



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

Facultad de Ciencias

**“Caracterización espectral de diodos
emisores de luz como detectores
ópticos”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
F Í S I C O

P R E S E N T A

MATIAS LEONARDO ARROYO CAMACHO



Directora de Tesis:
Dra. MARTHA ROSETE AGUILAR

MEXICO, D.F.

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno
Arroyo
Camacho
Matias Leonardo
55 95 89 53
Universidad Nacional Autonoma de Mexico
Facultad de Ciencias
Fisica
096505001
2. Datos del tutor
Dra
Martha
Roseta
Aguilar
3. Datos del sinodal 1
Dr
Augusto
Garcia
Valenzuela
4. Datos del sinodal 2
Dr
Roberto
Ortega
Martinez
5. Datos del sinodal 3
M en C
Mirna
Villavicencio
Torres
6. Datos del sinodal 4
M en C
Jorge
Andrade
Herrera
7. Datos del trabajo escrito
Caracterizacion espectral de diodos emisores de luz como detectores
opticos
100 p
2006

a mis padres.

Agradecimientos.

A Maru y Germán, a Martha Rosete A., a Santiago, a Aubin, y a Polina, a Wolfgang A. Schmid, y Juan C. Molina V, a Sergio Hernández, a Martín y Rosalía

Noviembre 2006.

Indice	Pág.
Introducción.	3
Capítulo 1.	9
1. Caracterización de LEDs como detectores ópticos.	9
1.1. Geometría de los LEDs.	9
1.2. Respuesta angular del LED como emisor y como detector.	10
1.3. Respuesta espectral.	14
1.4. Respuesta no-lineal del LED.	15
1.4.1. Circuito amplificador corriente a voltaje.	16
1.4.2. Arreglo experimental para la medición de no linealidad del fotómetro de LEDs.	18
1.4.3. Arreglo experimental para las mediciones de no linealidad de los LEDs iluminando toda la superficie uniformemente.	22
1.4.4. Pruebas de linealidad para el LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.	23
Capitulo 2.	26
2. Sistema de medición y calibración.	26
2.1. Monocromador basado en la configuración Czerny-Turner.	27
2.1.1. Ecuación de la rejilla.	28
2.2. Descripción del sistema de medición (monocromador, rejillas de difracción, filtros, fuentes).	34
2.3. Iluminación directa y difusa del LED.	35
2.3.1. Iluminación directa.	35
2.3.2. Iluminación difusa.	36
2.4. Descripción del sistema de control y medición de temperatura.	37

2.5. Lectura de señal y captura de datos.	40
2.6. Monitoreo de la señal de salida del monocromador.	41
2.7. Calibración.	42
2.8. Cálculo de: la longitud de onda dominante, las señales para un espectro constante y el solar, y el coeficiente de temperatura.	43
2.8.1. Longitud de onda dominante.	44
2.8.2. Respuesta del LED para un espectro constante y para el espectro solar.	44
2.8.3. Coeficiente de temperatura relativo.	45
Capítulo 3.	46
3. Resultados y discusión	46
3.1. LEDs analizados.	46
3.2. Determinación del ancho de banda.	49
3.3. Prueba con la esfera integradora.	51
3.4. Iluminación difusa.	53
3.5. Iluminación directa.	66
3.6. Comparación entre iluminación directa y difusa.	76
3.7. Coeficiente de temperatura relativo.	84
3.8. Respuesta integral de los LEDs.	89
Capítulo 4.	90
4. Conclusiones.	90
Referencias.	94

Introducción.

Un fotodiodo es un dispositivo semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polarizarán inversamente, con lo que producirán una cierta circulación de corriente cuando sean excitados por la luz. Un fotodiodo normalmente detecta en un rango espectral amplio. Por otro lado, los diodos emisores de luz (LEDs) (Bass, 1995) son diseñados y fabricados para ser usados como fuentes luminosas cercanamente monocromáticas, ofreciendo las ventajas de ser compactas, durables y económicas. Debido a que la unión semiconductor que integra estos diodos a su vez puede producir una fotocorriente cuando se hace incidir luz sobre ella, los LEDs también pueden ser utilizados como detectores de luz. Los LEDs usados como fotodiodos constituyen detectores espectralmente selectivos, siendo esta característica (la selectividad espectral) además de las ya mencionadas anteriormente, lo que ha motivado su uso como detectores en diferentes aplicaciones como son radiómetros solares (Mims, 1992), colorimetría (Berry, 1997), caracterización de pulsos ultracortos (Reid, 1997), mediciones de temperatura (Acharya, 1997) y como detectores de respuesta rápida (Acharya, 1998). El uso de LEDs como detectores conlleva la necesidad de realizar mediciones para caracterizarlos en su respuesta angular, térmica, y espectral.

El primer intento de caracterizar algunos LEDs lo realizó la estudiante Ilse Ruiz Mercado (Ruiz Mercado, 2001) en el laboratorio de Percepción Remota de la

Universidad de Arizona. En dicho laboratorio se caracterizaron algunos LEDs únicamente en su respuesta espectral y sin ningún control de la temperatura. Posteriormente en el laboratorio de Óptica Aplicada del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, (CCADET), (Rosete-Aguilar, 2003), se desarrolló una metodología adecuada para realizar la caracterización angular y térmica de los LEDs. En el CCADET realicé mediciones de la respuesta espectral en función de la temperatura de algunos LEDs, encontrando que la precisión en las mediciones estaba limitada por varios factores como: la falta de fuentes de poder reguladas, monturas adecuadas para la alineación de los LEDs y la falta de iluminación uniforme sobre el LED, esta última siendo importante debido a que se pierde la respuesta lineal de los LEDs (capítulo 1, sección 1.4.2). Los errores en las mediciones obtenidos eran del mismo orden de lo que se intentaba medir por lo cual era imposible dar algún tipo de conclusión sobre el comportamiento del LED funcionando como detector con respecto a su funcionamiento como emisor.

El objetivo de la presente tesis consistió en realizar mediciones de precisión sobre la respuesta espectral de los LEDs como función de la temperatura que nos permitieran dar conclusiones sobre el comportamiento de los LEDs como detectores con respecto a su comportamiento como emisores. Para ello solicitamos al Dr. Wolfgang Schmid su apoyo para usar el equipo del Departamento de Óptica y Radiometría del Centro Nacional de Metrología en Querétaro, usando las técnicas que nosotros habíamos desarrollado para realizar la caracterización espectral de los LEDs en función de la temperatura. Si bien existen en la literatura mediciones de la respuesta espectral de LEDs como detectores, hasta donde sabemos nunca antes se habían realizado mediciones de la respuesta espectral de los LEDs como función de la temperatura. Estos resultados constituyen la principal contribución de mi tesis, (Arroyo C.M.L. 2005).

