

la mancha luminosa en la superficie de incidencia.[22]

2.8. Espectrofotómetros multi-ángulo.

La necesidad de realizar estas mediciones ha dado lugar a la creación de espectrómetros con características especiales capaces de cambiar el ángulo de incidencia de la luz, así como el ángulo de detección [27]. De manera que puedan realizar una medición de la luz reflejada y transmitida por la muestra, pero resuelta angularmente. Existe en el mercado un grupo de instrumentos con esta funcionalidad los cuales son muy utilizados para la caracterización de superficies en la industria automotriz. Sobre todo, son utilizados para el análisis de pigmentos gonio-aparentes o de efectos especiales (metálicos, nacarados, holográficos, Etc). Los ángulos de iluminación y de observación típicamente se rigen por las especificaciones de las normas ASTM (por sus siglas en inglés, American Society for Testing and Materials) y DIN (Instituto Alemán de Normalización) referidas a la medición de color en este tipo de superficies[28].

2.8.1. Espectrofotómetro Multi - Ángulo CM-M6

El CM-M6 es un espectrofotómetro multi - ángulo diseñado para las mediciones de colores metálicos o pinturas con efectos, como recubrimientos nacarados, los cuales exhiben un cambio visual notable con ciertos ángulos de visión. Utiliza un sistema de doble iluminación que dirige la iluminación a 45° y posee 6 ángulos de observación desde dos lados para medir precisamente partes pintadas en las planta de producción automotriz.

Este equipo está orientado a la industria automotriz por lo que resulta óptimo para brindar resultados precisos y firmes aún en superficies curvas. Es por ello que muestras como los parachoques, los cuerpos de los espejos del vehículo y las manijas de la puerta pueden

2.8. ESPECTROFOTÓMETROS MULTI-ÁNGULO.

ser medidos en forma rápida, precisa y repetidamente. Su forma compacta, vertical y liviana hace que sea fácil de utilizar y permite un fácil posicionamiento, mientras que la pantalla a color retro-iluminada de alta resolución es fácil de leer aún en condiciones de baja iluminación ambiental. [29],[30]

Características

- Angulo de iluminación:45°
- Ángulos de observación: -15°/15°/25°/45°/75°/110°
- Matrices de fotodiodos de silicio de 40 elementos.
- Led blanco de alto CRI (índice de reproducción cromática)
- Rango de longitud de onda: 400 a 700 nm.
- Resolución : 10nm
- Tiempo de medición≈ 4.5s
- Área de medición/iluminación: 6mm/12 mm
- Equipo de separación espectral:Filtro variable lineal



Figura 2.12: Espectrofotómetro CM-M6.

2.8.2. Espectrofotómetro Multi - Ángulo CM-512M3

Especialmente diseñado para caracterizar superficies con recubrimientos metálicos o gonio-aparentes. La iluminación en forma de anillo asegura que las mediciones sean independientes de la orientación del instrumento. Para ello la luz incide sobre al área de medición desde

2.8. ESPECTROFOTÓMETROS MULTI-ÁNGULO.

18 direcciones radiales. Gracias a su diseño compacto, es útil para analizar aquellas zonas del auto con geometría irregular. El dispositivo muestra los datos de mediciones de color en una pantalla de fácil lectura. Esto lo hace el instrumento ideal para usar en las líneas de producción donde las computadoras no están disponibles para almacenar los datos.[31],[32]

Características

- Ángulo de observación:0°
- Ángulos de iluminación:25°,45°,75°.
- Rango de medición:400-700nm
- Espaciado de longitudes de onda:20nm
- Intervalo de medición mínimo: 7 s (cuando se mide una placa de calibración del blanco a 23 °C)
- Área de medición / iluminación: 12mm/ 20mm
- Desviación estándar de la reflectancia espectral dentro de 0.30 %
- Desviación estándar de los valores colorimétricos dentro de $\Delta E^*_{ab} = 0.05$
- Fuente de iluminación: 3 Lámparas de Xenón pulsada.
- Sensor: arreglo de fotodiodos de silicio



Figura 2.13: Espectrofotómetro CM-M6.

2.8. ESPECTROFOTÓMETROS MULTI-ÁNGULO.

2.8.3. MA-T12

Desarrollado por X-Rite este espectrofotómetro multi - ángulo permite analizar una amplia gama de superficies, desde pinturas de automóviles hasta plásticos y metales. Define y evalúa los efectos de acabado contra estándares internacionales. Realiza lecturas precisas de brillo y rugosidad .

Con una cámara a color RGB acompañada por 12 ángulos de medición, el MA-T12 permite establecer los estándares de color más estrictos y garantizar consistencia de estas especificaciones. Posee un nuevo diseño ergonómico, cuenta con una apertura central y puntos de posicionamiento para garantizar una medición estable. La navegación con pantalla táctil moderna y la previsulización de las mediciones con cámara en vivo hacen que el MA-T12 sea simple y de uso intuitivo. Presenta una repetitividad y la reproducibilidad en las mediciones el doble de buenas que otros dispositivos en el mercado, lo que minimiza el desperdicio y el trabajo de reprocesamiento en todo el proceso productivo. Caracteriza y mide de manera completa los efectos de acabado en una variedad de aplicaciones, desde la pintura automotriz hasta plásticos y metales con mediciones que se aproximan incluso más a la forma en la que el ojo percibe el color. [33],[34]

Características

- Cámara a color.
- 12 ángulos de medición (6 fuentes de iluminación, 2 zonas de recolección).
- Led blanco con mejora en el azul.
- Apertura central y 3 puntos de posicionamiento para garantizar una medición estable.
- Área de iluminación:9x12mm (rectangular)
- Tiempo de medición:5.5 segundos
- Resolución espectral: 10 nm
- Intervalo espectral:400-700 nm
- Repetitividad de aspereza:0.09 %
- Reproducibilidad de aspereza: 1.4 %
- Repetitividad de brillo:0.12 %
- Reproducibilidad de brillo:1.9 %

2.8. ESPECTROFOTÓMETROS MULTI-ÁNGULO.



Figura 2.14: Espectrofotómetro MA-T12.

2.8.4. CarFlash

CarFlash es un espectrofotómetro multi-ángulo sin contacto que funciona en armonía con un robot industrial para recopilar datos colorimétricos de pinturas o recubrimientos de efectos especiales durante el proceso de producción automotriz. La medición sin contacto en la línea mitiga el riesgo de dañar la pintura durante el proceso de medición y ofrece la posibilidad de controlar el color incluso antes de que termine el proceso de secado. La medición a múltiples ángulos (de 15° a 75°) se realizan de forma simultánea para garantizar una cobertura completa. Además de los datos colorimétricos, CarFlash recopila los datos de la temperatura de la superficie con cada medición. También es útil para detectar el efecto piel de naranja, un defecto en la superposición de pinturas que ocurre cuando la pintura se seca demasiado rápido o tiene problemas de adherencia a la superficie que resultan en anomalías en la capa superficial. El brazo robótico posee sensores de distancia ultrasónicos para realizar el posicionamiento. El dispositivo es operado desde una computadora y controlado por un software que ejecuta la aproximación y el control de color[35]

Características

- Ángulo de iluminación: 45°
- Ángulos de medición: 15°, 25°, 45°, 75°
- Rango de medición: 400-700nm
- Resolución espectral: 10nm
- Fuente de luz: Lámpara pulsada de xenón
- Distancia de medición: 35mm
- Área de medición: 8x17 mm
- Tiempo de medición: 6-8s incluyendo posicionamiento.

2.8. ESPECTROFOTÓMETROS MULTI-ÁNGULO.

- Repetibilidad: $\Delta E=0.10$ en cerámica blanca



Figura 2.15: Espectrómetro CarFlash.

Capítulo 3

Presentación del dispositivo

3.1. Descripción General

El prototipo optomecatrónico implementado para la adquisición de medidas espectroscópicas con resolución angular está conformado por varios elementos que, en conjunto, permiten cuantificar las propiedades ópticas de los materiales en los intervalos espectrales de interés. Este sistema puede clasificarse, considerando la literatura consultada, como un goniómetro compacto. La Fig. (3.1) muestra, de forma esquemática, la distribución e interconexión de tales componentes en el proceso empleado para validar la prueba de concepto de forma experimental. Las partes contenidas en el cuadro a color fueron diseñadas y realizadas de forma específica para este proyecto. Los elementos fuera del cuadro son equipos comerciales, algunos de los cuales fueron modificados para cumplir una función particular.

Los elementos que integran el dispositivo han sido organizados en cuatro sistemas o categorías básicos:

- Sistema Óptico
- Sistema Mecánico
- Sistema Electrónico
- Sistema de Control

A continuación son enumerados cada uno de los elementos en tales categorías y descrita la función que cumplen en el desempeño del instrumento.

3.2. SISTEMA ÓPTICO

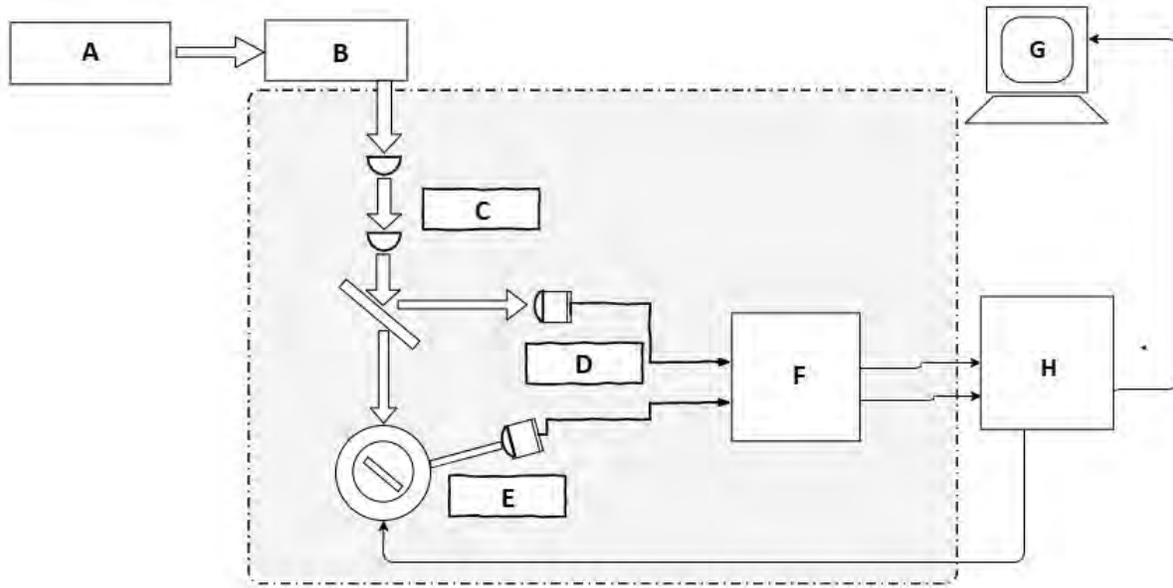


Figura 3.1: Esquema en bloques del dispositivo, donde **A** es una fuente de luz blanca, **B** es un monocromador, **C** es un sistema óptico de colimación, **D** es el sistema de fotodetección referenciado, **F** es un circuito electrónico acondicionador de señal, **H** es una tarjeta de adquisición entrada/salida y **G** es una computadora personal.

3.2. Sistema Óptico

Este sistema comprende todo los componentes que tienen una interacción directa con el haz de luz en su trayectoria, desde su emisión hasta su transducción. Por lo anterior, está compuesto, en primera instancia, por el conjunto de elementos que proporcionan un haz de luz cuasimonocromático, estable y colimado para realizar el estudio espectroscópico de la muestra. En este sistema están agrupados, también, los elementos de fotodetección (transductores). Estos componentes deben realizar una detección señal a ruido óptima de la luz transmitida y reflejada por el material, asegurando que los efectos de cualquier posible fluctuación de la fuente sean minimizados. Este sistema está compuesto por una lámpara espectral, un monocromador, una sección óptica para la colimación del haz de luz y la sección de detección óptica.

3.2.1. Fuente de iluminación

La fuente de luz es un sistema comercial manufacturado por la empresa Oriel Instruments y que corresponde al modelo APEX2. Esta fuente contiene una lámpara QTH de 100 W con un filamento de estructura planar densa que permite obtener la máxima brillantez en la emisión. Tiene un flujo aproximado de 3600 Lumens, una temperatura del color de 3300 °K

3.2. SISTEMA ÓPTICO

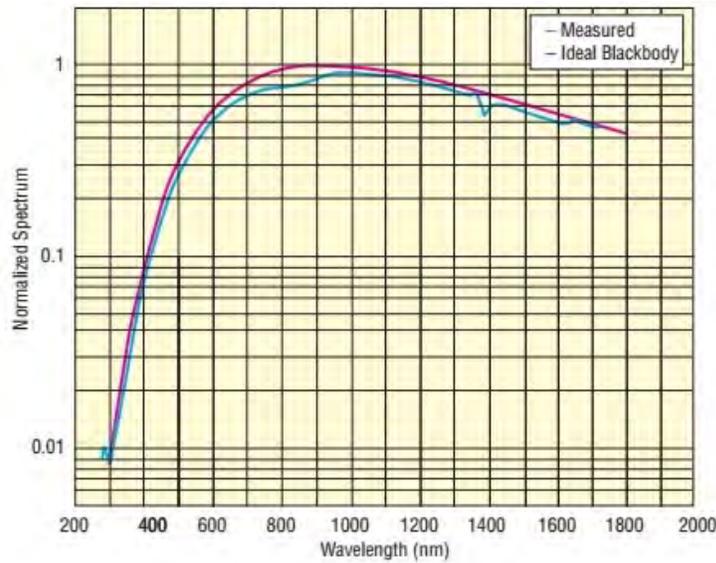


Figura 3.2: Espectro de la lámpara QTH.

y un promedio de vida de 50 horas. Estas lámparas usan un filamento dopado con tungsteno dentro de una cámara de cuarzo, la cual contiene una mezcla de gases noble y, en menor concentración, halógeno. Esta lámpara es acompañada por un reflector elipsoidal que dirige la radiación colimada hacia la abertura de salida. Debido a que en su propagación el haz diverge, también posee una lente colimadora que reduce el ángulo de divergencia del haz de salida a 5° . La potencia óptica entregada es de 9.4 W. Presenta una radiación continua como se muestra en la Fig. (3.2). El haz de salida posee un diámetro de 1.3 pulgadas. Es un sistema de iluminación de alta calidad con un rizado en la intensidad menor al 0.7% lo que lo hace ideal para este tipo de aplicaciones.[36] La fuente cuenta también con un disco para la colocación de filtros de color. Sin embargo, para este proyecto, este aditamento no fue empleado.

3.2.2. Monocromador

El monocromador es un equipo utilizado para obtener un haz de luz cuyo espectro electromagnético es muy angosto (línea espectral). El monocromador utilizado en este proyecto resultó al modificar un espectrógrafo modelo MS260i (Imaging Spectrograph) que, al igual que la fuente de iluminación, es manufacturado por la empresa Oriel Instruments. Este equipo posee un diseño óptico del tipo Czerny-Turner [37], ver Fig. (3.3), con la posibilidad de usar tres rejillas de difracción con frecuencias espaciales diferentes que están montadas sobre una torreta giratoria que permite seleccionar la más adecuada para la aplicación de interés. El monocromador usado en este proyecto tiene sólo dos rejillas, una de 600 l/mm y otra de 1200 l/mm. Estos elementos dispersivos están diseñados para difractar con máxima eficiencia en el

3.2. SISTEMA ÓPTICO

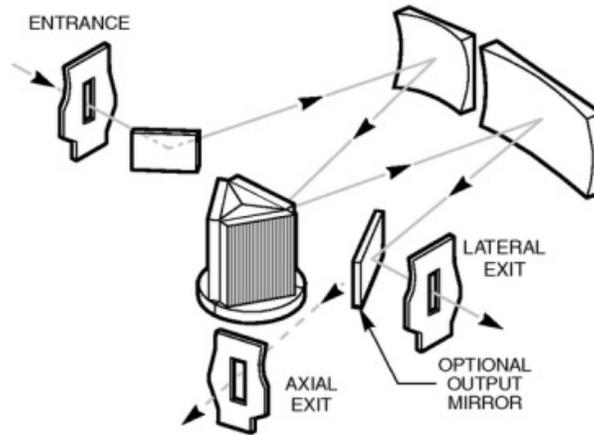


Figura 3.3: Configuración óptica del MS260i Imaging Spectrograph.

primer orden. La configuración descrita de este instrumento ofrece una alta resolución entre los 200-1350 nm. Por otro lado, el control de este equipo se realiza desde una computadora con una interfaz basada en LabView 5.0 [38].

El procedimiento para reducir el ancho espectral de la radiación óptica proporcionada por el APEX2 es descrito a continuación de forma breve. El haz de luz blanca es dirigido hacia el puerto de entrada del monocromador, donde está colocada una rendija angosta que limita la cantidad de luz que transita hacia el interior el instrumento. Un espejo cóncavo M1 con longitud focal $f_1 = 220$ mm captura la radiación entrante y forma la imagen de la rendija en el infinito en dirección de la rejilla de difracción. La modulación espacial del elemento difractor distribuye angularmente la radiación electromagnética como una función de la longitud de onda (dispersión óptica) en cada uno de los órdenes de difracción. El ángulo de ráfaga (blaze angle) de la rejilla permite obtener máxima eficiencia de difracción en un determinado orden, asociado con el poder de dispersión. La luz dispersada llega al segundo espejo cóncavo M2 con longitud focal $f_2 = 257$ mm, el cual se encarga de formar la imagen de la rendija de entrada en el puerto de salida del monocromador. En esa posición se sitúa un arreglo CCD (en el caso de que el instrumento funcione como un espectrográfo) o una rendija angosta para seleccionar un intervalo espectral mediante la rotación de la rejilla de difracción, ver Fig. (3.4).

El ancho de la línea espectral $\Delta\lambda$ a la salida del monocromador, configurado para emitir radiación con un espectro electromagnético centrado en la longitud de onda λ , puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda = W * R_d, \quad (3.1)$$

donde W es la mayor de las anchuras entre las rendijas colocadas en el monocromador, ya sea la de entrada o la de salida. R_d es el coeficiente de dispersión recíproca. Este representa

3.2. SISTEMA ÓPTICO

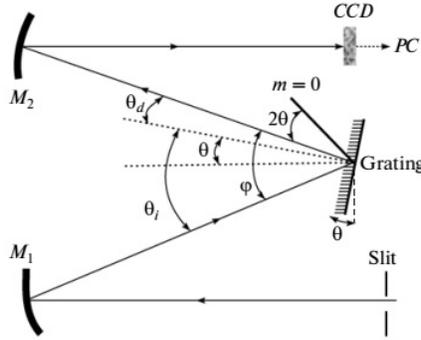


Figura 3.4: Configuración Czerny-Turner.

el rango de longitudes de onda contenido en cada intervalo de distancia sobre el plano focal de salida y resulta de

$$R_d = \frac{d * \cos(\theta_d)}{f_2 * m}, \quad (3.2)$$

donde d representa el espaciado entre las líneas de la rejilla o periodo espacial, θ_d es el ángulo de la luz difractada, m es el orden de difracción y f_2 es la distancia focal del espejo M2 [39].

Para ángulos de difracción pequeños, ($\theta_d < 20^\circ$) se puede considerar que $\cos(\theta_d) \sim 1$. En consecuencia,

$$R_d = \frac{d}{f_2 * m}, \quad (3.3)$$

y, por tanto,

$$\Delta\lambda = W * \frac{d}{f_2 * m}. \quad (3.4)$$

Basado en esto, al espectrográfo se le incorporó una rendija de salida con una anchura aproximada de $93 \mu\text{m}$ para configurarlo como un monocromador. Esta rendija fue fabricada en el laboratorio sobre una hoja de aluminio utilizando un láser pulsado con ancho temporal no mayor a 5 ns y una frecuencia de repetición de 10 Hz . La fluencia del láser fue concentrada con una lente convergente de longitud focal $f = 10 \text{ cm}$ sobre la hoja de aluminio. La alta densidad de energía produjo la ablación del material en el punto radiado. Mediante una plataforma motorizada de desplazamiento lineal, la hoja de aluminio fue desplazada transversalmente a una velocidad constante y moderada para lograr, después de varios viajes de ida y vuelta, una rendija con una longitud de 1 cm , aproximadamente. La hoja de aluminio maquinada con láser fue colocada entre dos portaobjetos para darle robustez y fue dispuesta en el puerto de salida. Por otra parte, el espectrógrafo tiene incorporado un selector mecánico de rendija de entrada con diferentes anchuras. La rendija seleccionada fue la de 0.6 mm de anchura que permitió obtener a la salida suficiente luz para efectuar las mediciones. Al combinar la anchura de estas rendijas con la rejilla de difracción de 600 l/mm , el monocromador entrega un haz de luz con un ancho de línea espectral de $(4.2 \pm 0.01) \text{ nm}$, lo cual es muy

3.2. SISTEMA ÓPTICO

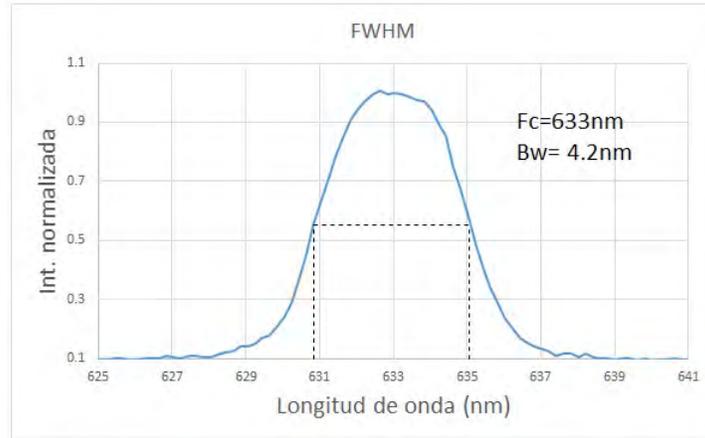


Figura 3.5: Ancho de la línea espectral centrada en 633 nm asociada a la radiación electromagnética entregada por el monocromador usado en el dispositivo como fuente de luz.

próximo al resultado teórico de 3.89 nm obtenido a partir de la Ec. 3.4. La anchura total a la mitad del valor máximo (FWHM) experimental del espectro electromagnético a la salida del monocromador fue comprobada utilizando un espectrómetro USB-4000 de Ocean Optics. La Fig. (3.5) muestra el perfil de la línea espectral cuando el espectrógrafo fue sintonizado a una longitud de onda $\lambda = 633$ nm.

Es importante señalar que el fabricante indica que el espectrógrafo MS260i posee una amplificación de 1.6 en la dirección vertical y 1.1 en la horizontal [38].

3.2.3. Colimación del haz y obtención de referencia

De acuerdo a la norma ASTM E1164 las condiciones del cono de luz de entrada y salida (influx y efflux) indican que el ángulo máximo no puede exceder los 5° [40]. De ahí la necesidad de utilizar un sistema de lentes para disminuir la divergencia del haz de luz a la salida del monocromador y cumplir con este requisito. Debido a que el haz de luz es rectangular y diverge de forma diferente en la dirección horizontal y vertical se utilizan dos lentes cilíndricas, una de 2 cm de distancia focal orientada horizontalmente y otra de 4 cm de distancia focal orientada verticalmente. La Fig. (3.6) muestra las distancias entre la rendija de salida del monocromador y las dos componentes ópticas. Las dimensiones de la mancha sobre el plano de la muestra, colocada a una distancia $d_m = 240$ mm, fueron ancho $a = 0.9$ mm y largo $b = 8$ mm, aproximadamente.