Hasta donde sabemos fue Mims (1992) la primera persona en proponer el uso de LEDs como detectores ópticos. Mims propone sustituir con LEDs a los

filtros de interferencia y a los fotodiodos de silicio que se usan en el fotómetro de Volz. El fotómetro de Volz (Volz, 1974) es un instrumento que permite medir la radiación solar incidente como un voltaje. El fotómetro de Volz es pequeño, económico y se opera de forma manual. Este instrumento usaba detectores de silicio y germanio en modo fotovoltaico junto con filtros de absorción o interferencia y estaban hechos para poder ser apuntados al Sol con una mano. Con este aparato y el método de Langley (Tomasi 1983, Reagan 1987) se miden parámetros como la constante solar exoatmosférica y la profundidad óptica debido a aerosoles, los cuales son fundamentales para el estudio del transporte de aerosoles (Moorthy, 1996), visibilidad (Galindo, 1975) y cambio climático global (d'Almeida, 1992). Los resultados que obtuvo Mims con el nuevo fotómetro basado en LEDs fueron satisfactorios (Brooks, 2001, Ruiz Mercado 2001). El hecho de sustituir los filtros de interferencia y los detectores de silicio, redujo de forma apreciable el costo del fotómetro de Volz no sólo por el precio de los LEDs sino también por el hecho de que la degradación en la respuesta de los filtros de interferencia hace necesario que se realicen calibraciones del instrumento de forma frecuente. La degradación o cambio de la respuesta espectral del LED con el tiempo es mucho menor o casi nula comparada con la de los filtros de interferencia, dándole una ventaja adicional al uso de los LEDs. El bajo costo de este nuevo instrumento manual y portátil impulsó un nuevo programa de monitoreo de aerosoles atmosféricos: la red del programa GLOBE (Aprendizaje y Observaciones Globales en Beneficio del Medio Ambiente, <http://www.globe.gov>) (Brooks, 2001) que usa mediciones realizadas manualmente con radiómetros portátiles. Dichas mediciones son realizadas por estudiantes en diferentes instituciones educativas en todo el mundo.

La estudiante Ilse Ruiz Mercado participó en dicho programa durante una estancia de investigación en la Universidad de Arizona, durante la cual propuso el diseño de un nuevo radiómetro solar basado en un arreglo de LEDs para operar de forma autónoma, y evitando así el proceso de automatización o seguimiento del

sol. Para que este nuevo instrumento pudiera funcionar correctamente es fundamental una caracterización precisa de los LEDs que van a usarse como detectores en dicho instrumento. En la presente tesis caractericé LEDs en el espectro visible y en el infrarrojo. Uno de los LEDs caracterizado en el espectro visible fue usado por Ruiz Mercado, I. (2005) en el diseño de un prototipo de radiómetro solar con el que mostró la factibilidad de su funcionamiento autónomo, figura 1. Otros dos LEDs: uno en el visible y otro en el infrarrojo fueron usados para construir un sensor para medir el índice diferencial de vegetación normalizado, (Normalised Difference Vegetation Index, NDVI*, en inglés). En la figura 2 se muestra una fotografía de este sensor que se diseñó y construyó usando los dos LEDs analizados en la presente tesis. El sensor tiene en total 4 LEDs. Un infrarrojo y un rojo que ven hacia arriba y un infrarrojo y un rojo que ven hacia abajo. Actualmente este instrumento para medir el índice diferencial de vegetación normalizado se encuentra en etapa de prueba.

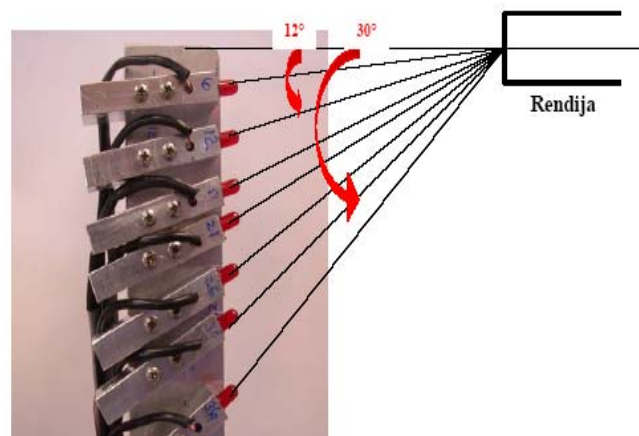


Figura 1. Geometría del arreglo de LEDs utilizado en el prototipo del radiómetro solar autónomo.

* El NDVI es una variable que permite estimar el desarrollo de una vegetación en base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la misma emite o refleja.

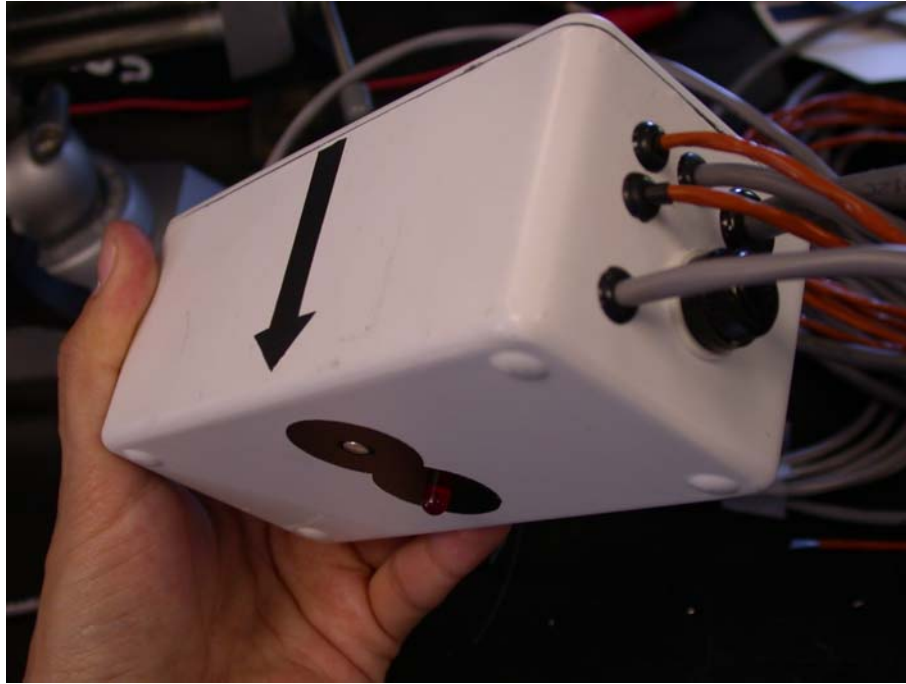


Figura 2. *Fotografía del sensor para medir el índice diferencial de vegetación normalizado.*

En el primer capítulo de esta tesis se describe la geometría de los LEDs que funcionan en el visible. También se describen las caracterizaciones angular y espectral de los LEDs como detectores ópticos, y se presentan los resultados de un estudio sobre la no-linealidad de los LEDs realizado por Velasco-Segura (2003). El estudio y los resultados de no-linealidad presentados en este capítulo se toman como base para la propuesta del sistema de medición presentado en el capítulo 2.