En la trayectoria del haz de prueba colimado fue colocado un divisor de haz desbalanceado 10:90, donde la radiancia transmitida hacia la muestra es mayor que la reflejada. El haz reflejado proporciona una señal óptica de referencia que permitirá eliminar la influencia de las fluctuaciones en la radiación emitida por la fuente de luz en la señal óptica transmitida o reflejada por la muestra. El procedimiento estándar para lograr este resultado es obtener

3.2. SISTEMA ÓPTICO

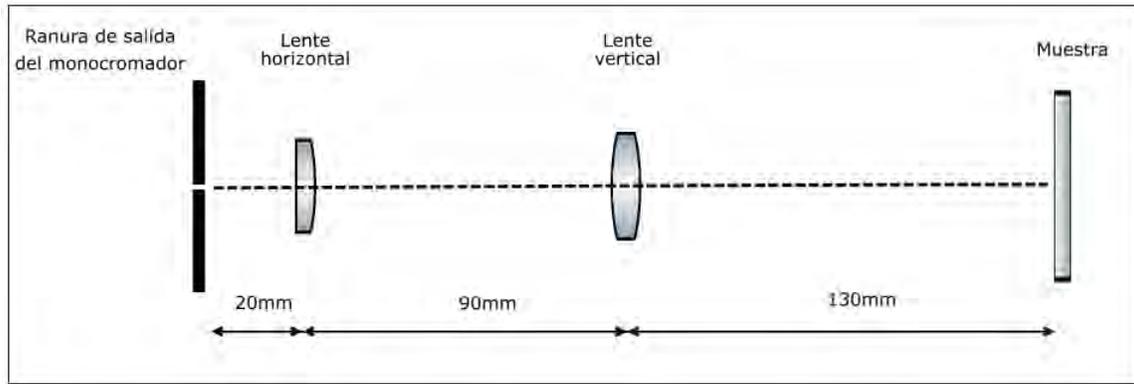


Figura 3.6: Arreglo de lentes cilíndricas a la salida del monocromador

la razón entre la señal transmitida de referencia (aire) S_e y la señal reflejada en el divisor de haz desbalanceado S_r . Esto es:

$$R_d = \frac{S_e}{S_r}. \quad (3.5)$$

Luego para conocer la intensidad de la luz que incide sobre la muestra en cada instante.

$$I = R_d * S_r \quad (3.6)$$

y así

$$T = \frac{I_{out}}{I} = \frac{I_{out}}{R_d * S_r} \quad (3.7)$$

Para la reflectancia se sigue el mismo procedimiento solo que se obtiene el factor R_d utilizando como referencia un espejo.

La curva espectral del comportamiento del divisor de haz fue obtenida experimentalmente y se tiene en cuenta para la calibración del instrumento.

3.2.4. Detectores de radiación óptica

Tanto el haz de referencia como la radiación que interactúa con la muestra son integradas por fotodetectores idénticos del tipo FDS010 de THORLABS, los cuales tienen una respuesta en el intervalo espectral (200-1100) nm. Este componente es un fotodiodo de silicio con área efectiva de 0.8 mm^2 , encapsulado TO-5 cuyo diámetro aproximado es de 0.9 cm y conexiones tanto al ánodo como al cátodo. La corriente que circula por este fotodiodo está en función de la intensidad de la luz incidente. Por lo tanto se hace necesario incorporar un circuito para convertir esta señal de corriente en una señal de voltaje. Aunque la responsividad varía en función de la longitud de onda como se observa en la Fig. (3.7), este efecto se anula en la relación final puesto que ambos detectores son iguales. [41].

La responsividad máxima del fotodetector reportada por el fabricante es de 0.44 A/W cuando la radiación incidente es de 730 nm, mientras que los transitorios de subida/bajada a

3.3. SISTEMA MECÁNICO

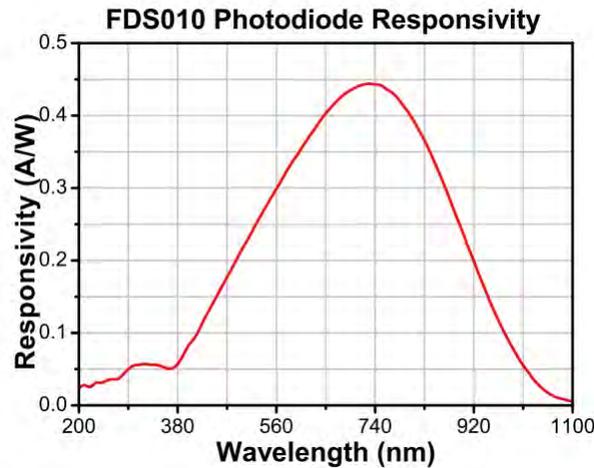


Figura 3.7: Responsividad de fotodiodo FDS010.

830 nm son de 1 ns/1 ns. Estas características limitan el umbral mínimo de detección pero, al mismo tiempo, permiten obtener 1500 mediciones en un tiempo corto y calcular un valor promedio que permite incrementar la razón señal a ruido.

3.3. Sistema Mecánico

Entre los requerimientos solicitados para el goniofotómetro compacto desarrollado, uno de los más importantes es la capacidad de medir las propiedades de reflectancia y transmitancia, tanto directas como difusas, de una muestra con dimensiones máximas de $3 \times 3 \text{ cm}^2$. Por lo anterior, el dispositivo debe contar con un sistema mecánico para adquirir las mediciones con resolución angular. Es decir, es contar con la habilidad de poder orientar la fuente de iluminación, la muestra y el receptor según lo requiera el estudio. Un tipo muy común de estos instrumentos son los que se ocupan de analizar el comportamiento de la luz esparcida solamente en el plano de incidencia y que son conocidos como en plano. Basados en esto se diseñó el sistema mecánico que se encarga, en primer lugar de rotar la muestra para lograr que la luz incida sobre esta al ángulo necesario. La segunda montura giratoria se encarga de posicionar el sensor a un ángulo específico o de realizar un barrido alrededor de la muestra para analizar el comportamiento de la luz esparcida por esta de forma difusa. La literatura indica algunos requerimientos a tener en cuenta a la hora de diseñar este tipo de instrumentos[8]. Las etapas giratorias deben tener sus ejes alineados de tal forma que la distancia muestra-detector no cambie para los distintos ángulos de trabajo. Además, la parte frontal de la muestra debe coincidir con estos ejes.

Atendiendo a lo anterior las dos monturas rotatorias están dispuestas sobre una estructura como se muestra en la figura 3.8. Los motores que las accionan son del tipo NEMA 17 bipolares de 3.7 cm y de 1.8° por paso. Para aumentar la resolución angular se utiliza un driver de

3.4. SISTEMA ELECTRÓNICO

micropasos del tipo A4988.

Además consta de un alojamiento para colocar muestras planas cuadradas de 3x3 cm. y un soporte de altura regulable para el sensor. Debido a las bajas cargas que se manejan no se necesita que el movimiento se realice sobre apoyos especiales sino que el soporte de la muestra y el sensor se acoplan directamente a la flecha del motor y los puntos de apoyo para el movimiento lo constituyen los propios cojinetes de los motores. Este diseño contribuye a evitar errores mecánicos e histéresis, elementos que se encuentran presentes en casi todos los mecanismos de transmisión de potencia. La estructura de soporte está construida en placas de aluminio 6063-T1 de 6mm de espesor que ofrecen la rigidez suficiente que requiere el sistema [42]. La sujeción de los motores se realiza utilizando pernos autocentrantes de manera que los centros de giro de ambos mecanismos quedan alineados en el propio proceso de ensamblaje. Todo el sistema se soporta sobre una base preparada para fijarse a una mesa holográfica para que así el dispositivo pueda utilizarse como un módulo autónomo.

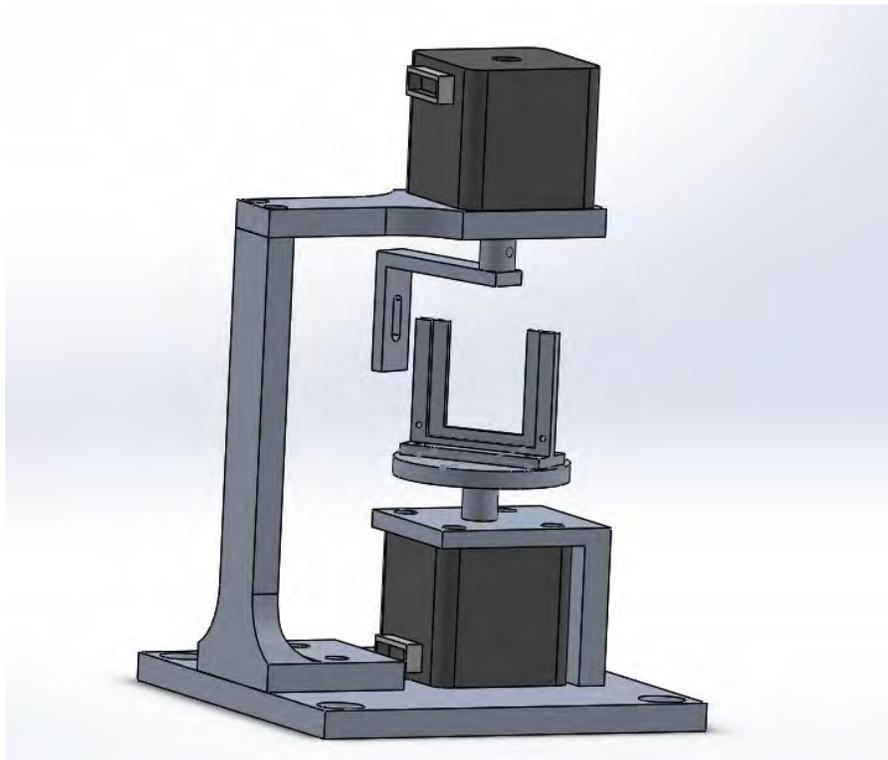


Figura 3.8: Sistema mecánico.

3.4. Sistema Electrónico

El sistema electrónico está compuesto por dos secciones. Una que se encarga de la alimentación y control de los motores a pasos y la otra que se encarga del acondicionamiento

3.4. SISTEMA ELECTRÓNICO

de la señal óptica recibida por los sensores.

3.4.1. Control de motores

El control de los motores se realiza utilizando dos driver A4988 configurados para trabajar en 1/16 paso. Para ello se conectan los pines M0, M1, M2 a 5v emulando un "1" lógico. De esta forma se logra una resolución angular de aproximadamente 0.1125 grados/paso.[43] También la habilitación del movimiento y la dirección de giro se gestionan a través de estos circuitos. La principal función de los driver consiste en convertir las señales provenientes del sistema de control que son de baja corriente en señales con la intensidad suficiente para alimentar los devanados de los motores a pasos. Además este circuito se encarga de convertir los pulsos provenientes del sistema de control en una secuencia ordenada para las entradas del motor de tal forma que se produzca el giro. Los voltajes de alimentación de 5V y 12V que se utilizan en este prototipo se obtienen de una fuente de laboratorio.

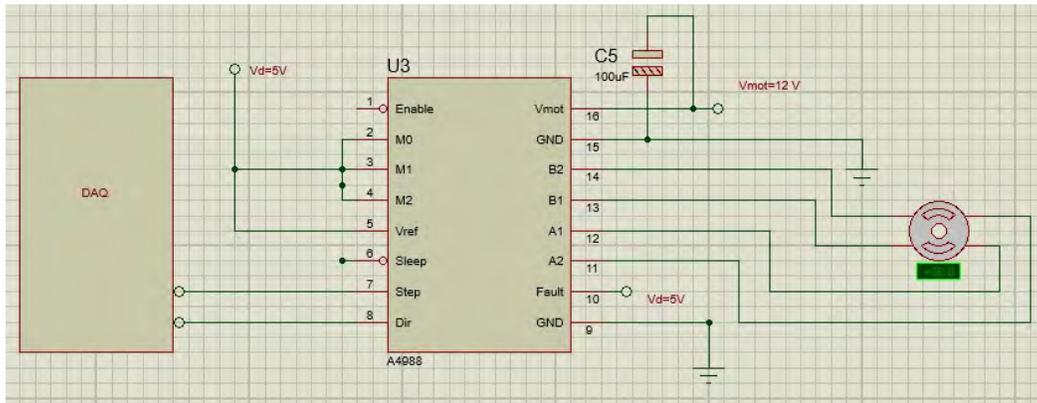


Figura 3.9: Control de los motores a pasos.