En el segundo capítulo se presenta el sistema de medición que consta de un monocromador doble, rejillas de difracción, filtros, fuentes y un sistema de montaje diseñado y adaptado por nosotros para la iluminación del LED. En este capítulo también se presenta el sistema de control y medición de la temperatura

del LED. Finalmente en este capítulo se describe el método para la lectura y captura de datos, así como la calibración.

En el tercer capítulo se presentan diferentes estudios que realizamos a un conjunto de LEDs que detectan en el espectro visible e infrarrojo. Los cuales consisten en: analizar las inhomogeneidades de la esfera integradora, analizar la reproducibilidad en la respuesta espectral de los LEDs que son del mismo modelo. Analizar el efecto de remover el encapsulado del LED en la respuesta espectral, analizar la respuesta para dos tipos de iluminación: directa y difusa, y por último analizar la respuesta espectral a diferentes temperaturas.

Capítulo 1.

Caracterización de LEDs como detectores ópticos.

1.1 Geometría de los LEDs.

En las figuras 1.1.1 y 1.1.2 podemos observar una de las geometrías más comunes de LEDs. Nos concentraremos en la descripción y análisis de esta configuración, ya que es la utilizada en los instrumentos que se construyeron para la detección en el espectro visible.

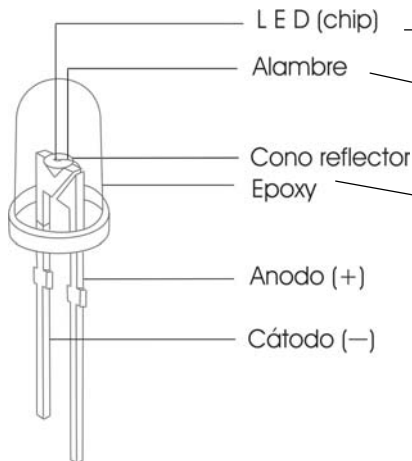


Figura 1.1.1 Geometría de un LED común de 5mm en empaque T 1-3/4.

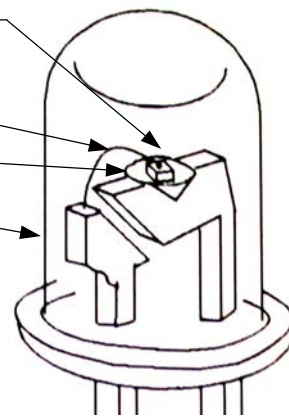


Figura 1.1.2 Detalle del empaque T 1-3/4.

En el caso de la emisión, el patrón de radiación está definido por tres parámetros (Bass, 1995): las posiciones relativas del chip (LED) y el cono reflector, la forma del domo del epoxy, y la presencia de un difusor en el epoxy. En los LEDs de epoxy transparente, los dos primeros factores predominan en el patrón de emisión. En los LEDs difusos, las características del difusor predominan sobre los otros factores. En la presente tesis son analizados los dos tipos de LEDs, esto es, con epoxy transparente y difuso.

El chip del LED tiene un área típica de $250 \times 250 \mu\text{m}$. Su parte inferior se encuentra pegada con epoxy a una cavidad cónica reflectora que es parte del cátodo, y la parte superior del chip está conectada al ánodo mediante un alambrito de oro de $25 \mu\text{m}$ de largo (ver figura 1.1.2). Ambas terminales, el chip y el alambre de oro están encapsulados en epoxy, cuya función además de proteger y mantener unido el arreglo, determinar la distribución espacial de luz y funcionar como un filtro óptico.

1.2 Respuesta angular del LED como emisor y como detector.

La luz se genera de manera isotrópica (Bass, 1995) en la unión semiconductora de materiales tipo-n y tipo-p del chip, al pasar una corriente por la unión semiconductora se genera una inyección en ésta causando una recombinación de electrones y huecos generando una emisión de fotones (electroluminiscencia) (Streetman, 1990). La luz generada escapa de la unión mediante reflexiones sucesivas dentro del sustrato, y al llegar al epoxy conductor su dirección es determinada por la estructura cónica reflectora donde yace el chip y por los parámetros ópticos de la lente formada con el epoxy que lo encapsula. Este complejo mecanismo de emisión de luz en LEDs da como resultado un patrón de respuesta angular, intensidad contra ángulo (que hace el detector cuando se gira alrededor del chip del LED), que tiene un lóbulo en donde se concentra la totalidad de la energía emitida por el LED. En el caso de diodos emisores de luz que son fabricados bajo un proceso de control de calidad, y que están catalogados como LEDs de calidad óptica (esto es, que el fabricante provee una lista de características del LED como son: la longitud de onda pico de emisión, el ancho de banda espectral, entre otras, y que en los LEDs que uno compra normalmente en las tiendas de electrónica son desconocidos), los patrones de emisión angular suelen ser patrones con una alta simetría que en algunos casos se les puede ajustar una función Gaussiana o Lorentziana. Esta alta simetría también se observa experimentalmente durante el proceso de detección del LED. El proceso de detección de un LED es parecido al de un fotodiodo, en el que al incidir luz sobre la unión se genera un par electrón-hueco que es separado por un campo eléctrico produciendo una corriente o voltaje externo. En la figura 1.2.1 se muestra el arreglo experimental montado para caracterizar los LEDs en su respuesta angular como detectores, Ruiz Mercado I. (2003a). El arreglo experimental consiste en una lámpara incandescente (Quartzline GE-DXW, 1000W a 120V) fija colocada en posición horizontal. Respecto al filamento de la lámpara se alinearon dos diafragmas y la montura giratoria con el detector (LED). Alrededor del LED se colocó una caja negra de cinco caras de unicolor (no

mostrada en la figura) que tenía la función de obstruir el paso de luz indeseada y de evitar el calentamiento del diodo.

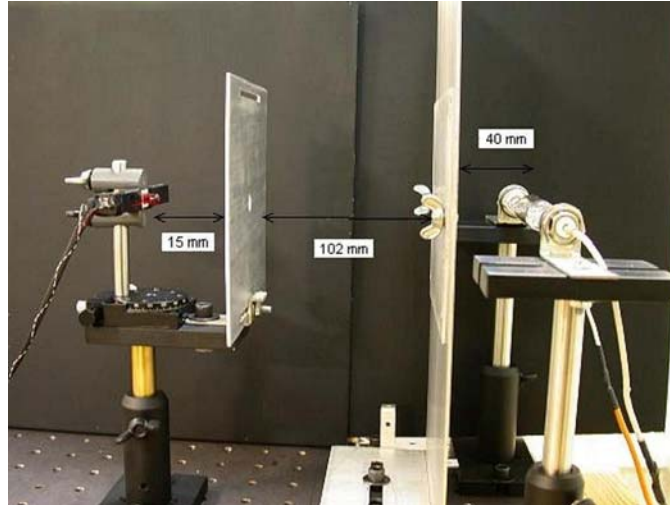


Figura 1.2.1 Arreglo experimental para la caracterización angular.

Aunque la fuente de luz es extendida (el filamento mide 40×5 mm), el producto de las dimensiones laterales del filamento es mucho menor que el cuadrado de la distancia del LED al filamento ($dx \cdot dy = 200 \ll 24\,649 = r^2$) por lo que la aproximación de fuente puntual es todavía válida (DeCusatis, 1997). El eje mecánico del diodo se alineó con el eje óptico del sistema y el chip del LED. Con este arreglo sencillo se logró una iluminación uniforme sobre la superficie del LED.

En las figuras 1.2.2 y 1.2.3 se muestra el patrón de respuesta angular para un LED modelo HPLM-C208 funcionando como emisor y como detector, respectivamente. El patrón de emisión mostrado en la figura 1.2.2 es el patrón proporcionado por el fabricante. El patrón de detección mostrado en la figura 1.2.3 es el patrón que se obtuvo experimentalmente con el arreglo mostrado en la figura 1.2.1. El campo angular del LED HLMP-C208 funcionando como detector es aproximadamente 4° que es la mitad del campo angular del LED funcionando como emisor. Los resultados para otro tipo de LED analizado por Rosete-Aguilar, et. al (2003) muestran también una disminución en el campo angular del LED funcionando como detector.

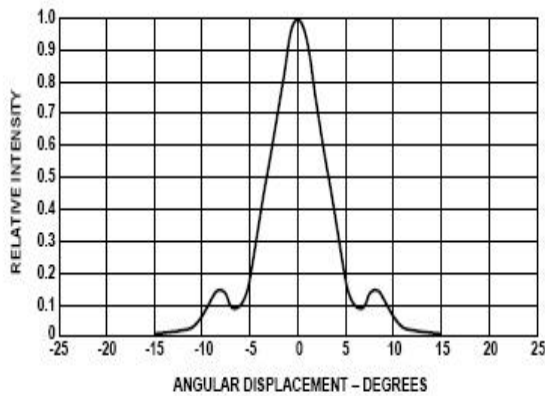


Figure 3. Relative Luminous Intensity vs. Angular Displacement for HLMP-Cx08 and HLMP-Cx10.

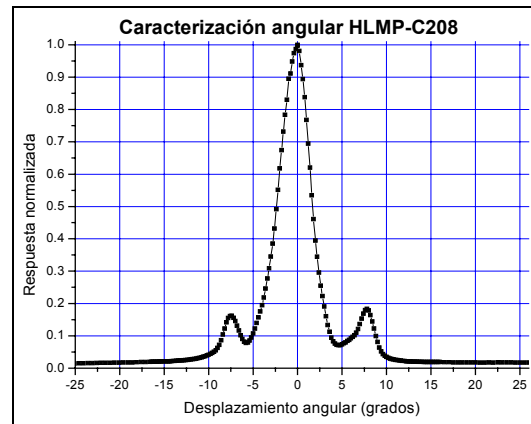


Figura 1.2.3. Resultados experimentales de la caracterización angular del LED HPLM-C208 como detector.

Figura 1.2.2. Patrón de respuesta angular del LED HPLM-C208 como emisor proporcionado por el fabricante.

El hecho de que la luz en la unión semiconductor se produzca sin una dirección preferencial nos permite plantear, de acuerdo al principio de reversibilidad de la luz, que los patrones de respuesta angular de emisión y de detección serán los mismos si la caracterización angular se realiza con luz colimada. Las diferencias en la iluminación utilizada para medir la respuesta angular pueden producir cambios en los patrones de emisión y detección debidos a la dependencia del índice de refracción de los materiales del epoxy con la longitud de onda, a las Ecuaciones de Fresnel y a la respuesta espectral del diodo. También se espera que la comparación de ambos patrones sea muy sensible a que en ambos casos el eje de giro sea el mismo. En la figura 1.2.4 se muestra el efecto en el patrón de respuesta angular del LED HPLM-C208, funcionando como detector, debido a un desplazamiento vertical del LED de 3mm del centro de rotación y debido a una inclinación del LED.

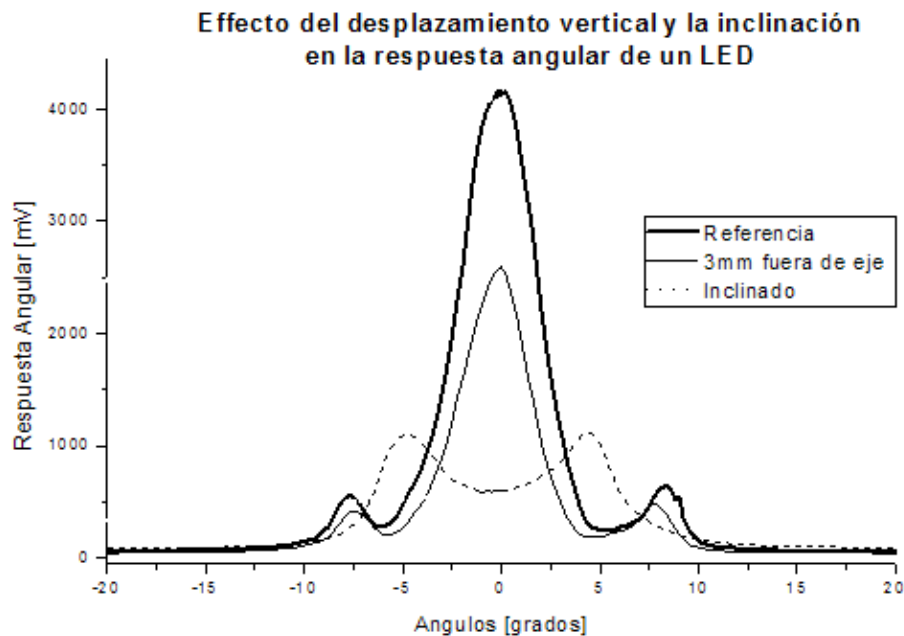


Figura 1.2.4. Efecto del desplazamiento e inclinación.
LED HPLM-C208-S0000.

Los resultados obtenidos sobre la respuesta angular del LED muestran que la respuesta angular del LED es sensible a variaciones en su posición con respecto a la luz incidente, por lo que es importante la forma en la que se ilumina el LED.

1.3 Respuesta espectral.

La respuesta espectral de un diodo emisor de luz funcionando como detector depende de las mismas variables que su espectro de emisión: materiales de la unión semiconductor, propiedades ópticas del epoxy de encapsulado y temperatura de operación. Dado que la composición del semiconductor que determina las bandas de energía de la unión y por tanto las longitudes de onda de emisión del LED quedan determinadas durante el proceso de fabricación, las características espectrales de diodos del mismo material o incluso del mismo tipo o mismo lote pueden registrar diferencias. En el capítulo 3 de esta tesis se

presentan mediciones de la respuesta espectral para diferentes LEDs del mismo modelo.