3.4.2. Acondicionamiento de señales

Para los fotodetectores del tipo FDS010 la responsividad aumenta cuando se le aplica un voltaje inverso debido a que mejora la eficiencia de la colección de cargas.[41] El fabricante recomienda un circuito como se muestra en la figura 3.10. La resistencia R1 y el capacitor C1 forman un filtro pasabajos implementado para eliminar el ruido de alta frecuencia. Teniendo en cuenta las características de este sistema donde los niveles de señal son muy bajos y el ruido electrónico se hace notable debido fundamentalmente al funcionamiento de los motores, se aumentó la capacitancia de C1 con respecto al valor indicado comprobando que para 220 nF se obtiene una señal más limpia. La corriente que circula por el fotodiodo está en función de la iluminación que incide sobre este pero es la resistencia de carga RL la que tiene la función de hacer efectiva la conversión de esa corriente a valores de voltaje que puedan ser

3.5. SISTEMA DE CONTROL

sensados por un dispositivo de adquisición de datos. Al tratarse de corrientes tan débiles y teniendo en cuenta la alta impedancia de entrada de la Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ-NI) se consideró un valor para la resistencia de carga R_L de $2M\Omega$

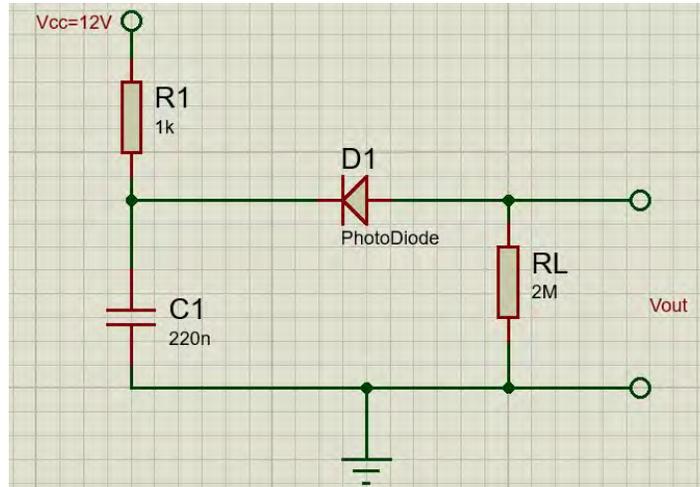


Figura 3.10: Circuito de polarización del fotodiodo FDS-010.

3.5. Sistema de Control

El sistema de control está constituido de dos elementos de hardware: una computadora y una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.

3.5.1. Tarjeta de adquisición de datos

Es una tarjeta de adquisición de datos modelo NI - USB 2926. Este dispositivo posee 32 entradas analógicas con una razón de adquisición de 250 kS/s y una resolución de 16 bits. Además posee 48 terminales digitales de entrada/salida. A través de las salidas digitales p4 y p5 la tarjeta de adquisición indica al driver el sentido de giro y los pasos del motor que mueve la muestra. A través de las salidas P6 y P7 se indican el sentido de giro y los pasos del motor que mueve al sensor.

Las entradas analógicas AI0 y AI1 se utilizan para captar las señales de los fotodetectores. Por AI0 se toma la señal de referencia y por AI1 se lee la señal resultante de la interacción con la muestra. Estas entradas fueron configuradas en el modo diferencial siguiendo instrucciones del fabricante para el tratamiento de señales pequeñas. Para ello es necesario colocar una resistencia de referencia al terminal de tierra (GND). Se utiliza una resistencia de $1 M\Omega$ observando que la impedancia de entrada de la tarjeta es de $10 M\Omega$. La lectura de estas señales se realizan a una razón de adquisición de 10 kS/s y para cada valor reportado se promedian 1500 lecturas.

3.6. INTERFAZ DE USUARIO

3.5.2. Software

El programa de control de todo el sistema se desarrolló utilizando la plataforma Labview 2016. Para este caso se implementó una estructura del tipo Queued Message Handler. Esta estructura permite el manejo óptimo de la interfaz del usuario sin necesidad de consumir tantos recursos de la computadora. Así el programa solo ejecuta una acción cuando ocurre un evento en la interfaz de usuario. Además se utiliza un archivo donde se guardan los datos fundamentales como: ángulo del sensor, ángulo de la muestra, longitud de onda actual, factor de calibración, Etc, lo que evita continuas calibraciones del instrumento o la utilización de sensores de posición para las monturas.

3.6. Interfaz de usuario

Debido a las múltiples funciones y variables que se manejan el control del sistema puede resultar un tanto complejo. No obstante la interfaz de usuario está diseñada con la intención de poder realizar la gestión del instrumento de una manera intuitiva. Cada función posee sus indicadores de manera que el usuario tenga conocimiento del resultado de sus acciones desde la pantalla de la computadora. Además hay un indicador de Status que avisa cuando el sistema se encuentra realizando una acción o está listo para una nueva instrucción.

3.6.1. Control de la muestra.

Permite girar la muestra a una posición específica, definiendo de esta forma el ángulo de incidencia de la luz. El ángulo puede introducirse directamente o también permite incrementos y decrementos discretos en pasos de 5° . Después de cada acción se refresca la posición de la muestra.

3.6.2. Control del sensor.

Con la intención de poder medir la luz esparcida en cualquier dirección, el usuario puede posicionar el sensor a un ángulo específico o realizar incrementos o decrementos del ángulo en pasos de 5° . La posición se indica después de cada acción.

3.6.3. Longitud de onda y grados a barrer

En la interfaz se debe indicar la longitud de onda central con la cual se está iluminando la muestra. Este dato es imprescindible ya que el software realiza correcciones teniendo en cuenta la respuesta espectral de los distintos elementos del sistema.

3.6. INTERFAZ DE USUARIO

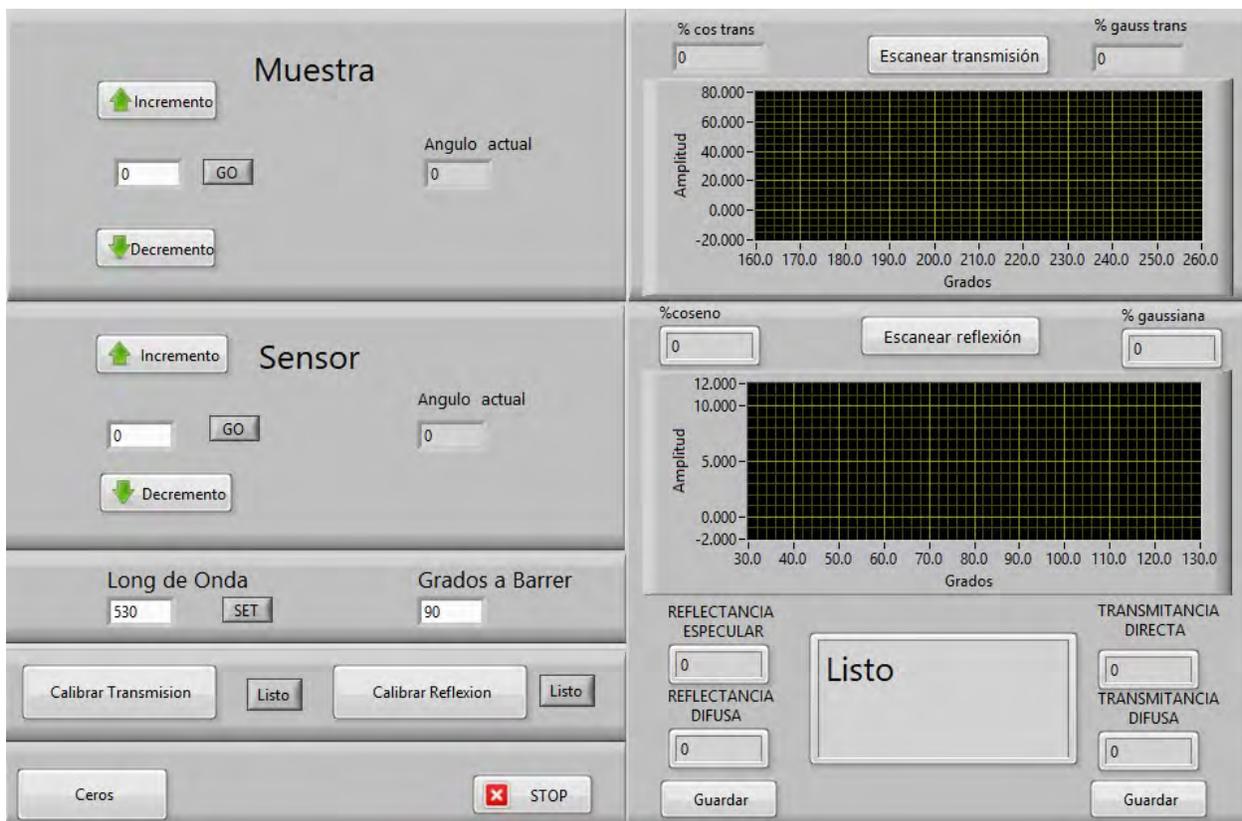


Figura 3.11: Aplicación del sistema.

Por otro lado, el barrido para captar la luz esparcida, por defecto se ejecuta en un intervalo de 30° , tomando como centro el ángulo especular para el caso de la reflexión y 180° para el caso de la transmisión. Sin embargo, el usuario tiene la posibilidad de cambiar este valor según sus requerimientos.

3.6.4. Calibración de la transmisión.

Para la calibración de la transmisión el software indica que se debe establecer una longitud de onda de iluminación de 530 nm y dejar el compartimento de la muestra vacío. El sistema realiza una medición de la transmitancia en estas condiciones y así se establece el 100% de la transmitancia. Luego se extrapola para todo el rango de longitudes de onda.

3.6.5. Calibración de la reflexión.

Al igual que para la transmisión, también se pueden calibrar las medidas de reflexión. El usuario debe decidir si necesita calibrar para medir reflectancia especular utilizando como

3.6. INTERFAZ DE USUARIO

referencia un espejo, o calibrar la reflectancia difusa utilizando como patrón una referencia de reflectancia difusa (Teflón).

3.6.6. Escanear la reflexión.

Esta acción permite realizar un barrido en el hemisferio de reflexión y alrededor del ángulo especular para graficar la distribución angular de la luz reflejada. El barrido se realiza en pasos de 0.33° y en cada paso se promedian 1500 mediciones para eliminar los efectos del ruido. Al concluir la medición el resultado se plotea en un indicador gráfico y se haya el factor de correlación de esta curva con un reflector lambertiano perfecto y con un reflector gaussiano perfecto para clasificar el tipo de reflectancia que presenta la muestra.

3.6.7. Escanear la transmisión.

Se realiza un barrido en el hemisferio de transmisión y alrededor de la dirección regular de transmisión. También existe un indicador gráfico para plotear la distribución angular de la luz transmitida. La resolución angular es de 0.33° .

3.6.8. Reflectancia Especular.

Del proceso de escaneo de la reflexión se toma el valor de la intensidad al ángulo al cual ocurre la reflexión especular. Luego se calcula la relación entre la intensidad reflejada y la intensidad incidente obteniéndose la reflectancia especular de la muestra. El usuario tiene la opción de guardar el valor encontrado en un archivo Excel.

3.6.9. Reflectancia difusa.

Para calcular que porción de la luz se refleja de manera difusa se elimina del arreglo la componente que corresponde a la reflexión especular. Luego se integra el total restante de la luz reflejada y se utiliza para hallar una razón con el valor obtenido durante el proceso de calibración.

3.6.10. Transmitancia directa.

Del proceso de escaneo de la transmisión se obtiene el valor de intensidad de la luz transmitida en la dirección regular. Luego se calcula la razón con la intensidad incidente y se reporta como la transmitancia directa de la muestra. El usuario tiene la opción de incorporar el valor al archivo Excel.