Los procesos de emisión y detección en LEDs son similares, pero no idénticos. Como se observó en Ruiz Mercado (2001, 2003a), así como en los resultados de Miyazaki (1998), los LEDs de GaAlAs como detectores muestran un desplazamiento de la longitud de onda pico λ_{pico} hacia valores más pequeños con respecto al patrón de emisión, así como un ensanchamiento de la curva de respuesta espectral. La medición de la respuesta espectral del LED como detector generalmente se realiza con un sistema monocromador.

La fotocorriente $I_{\text{LED}}(\lambda)$ generada por el LED que es colocado a la salida del monocromador es función de la respuesta espectral del LED mismo, pero también del perfil espectral característico del sistema monocromador (rejillas, espejos, etc), por lo que es necesario conocer también la fotocorriente $I_{\text{patrón}}(\lambda)$ generada por un detector patrón expuesto a las mismas condiciones de luz y cuya responsividad espectral $s_{\text{patrón}}(\lambda)$ sea conocida. Como se describirá en el capítulo 2, el LED y el detector patrón fueron expuestos en forma alternada. Como el perfil espectral generado por el monocromador puede cambiar cada vez que se realiza un barrido debido a derivas en la potencia óptica del monocromador, colocamos un segundo detector de referencia (fijo) cuya señal de salida, $M(\lambda)$, es utilizada para compensar la no repetibilidad de las mediciones. El monitoreo de la fotocorriente generada por el detector patrón y el monitoreo de la señal de salida por un segundo detector no fueron realizados ni por Ruiz Mercado (2001, 2003a) ni por Miyazaki (1998). Sus trabajos tampoco realizan mediciones de la respuesta espectral de los LEDs como función de la temperatura que como se mostrará en el capítulo 3 tiene el efecto de desplazar la longitud de onda pico hacia longitudes de onda mayores y de ensanchar la curva espectral conforme aumenta la temperatura. Hasta donde sabemos los resultados presentados en la presente tesis, son los primeros resultados en los que se ha realizado un proceso estricto

de monitoreo y calibración para medir con precisión la respuesta espectral de los LEDs como detectores a diferentes temperaturas. En el capítulo 2 presentamos el sistema de medición y en el capítulo 3 presentamos la caracterización espectral de algunos diodos emisores de luz.

1.4 Respuesta no-lineal del LED.

La respuesta lineal o no lineal de un detector, en este caso del LED, se refiere a su respuesta cuando incide luz sobre él. Debido a que la respuesta o generación de corriente debido a la presencia de luz en una juntura semiconductor, como un LED o un fotodiodo de silicio, es una corriente cuya magnitud es difícil de medir con un multímetro convencional, se diseñó y construyó un circuito amplificador en configuración convertidor corriente a voltaje y se midió la señal amplificada como un voltaje, Velasco-Segura (2003). En lo sucesivo nos referiremos al sistema completo: circuito amplificador + LED como fotómetro.

1.4.1 Circuito amplificador corriente a voltaje.

La fotocorriente generada en la unión semiconductor del LED (I_f) es amplificada mediante un circuito convertidor de corriente a voltaje construido con un amplificador operacional Fortney (1987). En el modelo del amplificador operacional ideal, la diferencia de potencial entre las terminales del amplificador es cero mientras no se genere una fotocorriente, ya que la terminal positiva está conectada a tierra. Al incidir luz en el diodo, el voltaje de salida V_{out} producido por el amplificador es proporcional a la fotocorriente a través de la resistencia de ganancia R_g :

$$V_{out} = -R_g I_f \quad (1.1)$$

Independientemente de que el detector utilizado sea un diodo emisor de luz, la linealidad de este circuito depende de varios factores entre ellos:

- la linealidad del amplificador operacional
- la estabilidad del valor de la resistencia de ganancia R_g
- la linealidad del LED mismo para producir un fotocorriente proporcional a la intensidad de luz incidente

En este estudio se caracterizó la linealidad del fotómetro: circuito amplificador + LED. Se utilizó un circuito amplificador basado en un amplificador operacional en configuración convertidor corriente a voltaje, (ver figura 1.4.1). Esta configuración también se denomina corto circuito debido a que la diferencia de potencial entre las terminales del detector (A,B) es casi cero, de modo que la corriente generada por presencia de luz fluye prácticamente sin resistencia. En esta configuración se utilizó un amplificador operacional convencional (Texas Instruments, TL071) y como resistencias de ganancia de utilizaron resistencias comerciales (10%).

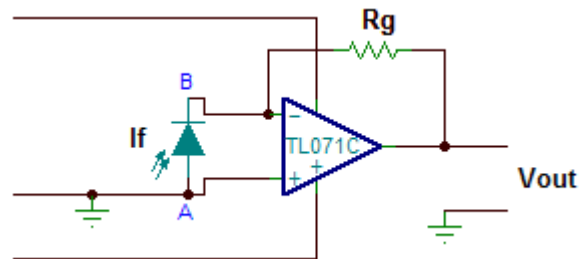


Figura 1.4.1 Circuito convertidor de fotocorriente a voltaje.

El amplificador de la figura 1.4.1 necesita una alimentación bifásica cuya magnitud puede estar entre 5 y 15 V. Para lograr esta alimentación se usó el circuito mostrado en la figura 1.4.2, basado también en un amplificador operacional (Texas Instruments, TL071) en configuración seguidor de voltaje, al cual le antecede un trimpot que permite ajustar el canal, que hará las veces de

tierra en el amplificador del detector, justamente a la mitad de los otros dos canales. Para evitar ruido en el amplificador por variaciones en la alimentación se usó una fuente estabilizada de 12V (Steren modelo 900-1000), de modo que la alimentación del amplificador de señal es de $\pm 6V$.

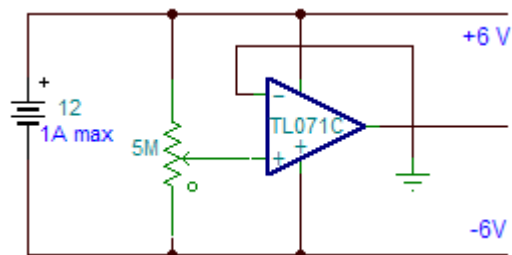


Figura 1.4.2 Circuito de alimentación.

El circuito amplificador antes descrito fue diseñado por Velasco-Segura (2003), y fue escogido por ser sencillo, económico y porque proporciona la estabilidad necesaria en la señal de acuerdo a las condiciones de laboratorio en que se realizaron las caracterizaciones. En la figura 1.4.3 se muestra una fotografía de la tarjeta electrónica que yo construí basada en el prototipo antes descrito. La tarjeta la construí para medir la señal de dos detectores, y con varias resistencias para modificar la ganancia. El circuito lo dibujé usando un programa profesional para el diseño de circuitos electrónicos.

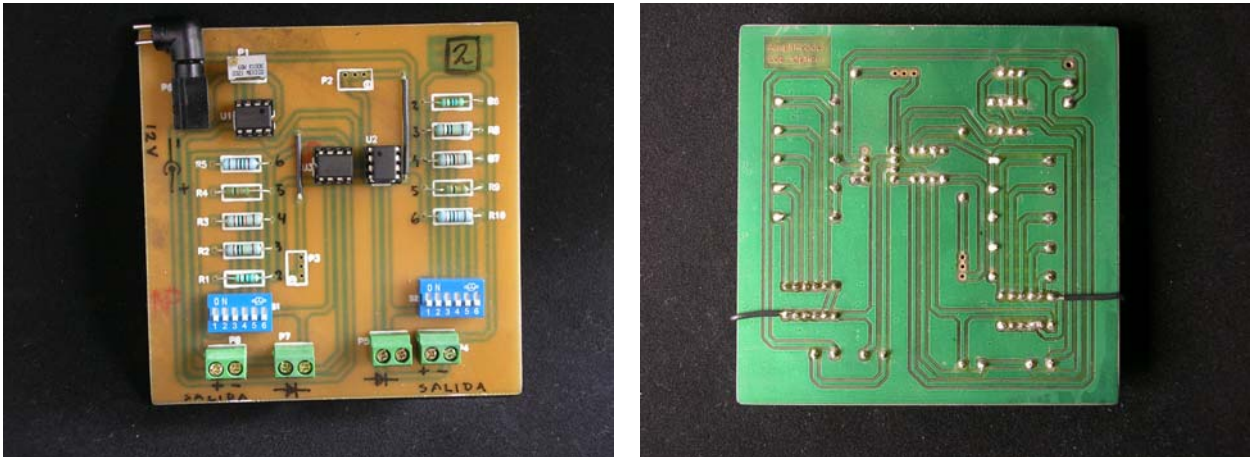


Figura 1.4.3 Tarjeta electrónica basada en los circuitos de las figuras 1.4.1 y 1.4.2.

1.4.2 Arreglo experimental para la medición de no linealidad del fotómetro del LEDs

En Velasco-Segura (2003) se estudia la linealidad del fotómetro descrito en el intervalo de intensidades de 0.1 a 1 Watts utilizando el método de atenuación que consiste en modular la intensidad del haz incidente sobre el detector.

Después de varios experimentos realizados por Velasco (2003) se observó que la respuesta del fotómetro es no lineal. Esta no linealidad en el voltaje como función de la intensidad de la luz incidente en el LED podía reducirse a menos del 1% solo cuando se iluminaba el LED completamente con iluminación uniforme. Uno de los arreglos experimentales para mostrar el comportamiento no lineal en la respuesta del LED se muestra en la figura 1.4.4.

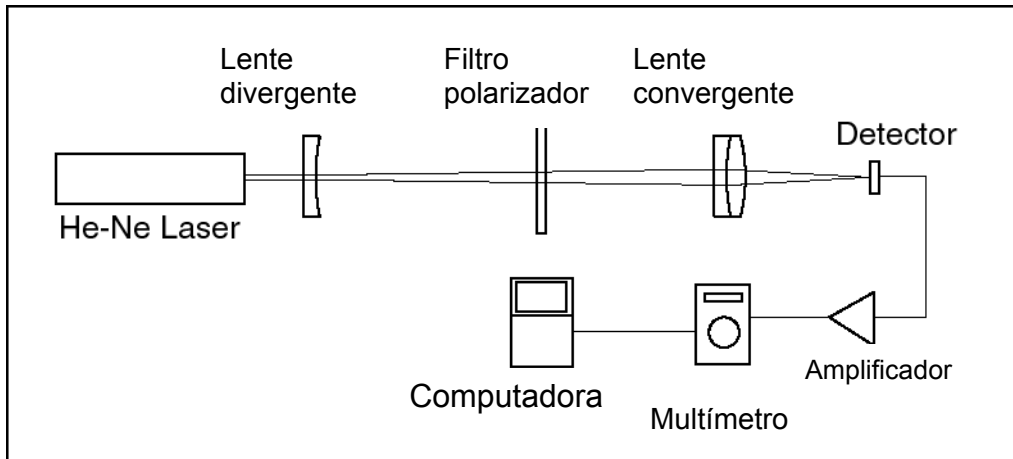
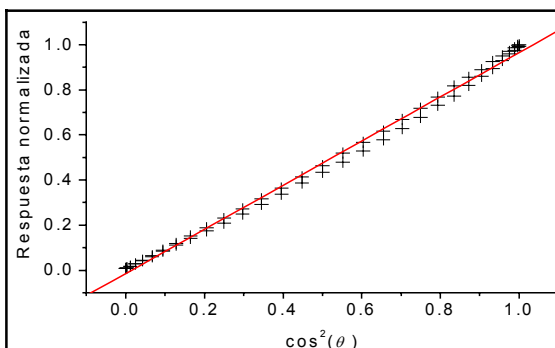
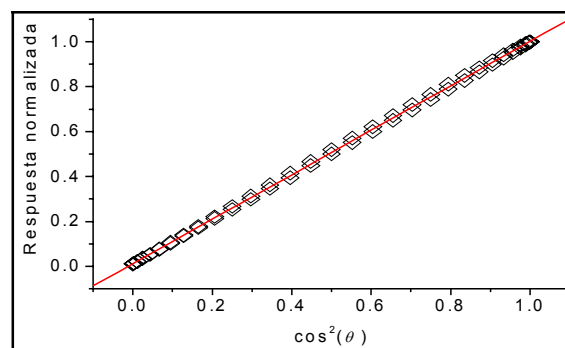


Figura 1.4.4 Arreglo experimental para medir la respuesta no-lineal del LED como detector.

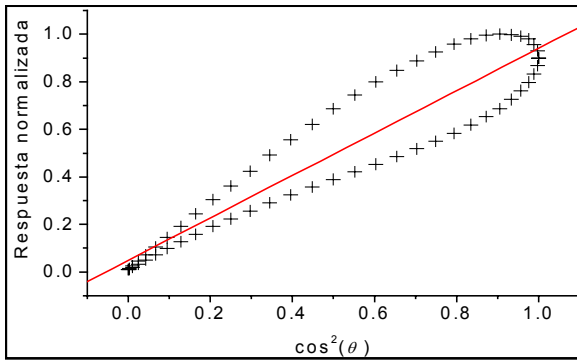
Con el arreglo experimental mostrado en la figura 1.4.4 se realizaron dos series de mediciones: para la primera serie se alineó el haz enfocado en el centro del detector y, girando el polarizador para modular la intensidad, se tomaron lecturas para dos modelos de LEDs: el modelo transparente CMD5752 y el modelo difuso SMF-HM1530ID-509, los resultados obtenidos se muestran en las gráficas 1 y 2 de la figura 1.4.5. Para la segunda serie se alineó el haz enfocado aproximadamente 1mm fuera del centro del detector y, nuevamente girando el polarizador para modular la intensidad, se tomaron lecturas con ambos LEDs, los resultados se presentan en las gráficas 3 y 4 de la figura 1.4.5.