3.6. INTERFAZ DE USUARIO

3.6.11. Transmitancia difusa

Al igual que para la reflectancia difusa para calcular la transmitancia difusa se elimina la componente que corresponde a la transmisión directa y se integra el total restante de la luz transmitida. Este valor se utiliza para hallar la razón con la intensidad incidente y se reporta con la luz transmitida de manera difusa por la muestra. También puede ser exportada en el archivo excel

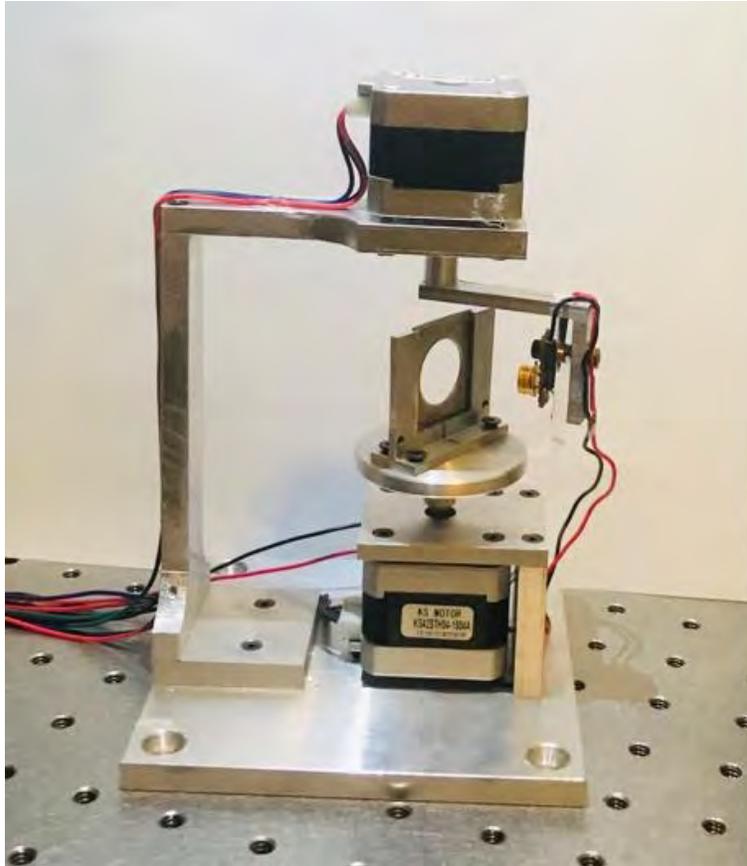


Figura 3.12: Dispositivo.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Características estáticas

4.1.1. Exactitud

Para obtener una medida de la exactitud de las mediciones realizadas con el instrumento se utilizaron dos divisores de haz, uno 50/50 y otro de 70/30. A los mismos se les midió la transmitancia y la reflectancia realizando un barrido en todo el espectro de interés. Luego estas mediciones se compararon con las realizadas en un espectrofotómetro comercial de tipo Lambda 900. El grado de concordancia entre ambos instrumentos se puede comprobar en las figuras (4.1 - 4.4).

En la figura 4.1 que describe el comportamiento de la transmitancia del divisor de haz 50/50 se puede observar una alta coincidencia de ambas mediciones en el intervalo de 450nm a 650nm. Aunque en el intervalo desde 650 nm hasta 700nm las mediciones se separan más el error absoluto promedio en todo el rango es de 0.72 %. En la figura 4.2 se puede apreciar las mediciones de la reflectancia del divisor de haz 50/50. Las curvas de ambos instrumentos poseen un comportamiento similar. El error absoluto promedio en todo el rango es de 0.98 %.

La transmitancia del divisor de haz 70/30 se muestra en la figura 4.3. Las curvas obtenidas por ambos instrumentos presentan un error absoluto promedio en todo el rango de 0.89 %. En cuanto a la reflectancia de este divisor el comportamiento descrito por el espectrofotómetro comercial y por el dispositivo multiangular son muy parecidos en todo el rango de medición. Esto hace que el error promedio entre ambos instrumentos sea de 0.36 % (ver figura 4.4)

4.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

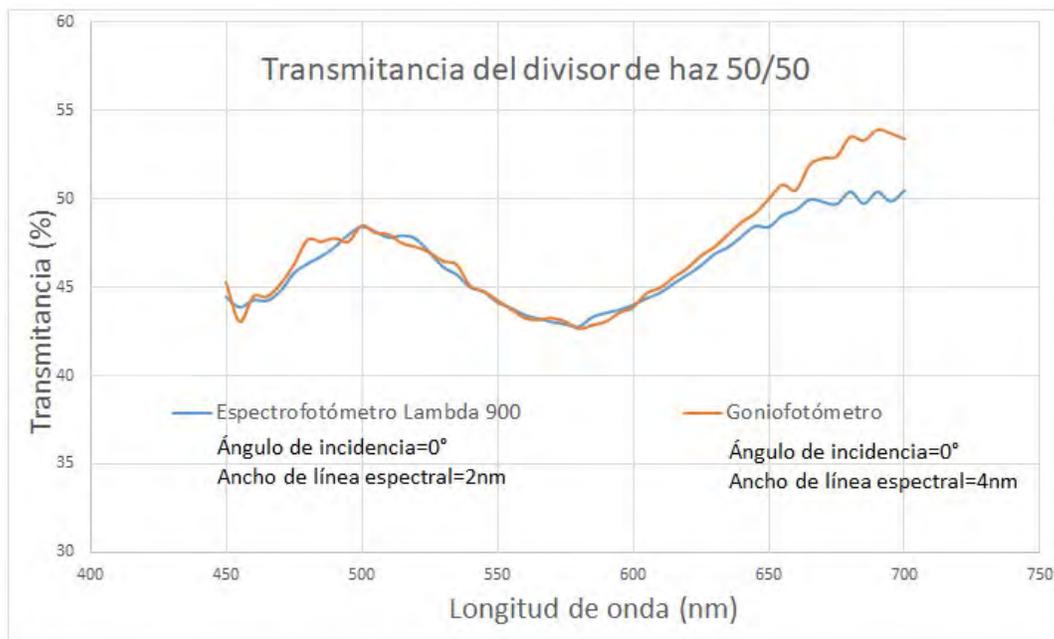


Figura 4.1: Transmitancia del divisor de haz 50/50 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.

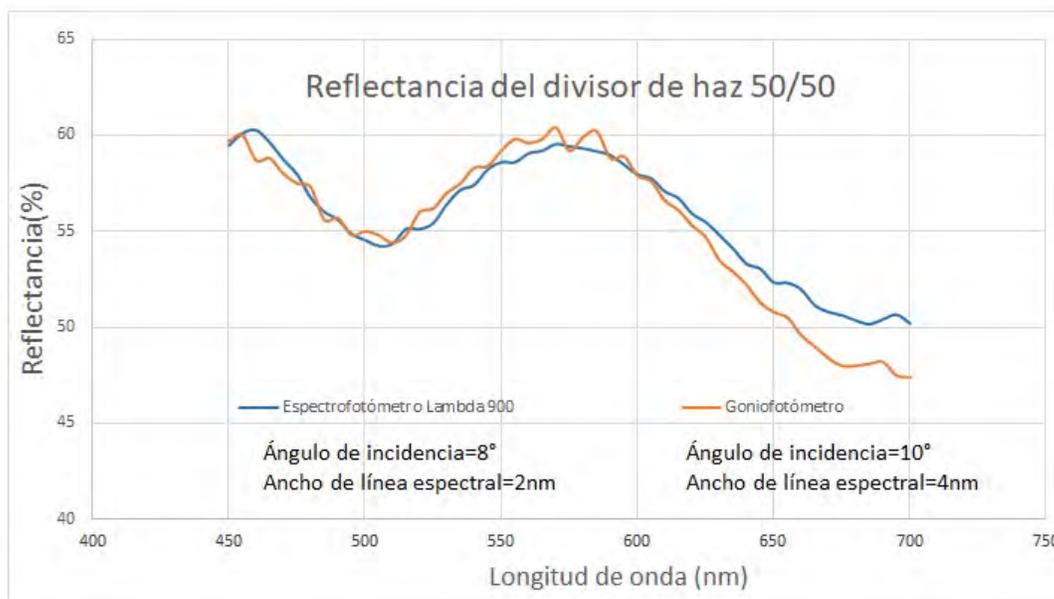


Figura 4.2: Reflectancia del divisor de haz 50/50 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.

4.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS



Figura 4.3: Transmitancia del divisor de haz 70/30 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.

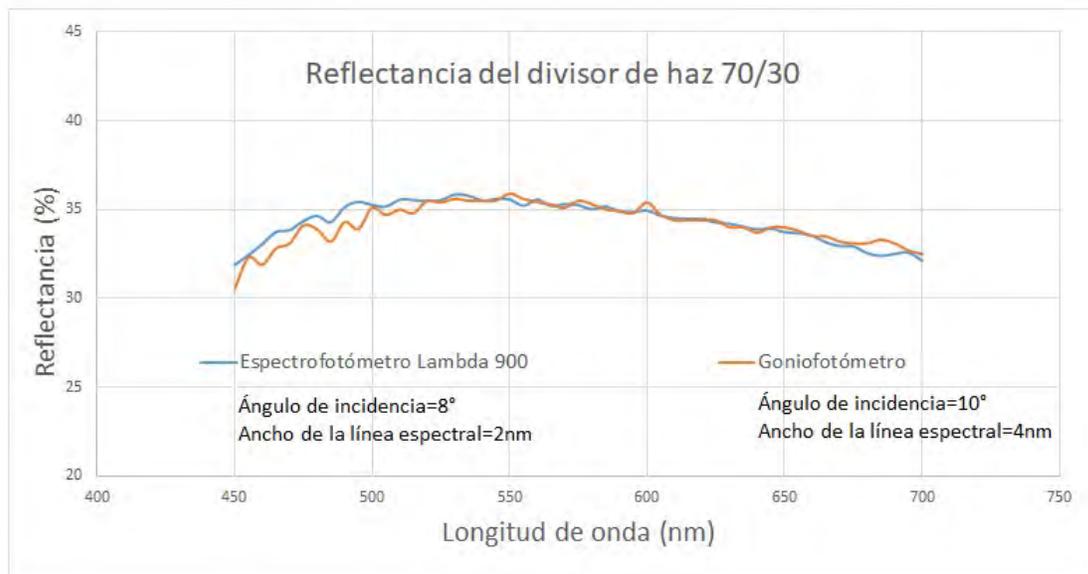


Figura 4.4: Reflectancia del divisor de haz 70/30 medida con un instrumento comercial y con el dispositivo multiangular.

4.1.2. Precisión

La precisión de las mediciones tomadas con este dispositivo resulta crucial en el resultado final de la simulación de superficie que se va a realizar. Es por esa razón que para cada punto

4.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

de la gráfica se promedian 1500 mediciones. Esto definitivamente alarga el tiempo de captura pero contribuye a que la dispersión de los datos obtenidos sea muy pequeña. Se empleó un divisor de haz 70/30 como objeto de pruebas y con una iluminación a 530 nm se realizaron 10 mediciones de reflectancia y 10 mediciones de transmitancia. En la figura 4.5 se muestra la dispersión de los datos de la transmitancia del divisor. La desviación estandar obtenida es de 0.11 %. Para la reflectancia la desviación estandar encontrada fue de 0.13 %.(Ver figura 4.6).

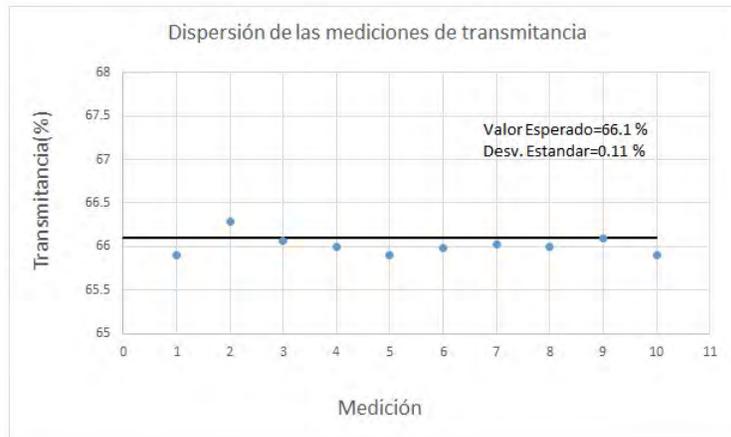


Figura 4.5: Dispersión de los datos en las mediciones de transmitancia.

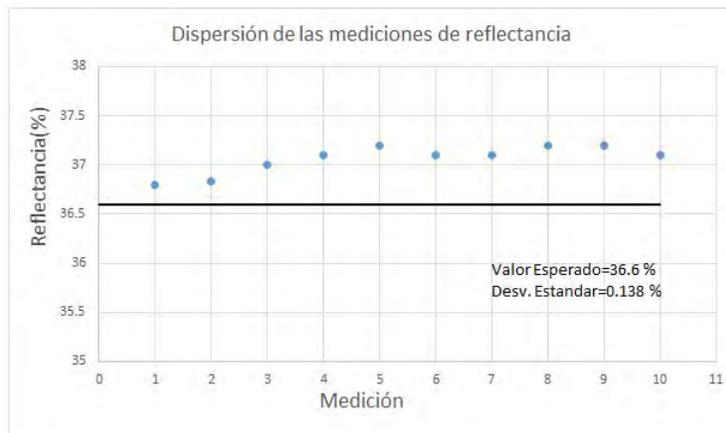


Figura 4.6: Dispersión de los datos en las mediciones de Reflectancia.

4.1.3. Repetibilidad del posicionamiento angular

Para comprobar cuan repetible se comporta el dispositivo a la hora de posicionar la muestra y el sensor a un ángulo determinado se realizaron 10 mediciones. Se utilizó una

4.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

muestra reflejante y se realizó el barrido para encontrar el ángulo de la reflexión especular. Luego se midió la dispersión angular del máximo de la reflexión. Se comprobó que en este caso el error de posicionamiento coincide con el tamaño del paso con el cual se realiza el barrido ($0,33^\circ$) (ver figura 4.7). La posición del máximo y de toda la curva apenas se desvían en las 10 mediciones realizadas. Cabe señalar que los valores de los ángulos indicados por este dispositivo son relativos y se calculan a partir de los datos que ofrece el fabricante de los motores sobre la resolución angular de los mismos ($1,8^\circ/\text{paso}$). El driver que controla los motores está configurado para que el motor avance a $1/16$ paso lo que es equivalente a $0,1125^\circ$. Así si el usuario selecciona 30° el motor se mueve 266 pasos en esta configuración que equivale a $29,925^\circ$.

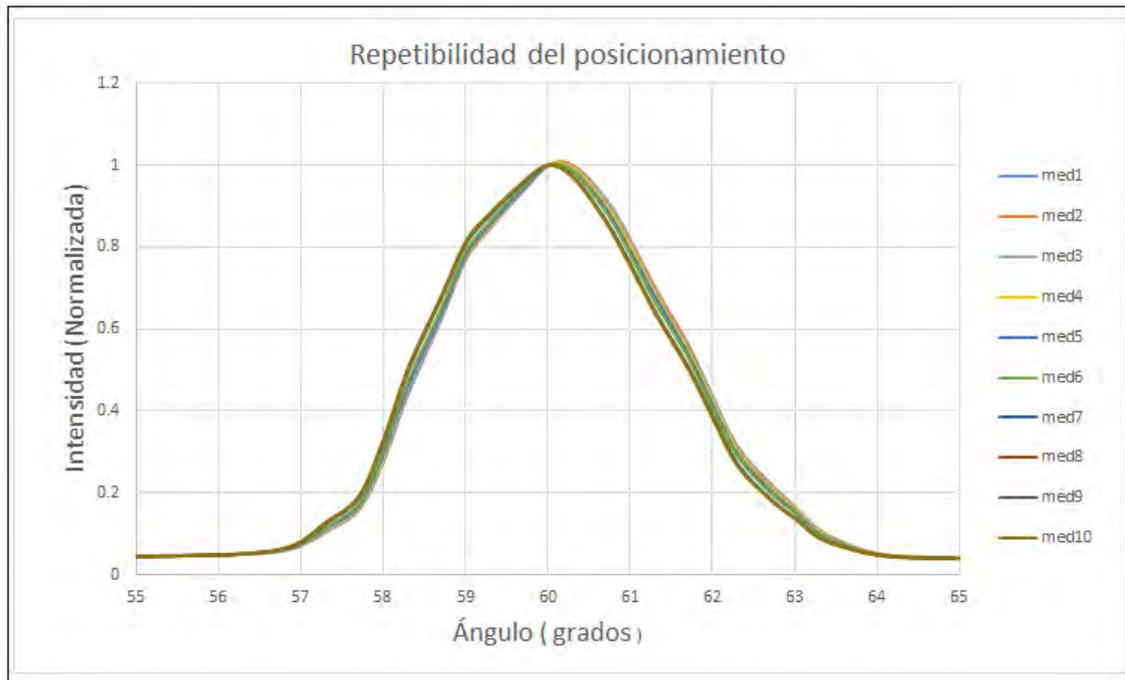


Figura 4.7: Repetibilidad del posicionamiento.

4.1.4. Linealidad

Por la dificultad que supone encontrar elementos ópticos correctamente caracterizados que puedan ser utilizados como patrón resulta complicado realizar un estudio de la linealidad de la escala del instrumento. Se empleó un juego de filtros de densidad óptica neutra de Newport para comprobar la linealidad de la escala en transmisión. Los resultados obtenidos de forma experimental para una longitud de onda central de la iluminación de 530 nm se muestran en la tabla 4.1. Podemos notar la alta concordancia entre los valores medidos y los reportados por el fabricante sobre todo en la parte baja de la escala.

En la figura 4.8 se puede observar que la escala de transmitancia para 530 nm tiene un

4.1. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

Tabla 4.1: Transmitancia de los filtros de densidad óptica neutra

DO	Transmitancia Fabricante(%)	Transmitancia Medida(%)	Error (%)
2	1	0.9	0.1
1	10	9.86	0.14
0.8	15.8	15.6	0.2
0.6	25.1	24.2	0.9
0.4	39.8	40.4	-0.6
0.2	63.09	64.7	-1.61
0.05	89	93	-4

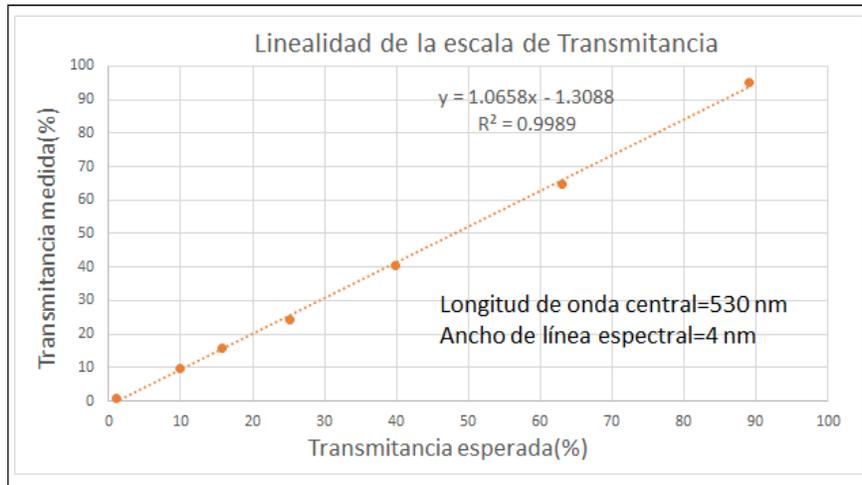


Figura 4.8: Linealidad de la escala de transmitancia para 530 nm.

comportamiento básicamente lineal a pesar de la naturaleza no lineal que presentan muchos circuitos electrónicos. Es aconsejable realizar este estudio en todo el rango de longitudes de onda de interés para proponer el ajuste por medio de un polinomio y eliminar los errores que de este comportamiento se derivan.

Analizar la linealidad de la escala de reflectancia resultó más difícil por no contar con elementos que pudieran ser utilizados como patrón. Por lo tanto se tomaron como referencia las medidas de reflectancia realizadas con un espectrofotómetro comercial del tipo Cary -5000 de Agilent Technologies [44], suponiendo que el mismo se encuentra calibrado adecuadamente. Así se avalan de alguna manera las mediciones obtenidas con el dispositivo. La figura 4.9 muestra la linealidad de la escala en transmitancia. No obstante, se hace necesario contar con más puntos que permitan evaluar todo el rango. En la imagen ampliada se muestra la pequeña barra de error que presentan los datos en esta medición.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

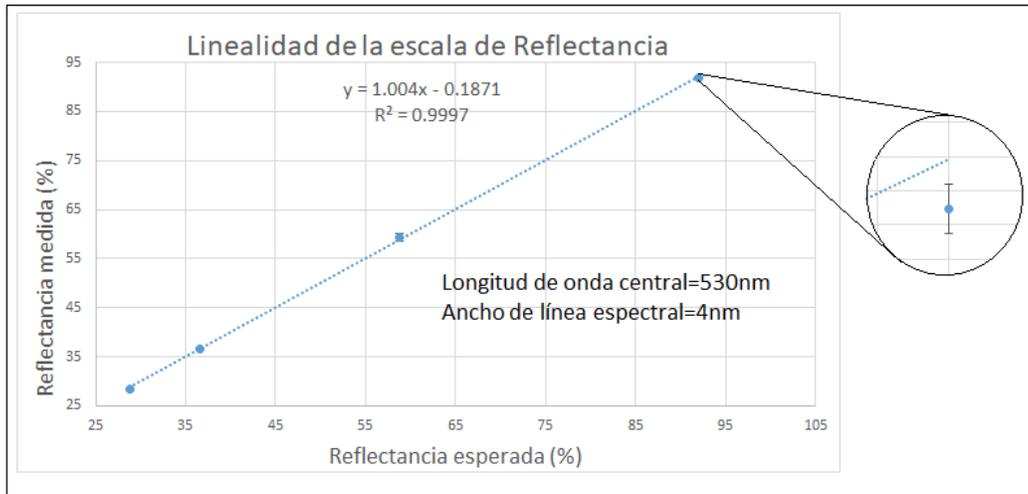


Figura 4.9: Linealidad de la escala de la reflectancia para 530 nm.

4.1.5. Estabilidad

La utilización de una fuente de iluminación de 100w implica la generación de calor. El calor modifica el funcionamiento de los elementos que componen el monocromador. Esto incide directamente sobre las características del haz de salida. Fundamentalmente se altera el ángulo de salida del haz monocromático lo cual introduce errores en las mediciones. En la figura 4.10 a) se muestra un cambio gradual del valor en las mediciones de reflectancia conocido como deriva [45], ocurrida durante la primera hora de trabajo en la cual se hace más evidente la inestabilidad térmica. Inmediatamente después de encender la fuente, se calibra el dispositivo y se procede a realizar la medición de la reflectancia de la muestra cada 5 minutos. El valor real de la reflectancia de la muestra es de 36.6 % En el lapso de una hora la medición cambia en un 3.9 %.(ver tabla 4.2)

Por otro lado en la segunda hora de trabajo la deriva se hace mucho menor en la medida que el sistema se vuelve más estable. En este intervalo de tiempo el valor de reflectancia solo varía en un 1.15 % ,(ver tabla 4.3 y figura 4.10 b)).

Para evitar los errores producidos por la deriva del sistema se esperó una hora o más después de encendida la lámpara para comenzar a medir y además para los casos que requirieron intervalos de tiempo muy largos de operación se realizaron calibraciones sistemáticas.