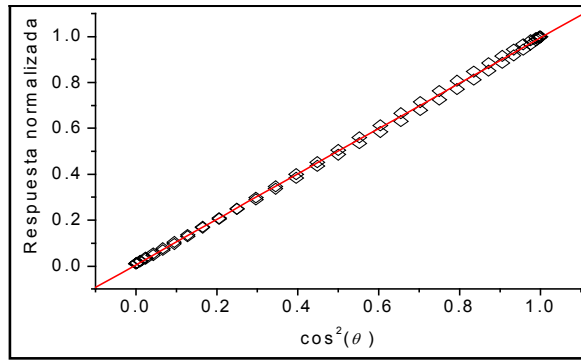
Gráfica 1. Mediciones de respuesta en voltaje para un LED transparente CMD5752, con el haz enfocado en su centro.



Gráfica 2. Mediciones de respuesta en voltaje para un LED difuso SMF-HM1530ID-509, con el haz enfocado en su centro.



Gráfica 3. Mediciones de respuesta en voltaje para un LED transparente CMD5752, con el haz enfocado fuera de su centro.



Gráfica 4. Mediciones de respuesta en voltaje para un LED difuso SMF-HM1530ID-509, con el haz enfocado fuera de su centro.

Figura 1.4.5 Mediciones de respuesta en el voltaje como función de la intensidad de la luz incidente.

En las gráficas 1, 2, 3 y 4 de la figura 1.4.5, el eje de las ordenadas representa la respuesta normalizada, medida como un voltaje, como función de la intensidad de la luz incidente en el LED y que es proporcional al $\cos^2 \theta$ (ecuación 1.2), en donde θ es el ángulo de giro del polarizador, que es el ángulo entre el campo eléctrico de la luz polarizada emitida por el láser y la dirección de polarización del filtro polarizador. Lo anterior debido a que la intensidad de la luz incidente se está controlando usando la polarización del haz láser, que idealmente la intensidad normalizada debe variar de acuerdo a la ley de Malus (Hecht, 1974) dada por:

$$I(\theta) = \cos^2 \theta \quad (1.2)$$

Si la respuesta del fotómetro fuera lineal entonces el voltaje de salida del fotómetro debería ser proporcional a la intensidad incidente, de tal forma que una gráfica de V vs $\cos^2 \theta$ debería ser una recta.

De las cuatro gráficas mostradas en la figura 1.4.5, vemos que la respuesta del LED transparente mostrado en la gráfica 3 es no lineal que corresponde al caso cuando el haz no incide en el centro del LED. En cuanto a las tres figuras restantes cualitativamente podríamos decir que se tiene una respuesta lineal, sin embargo, es necesario hacer un análisis cuantitativo para medir el grado de linealidad. Debido a que la divergencia del comportamiento lineal es pequeña, es más conveniente realizar este análisis cuantitativo a través de un análisis de no-linealidad, NL, definida como:

$$NL = \frac{V(\theta) - I_a(\theta)}{I_a(\theta)} \quad (1.3)$$

Donde $V(\theta)$ es el voltaje de salida registrado por el fotómetro e $I_a(\theta)$ es la función de transmitancia del polarizador dada por:

$$I_a(\theta) = a \cdot \cos^2(\theta - b) + c \quad (1.4)$$

en donde el parámetro a representa la intensidad máxima incidente en el detector, b el posible error al determinar el ángulo del polarizador, $\theta = 0^\circ$, en el que se obtiene intensidad máxima y c la intensidad mínima, relacionada con el factor de extinción del filtro polarizador.

En la ecuación (1.4) se están tomando en cuenta posibles variaciones en la intensidad de la luz incidente en el fotómetro debidas a algunas fuentes de error definidas en el párrafo anterior a través de los parámetros a , b y c .

Realizando el análisis de no-linealidad definida por la ecuación (1.3) se encuentra que para el LED difuso con el haz enfocado en el centro del detector la no linealidad, NL, es del 3%, gráfica 2. Para el caso del LED transparente cuando el haz está enfocado en el centro del detector, el valor de la no-linealidad, NL, es

de hasta el 10%, gráfica 1. Para cuando el haz no está enfocado en el centro del detector, la no linealidad del LED aumenta considerablemente.

Estos resultados reflejan la sensibilidad de los LEDs a variaciones en la dirección del haz, variaciones tan pequeñas como las que se pueden generar con el simple hecho de girar el filtro polarizador para modular la luz incidente en el detector. Conociendo esta característica se rediseñó el arreglo experimental con el objeto de abrir el haz de láser e iluminar el LED uniformemente. El nuevo arreglo y los resultados se describen en la sección 1.4.3.

Los resultados presentados en esta sección son de suma importancia, pues definen bajo que condiciones deben usarse los diodos emisores de luz como detectores para que tengan una respuesta lineal. La sensibilidad que presentan los LEDs a variaciones en la dirección del haz, y que no presentan los fotodiodos de Silicio por ejemplo, pueden ser un problema o una ventaja dependiendo de la aplicación.

Finalmente es importante mencionar que estos resultados fueron los que definieron la forma en la que debía realizarse la caracterización espectral de los LEDs. Como discutiremos en el capítulo 3, el sistema de medición para la caracterización espectral lo implementamos para lograr iluminación uniforme sobre toda la superficie del LED.

1.4.3 Arreglo experimental para la medición de no linealidad de los LEDs iluminando toda la superficie uniformemente.

El arreglo experimental modificado para iluminar la superficie del LED de forma uniforme se muestra en la figura 1.4.6. Consta de un láser He-Ne polarizado y estabilizado en intensidad (Spectra Physics 117 A, 633nm, 1.7mW), una lente divergente, un filtro polarizador de vidrio (Edmund Scientific F52556) y el

fotómetro. La adquisición de datos se hizo con un multímetro digital conectado a una computadora que almacenaba la información. La lente divergente abre el haz del láser lo suficiente para que el área iluminada sea un poco mayor que el diámetro del LED y se logre una iluminación uniforme.

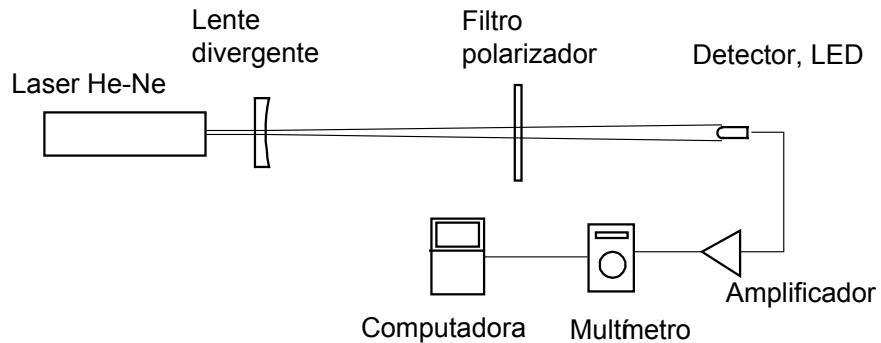


Figura 1.4.6 Arreglo experimental para la medición de no-linealidad de LEDs iluminándolos uniformemente (Velasco-Segura, 2003).