4.2. Caracterización de superficies automotrices

Atendiendo las necesidades del cliente se procedió a caracterizar ópticamente varios materiales que componen el tablero de los vehículos. La plataforma de simulación requiere una serie de parámetros indispensables para completar la simulación de apariencia de forma sa-

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

Tabla 4.2: Deriva en la primera hora

Tiempo(min)	Reflectancia(%)	Error(%)
0	36.8	0.2
5	37.8	1.2
10	38.1	1.5
15	38.45	1.85
20	38.7	2.1
25	39	2.4
30	39.4	2.8
35	39.76	3.16
40	39.75	3.15
45	39.9	3.3
50	40	3.4
55	40.2	3.6
60	40.5	3.9

Tabla 4.3: Deriva en la segunda hora

Tiempo(min)	Reflectancia(%)	Error(%)
60	36.7	0.1
65	36.9	0.3
70	37.1	0.5
75	37.2	0.6
80	37.25	0.65
85	37.4	0.8
90	37.45	0.85
95	37.5	0.9
100	37.55	0.95
105	37.6	1.0
110	37.65	1.05
115	37.7	1.1
120	37.75	1.15

tisfactoria. Determinar estos parámetros implicó la realización de un gran número de pruebas utilizando el dispositivo. La figura 4.11 muestra la máscara del panel de un automóvil.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

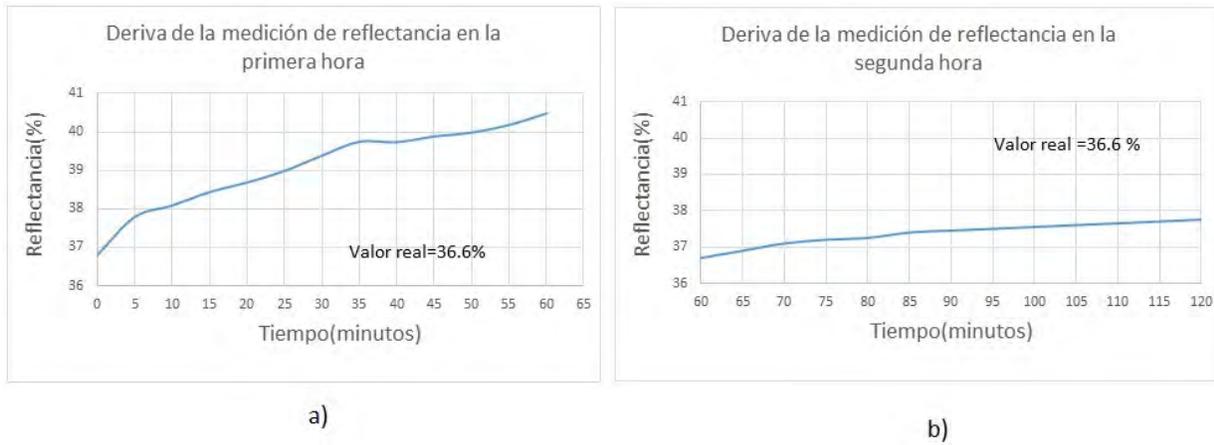


Figura 4.10: Deriva de la reflectancia. a) Primera hora de trabajo. b) Segunda hora de trabajo



Figura 4.11: Panel de vehículo

4.2.1. Determinación de la reflectancia de los plásticos

Una parte fundamental del sistema de iluminación de los tableros de los automoviles lo constituye el encapsulado que encierra los LEDs. Este está formado por materiales con una alta reflectancia difusa. En este caso se emplean plásticos a los que se añade Dióxido de Titanio debido a las propiedades que presenta este material de tener una baja absorción en la región del espectro visible.[46], [47] Se requiere conocer la reflectancia y la absorbancia de este material además del grado de semejanza con un difusor lambertiano perfecto. Por otro lado se necesita una comparación de las propiedades ópticas de estos plásticos con diferentes concentraciones de TiO_2 . En la figura 4.12 se observa la distribución angular de la reflexión del plástico con TiO_2 al 15% de concentración. Para modelar la reflectancia de una superficie existen muchos métodos [48]. En este caso se utiliza el criterio de considerar la intensidad reflejada como una superposición de la componente gaussiana y la componente

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

lambertiana [49]. Para lograr esto en primer lugar se realiza un ajuste con la función coseno. Luego se extrapola esta función a los 180 grados del hemisferio para recuperar la componente Lambertiana de la reflexión. Se realiza la integral para conocer el área debajo de la curva de cada una de las funciones y poder estimar que porcentaje de la reflexión se da de forma lambertiana y que porcentaje de forma gaussiana. El análisis de estos materiales se realizó estableciendo un ángulo de incidencia de 10° para las longitudes de onda indicadas. Los resultados se muestran en la tabla 4.4

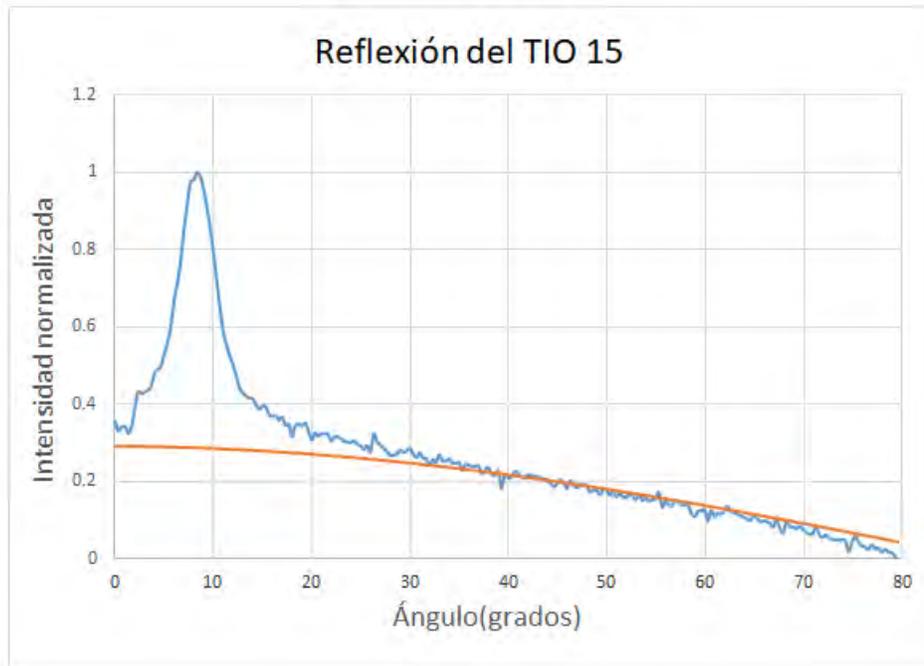


Figura 4.12: Reflexión del material TIO 15 %

λ (nm)	Material	Ref difusa (%)	Ref especular(%)	Absorbancia(%)
465	TIO 10 %	72.9	1.6	25.5
	TIO 15 %	77.9	1.5	20.6
525	TIO 10 %	83	2.1	14.9
	TIO 15 %	91	1.7	7.3
590	TIO 10 %	80.3	1.2	18.5
	TIO 15 %	92.7	1.17	6.13
630	TIO 10 %	79	1.2	19.8
	TIO 15 %	90	1.2	8.8

Tabla 4.4: Caracterización de materiales del encapsulado

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

4.2.2. Panel de instrumentos

El panel de instrumentos del vehículo está constituido por una serie de indicadores. La carátula de este posee zonas translucidas que permiten el paso de la luz de cada uno de los testigos del auto [50]. De ahí la importancia de caracterizar ópticamente este material. Teniendo en cuenta el tamaño del haz de luz del dispositivo se escogió para el estudio la zona del panel que corresponde al direccional debido a que posee mayor área (ver figura 4.13). No obstante se espera que los resultados obtenidos para esta región se repitan en cualquier otra porción donde se encuentre este material.



Figura 4.13: Direccionales

De este material se analizaron los siguientes parámetros:

- Transmitancia directa
- Transmitancia difusa.
- Reflectancia especular
- Reflectancia difusa.
- Absorbancia.
- Caracterización de la distribución angular de la luz reflejada y transmitida

El estudio se realizó para 4 geometrías diferentes. Se comprobaron los cambios ocurridos para ángulos de iluminación de: 10° , 20° , 30° y 40° . Los resultados se muestran en las figuras 4.14 y 4.15. Estas mediciones se llevaron a cabo para las 4 longitudes de onda de interés indicadas por el cliente.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

i(°)		465nm			525nm		
		R(%)	T(%)	A(%)	R(%)	T(%)	A(%)
10	Spec./Direc	9.5	0.6	86.92	9.8	0.63	85.27
	Difusa	0	2.98		0	4.3	
	(%) Gauss	99	24		100	1	
	(%) Lamb	1	76		0	99	
20	Spec./Direc	11.9	0.56	84.74	11.6	0.7	83.8
	Difusa	0	2.8		0	3.9	
	(%) Gauss	99	20		99	1	
	(%) Lamb	1	80		1	99	
30	Spec./Direc	11.7	0.5	85.5	11.7	0.5	84.3
	Difusa	0	2.3		0	3.5	
	(%) Gauss	99	5		99	2	
	(%) Lamb	1	95		1	98	
40	Spec./Direc	11.8	0.42	85.86	12	0.45	84.55
	Difusa	0.12	1.8		0.1	2.9	
	(%) Gauss	95	1		98	4	
	(%) Lamb	5	99		2	96	

Figura 4.14: Mediciones del material del panel (parte 1)

i(°)		590nm			630nm		
		R(%)	T(%)	A(%)	R(%)	T(%)	A(%)
10	Spec./Direc	9.6	0.61	84.89	9	0.62	85.41
	Difusa	0	4.9		0	4.97	
	(%) Gauss	99.6	1		99	1	
	(%) Lamb	0.4	99		1	99	
20	Spec./Direc	11.7	0.57	83.13	11	0.57	83.73
	Difusa	0	4.6		0	4.7	
	(%) Gauss	99	1		99	1	
	(%) Lamb	1	99		1	99	
30	Spec./Direc	11.4	0.49	83.81	11.1	0.48	84.12
	Difusa	0.1	4.2		0.1	4.2	
	(%) Gauss	98.2	1		97	1	
	(%) Lamb	1.8	99		3	99	
40	Spec./Direc	11.5	0.38	84.32	11.3	0.39	84.3
	Difusa	0.2	3.6		0.4	3.61	
	(%) Gauss	95.5	1		94.5	1	
	(%) Lamb	4.5	99		5.5	99	

Figura 4.15: Mediciones del material del panel (parte 2)

Analizando las tablas se pueden observar algunas tendencias claras. En primer lugar la reflectancia que es meramente especular tiende a aumentar con el incremento del ángulo de incidencia. Esto constituye un resultado que concuerda con los postulados de Fresnel para la reflexión en superficies lisas [49]. La transmitancia directa y la transmitancia difusa tienden a disminuir con el aumento del ángulo. Además es notable que la transmisión de este material

4.2. CARACTERIZACIÓN DE SUPERFICIES AUTOMOTRICES

se da fundamentalmente de manera difusa. Por otro lado el comportamiento espectral de la muestra indica un aumento gradual de la transmitancia en la medida que la longitud de onda de iluminación aumenta, así como una disminución de la reflectancia.

La intención bajo la cual se diseñan este tipo de indicadores en el panel de instrumentos de un vehículo es que el conductor perciba un nivel de iluminación uniforme independientemente de su ángulo de observación. Por esto la transmisión de la luz debe ser predominantemente difusa y la componente de transmitancia directa debe ser pequeña. En la figura 4.16 se observa la distribución angular de la luz que se transmite a través del indicador del direccional. La forma de la señal es muy cercana a un coseno perfecto cuyo centro coincide con los 180° lo que indica el comportamiento fundamentalmente lambertiano de la transmitancia de este elemento.

Por otro lado resulta notable que para estos casos donde los niveles de intensidad son pequeños, el ruido comienza a hacerse relevante y socava la exactitud de las medidas.



Figura 4.16: Distribución angular de la luz transmitida por el material del direccional

Capítulo 5

Conclusiones

El diseño y desarrollo de un Dispositivo Optomecatrónico para la Adquisición de Medidas Espectroscópicas con resolución angular fue presentado en este documento. El uso de este dispositivo permite caracterizar las propiedades ópticas de materiales utilizados en la fabricación de vehículos. Los datos adquiridos se utilizaron para alimentar un programa de simulación de superficies. El sistema consta de dos monturas giratorias que posibilita cambiar el ángulo de la muestra y el ángulo de sensado de manera independiente y a voluntad del usuario. Esta capacidad facilita poder realizar un análisis detallado de la reflexión y la transmisión de la luz en la muestra así como conocer su distribución angular. Esto representa una funcionalidad que no posee la mayoría de goniofotómetros comerciales, los cuales realizan el estudio a geometrías preestablecidas.

La interfaz de usuario desarrollada permite controlar los parámetros fundamentales del dispositivo e indicar las ordenes para ejecutar las distintas mediciones. El usuario puede establecer el ángulo de incidencia, el ángulo de detección, la longitud de onda, Etc. El programa calcula la transmitancia directa y difusa, la reflectancia especular y difusa y ofrece la posibilidad de exportar esos datos. Además muestra gráficamente la distribución angular de la luz transmitida y reflejada por la muestra y describe cuan Lambertiano o Gaussiano es su comportamiento.

El número de parámetros que sensa el dispositivo eleva considerablemente la complejidad del sistema pero garantiza su versatilidad para caracterizar los distintos elementos de apariencia como el brillo, la textura, el color, Etc. Las características del sistema superan los requerimientos del cliente y cumplen las normas que rigen este tipo de estudios. La muestra puede ser iluminada a cualquier ángulo entre 0 y 60°. La detección se puede realizar a cualquier ángulo alrededor de la muestra con una resolución angular de 0.33°. Por otro lado, el estudio se puede llevar a cabo en todo el rango desde los 450nm hasta los 750nm y la resolución espectral de la iluminación es de 4nm.

Las mediciones obtenidas con el dispositivo fueron comparadas con las realizadas con un instrumento comercial para comprobar la exactitud. El error promedio encontrado no supera el 1% lo que puede incidir de forma directa en la calidad de los resultados de la simulación

de apariencia.

Otras características estáticas del sistema fueron analizadas. La precisión, la estabilidad y la repetibilidad de las mediciones obtenidas respaldan el funcionamiento adecuado del dispositivo y ofrecen fiabilidad a los resultados. De manera que a pesar de que se trata de un instrumento de bajo costo, las mediciones realizadas responden a las especificaciones planteadas de forma satisfactoria.

Además, se realizó un estudio de varios materiales aportados por la empresa Continental Guadalajara y que son utilizados en la fabricación de los tableros de automoviles. Los datos adquiridos con el instrumento fueron utilizados por dicha empresa para alimentar el software de simulación SPEOS. Esto permitió realizar una valoración a priori del comportamiento que van a tener dichos materiales en el producto final. Esta clase de análisis representa para la industria considerables ahorros desde el punto de vista de materias primas y tiempo de trabajo.

Trabajo a futuro

Existen varios aspectos que pueden ser mejorados en este sistema. A continuación se indican los fundamentales:

- Poder controlar desde la aplicación desarrollada el monocromador para realizar el cambio de longitud de onda de forma automática según lo requiera la medición. Esto daría la posibilidad de llevar a cabo la calibración en todo el rango de longitud de onda y eliminar errores por este concepto.
- La construcción de un encapsulado adecuado para aislar al sistema de la iluminación exterior que introduce errores en la medición.
- Utilizar un microcontrolador para llevar a cabo el control del sistema y convertirlo en un dispositivo autónomo que no dependa de una tarjeta de adquisición de datos.
- Diseñar y construir un sistema ajustable para la sujeción de la muestra.
- Implementar un sistema más robusto para la evaluación de la distribución angular de la luz. Así como encontrar materiales caracterizados por goniofotómetros comerciales de forma que también puedan ser comprobados los resultados en este sentido.
- Utilizar una fuente de luz de mayor potencia puesto que en las longitudes de onda más bajas el nivel de señal se ve comprometida con los niveles de ruido.
- Utilizar una fuente de voltaje independiente para alimentar los circuitos de sensado de manera que se elimine la influencia de los transientes originados por el funcionamiento de los motores.

-
- El sensor y su brazo de sujeción provocan obstrucción al haz de luz cuando se intenta medir la luz reflejada a ángulos menores a 15° . Utilizar sensores más pequeños y modificar el brazo de sujeción para hacerlo más delgado disminuiría este problema.

Bibliografía

- [1] La-importancia-la-industria-automotriz, <https://www.minutouno.com/notas>, (accessed April 28, 2019).
- [2] La-industria-automotriz-en-mexico-y-su-impacto-a-nivel-mundial, <https://www.portalautomotriz.com/noticias/automotriz>, (accessed April 28, 2019).
- [3] D. W. Ball, *The Basics of Spectroscopy*, vol. 49, SPIE Press, 2001.
- [4] N. V. Tkachenko, *Optical spectroscopy: methods and instrumentations*, Elsevier, 2006.
- [5] H. Wang, X. Zheng, W. Du, Automatic measurement of spectral bidirectional transmittance distribution function on translucent optical materials, *Measurement* 69 (2015) 126–133.
- [6] W. Schmidt, *Optical spectroscopy in chemistry and life sciences*, 2005.
- [7] B. van Ginneken, M. Stavridi, J. J. Koenderink, Diffuse and specular reflectance from rough surfaces, *Applied optics* 37 (1) (1998) 130–139.
- [8] T. A. Germer, J. C. Stover, S. Schröder, Angle-resolved diffuse reflectance and transmittance, in: *Experimental Methods in the Physical Sciences*, vol. 46, Elsevier, 291–331, 2014.
- [9] A. Hope, K.-O. Hauer, Three-dimensional appearance characterization of diffuse standard reflection materials, *Metrologia* 47 (2010) 295–304.
- [10] A. Sole, I. Farup, P. Nussbaum, S. Tominaga, Bidirectional Reflectance Measurement and Reflection Model Fitting of Complex Materials Using an Image-Based Measurement Setup, *Journal of Imaging* 4 (2018) 136.
- [11] lighting-in-3d-specular-lighting, <https://coolcodea.wordpress.com>, (accessed April 28, 2019).
- [12] LabSphere, *Instruction Manual for Perkin Elmer Lambda 900 Spectrophotometer*, 2003.
- [13] J. Workman Jr, A. Springsteen, *Applied spectroscopy: a compact reference for practitioners*, Academic Press, 1998.

BIBLIOGRAFÍA

- [14] P. R. Griffiths, J. A. De Haseth, Fourier transform infrared spectrometry, vol. 171, John Wiley & Sons, 2007.
- [15] H. Teichmann, D. Hiller, U. Starker, Photodetector and spectrometer using the same, uS Patent 7,081,955, 2006.
- [16] R. S. Hunter, R. W. Harold, R. W. Harold, The measurement of appearance, John Wiley & Sons, 1987.
- [17] ASTM, Standard Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements, ASTM E2387-05, 2011.
- [18] Advances In Gloss Measurement, <https://sensing.konicaminolta.asia>, (accessed May 09, 2019).
- [19] J. M. Artigas, P. C. Perea, J. P. i Ramo, Tecnología del color, vol. 58, Universitat de valencia, 2002.
- [20] M. E. Nadal, E. A. Thompson, NIST reference goniophotometer for specular gloss measurements, *Journal of Coatings Technology* 73 (917) (2001) 73–80.
- [21] H.-J. Streitberger, K.-F. Dössel, Automotive paints and coatings, vol. 1002, Wiley Online Library, 2008.
- [22] J. Campos Acosta, A. Ferrero, B. Bernad, J. Velázquez, E. Borreguero, M. L. Hernanz, *Metrología de la apariencia visual* .
- [23] M. D. Fairchild, Color appearance models, John Wiley & Sons, 2013.
- [24] F. J. Maile, G. Pfaff, P. Reynders, Effect pigments—past, present and future, *Progress in organic coatings* 54 (3) (2005) 150–163.
- [25] G. Pfaff, Special effect pigments: technical basics and applications, Vincentz Network GmbH & Co KG, 2008.
- [26] J. Schanda, Colorimetry: understanding the CIE system, John Wiley & Sons, 2007.
- [27] A. Rabal, A. Ferrero, J. Fontecha, A. Pons, J. Campos, A. Corróns, Goniospectrofotometro para medir la Función de Distribución Bidireccional de Dispersión (BSDF), *Opt. Pura-Apl* 44 (1) (2011) 137–147.
- [28] E. Perales, E. Chorro, V. Viqueira, F. M. Martínez-Verdú, Reproducibility comparison among multiangle spectrophotometers, *Color Research & Application* 38 (3) (2013) 160–167.
- [29] CM-m6, <https://www.jenck.com/productos>, (accessed April 29, 2019).

BIBLIOGRAFÍA

- [30] E. Perales, B. Micó-Vicent, K. Huraibat, F. M. Martínez-Verdú, C. Dietz, Y. Yamanoi, Review of instrumental inter-agreement study of spectral and colorimetric data of commercial multiangle spectrophotometers, *Color Research & Application* 44 (2) (2019) 168–175.
- [31] CM-512m3, <https://www.jenck.com/productos>, (accessed April 29, 2019).
- [32] W. Yamaguchi, M. Ota, Apparatus and method for measuring color of a measurement object, uS Patent 5,963,334, 1999.
- [33] MA-T12, <https://www.xrite.com>, (accessed April 29, 2019).
- [34] A. Ferrero, J. Velázquez, E. Perales, J. Campos, F. M. Verdú, Definition of a measurement scale of graininess from reflectance and visual measurements, *Optics express* 26 (23) (2018) 30116–30127.
- [35] Carflash, <https://www.xrite.com/categories/inline-measurement>, (accessed March 29, 2019).
- [36] O. Instruments, APEX2 Oriel Illumination Systems Users Manual, 2015.
- [37] Y. Pérez-Moret, Diseño y construcción de un espectrómetro óptico por USB, Yohan Pérez-Moret, 2012.
- [38] O. Instruments, MS260i Oriel 1/4m Imaging Spectrograph Users Manual, 2015.
- [39] H. Mohammadi, E. Eslami, Investigation of spectral resolution in a Czerny Turner spectrograph, *Instruments and Experimental Techniques* 53 (4) (2010) 549–552.
- [40] ASTM, Standard Practice for Obtaining Spectrometric Data for Object-Color Evaluation, ASTM E1164-12, 2017.
- [41] FDS010-SpecSheet.pdf, <https://www.thorlabs.com/drawings>, (accessed March 30, 2019).
- [42] R. A. Siddiqui, H. A. Abdullah, K. R. Al-Belushi, Influence of aging parameters on the mechanical properties of 6063 aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 102 (1-3) (2000) 234–240.
- [43] R. C. García, L. F. L. Martínez, Mejora de la resolución espectral de un monocromador usando un controlador de micropasos, *Pistas Educativas* 36 (112).
- [44] I. Agilent Technologies, AGILENT CARY 4000/5000/6000i SERIES UV-VIS-NIR, 2011.
- [45] K. Kalantar-Zadeh, *Sensors: an introductory course*, Springer Science & Business Media, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

- [46] M. J. Gázquez, J. P. Bolívar, R. Garcia-Tenorio, F. Vaca, A review of the production cycle of titanium dioxide pigment, *Materials Sciences and Applications* 5 (07) (2014) 441.
- [47] J. Murphy, *Additives for plastics handbook*, Elsevier, 2001.
- [48] R. Montes, C. Ureña, An overview of BRDF models, University of Grenada, Technical Report LSI-2012 1.
- [49] D. Shirsekar, Y. Wang, J. R. Mahan, K. J. Priestley, V. Q. Nguyen, Bidirectional reflectance measurement of black absorber layers for use in optical instrument design, in: *Optical Modeling and Performance Predictions X*, vol. 10743, International Society for Optics and Photonics, 1074303, 2018.
- [50] C. Donner, H. W. Jensen, Light diffusion in multi-layered translucent materials, *ACM Transactions on Graphics (ToG)* 24 (3).