1.4.4 Pruebas de linealidad para el LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.

El proceso de medición se describe en Segura-Velasco (2003), en esta sección solo mostramos los resultados obtenidos. En la figura 1.4.7 se muestra la respuesta del SMF-SRD-509 a distintas intensidades de iluminación. En la figura 1.4.8 se muestra el análisis de no-linealidad, dada por la ecuación (1.3), para el mismo diodo, junto con el análisis para un fotodiodo comercial de Silicio.

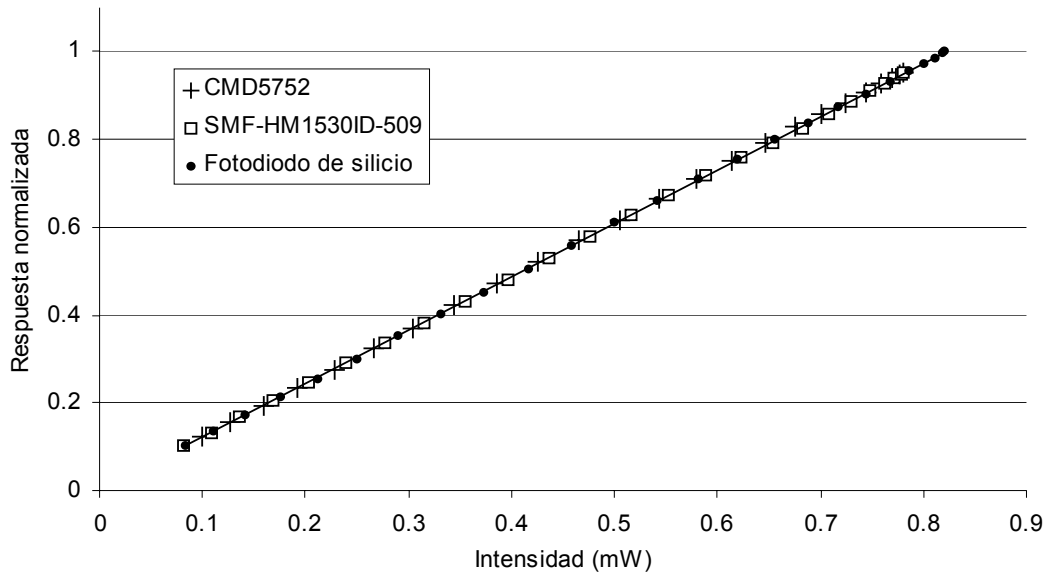


Figura 1.4.7 Mediciones de voltaje de respuesta para el LED SMF-SRD-509, para el LED transparente CMD-5752 (Chicago Miniature) y para un fotodiodo de silicio, iluminados con un haz uniforme de 3mm.

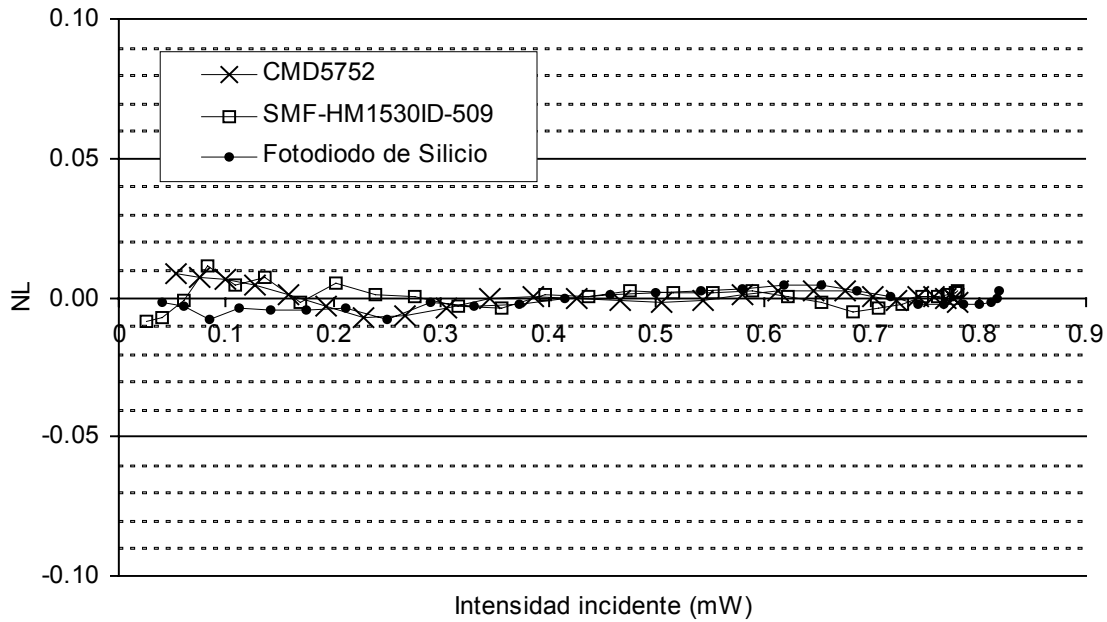


Figura 1.4.8. Mediciones de NL para el LED SMF-SRD-509, para el LED CMD-5752 y para un fotodiodo de silicio iluminados uniformemente con un haz de 3mm. (Velasco-Segura, 2003).

Se encontró una no-linealidad menor al 1% tanto para el LED SMF-SRD-509 como para el fotodiodo de silicio. Las principales fuentes de error son el ajuste manual del ángulo θ y las imperfecciones del filtro polarizador. En un conjunto de 100 mediciones para cada valor angular, la desviación estándar varió en función del ángulo, fluctuando alrededor del 1% de la medición.

El análisis de NL para el fotodiodo de Silicio nos lleva a concluir que los factores de no-linealidad encontrados están limitados por la precisión del arreglo experimental y que la NL del SMF-SRD-509 podría estar por debajo del 1%, ya que en López (2001), por ejemplo, se muestran mediciones de no-linealidad para fotodiodos de silicio encontrando factores de 0.02% para flujos de luz menores a 1mW. Los resultados de esta caracterización permiten establecer que los diodos emisores de luz pueden funcionar como detectores de luz con una respuesta lineal, al menos dentro de este rango de intensidades y bajo la condición de iluminación uniforme.

Los resultados sobre la respuesta espectral de los LEDs como función de la temperatura que se presentan en el capítulo 3 de esta tesis están basados en una respuesta lineal del fotómetro. Como hemos visto en este capítulo la respuesta lineal del LED se obtiene únicamente cuando se ilumina completamente y uniformemente la cubierta de plástico que protege al chip. Por tal motivo las formas de iluminación que propusimos para la caracterización espectral fueron dos: iluminación directa normal, es decir, iluminación con luz colimada que cubre completamente el LED y con iluminación difusa, usando para esta iluminación una esfera integradora. La descripción detallada de ambas iluminaciones se presenta en el capítulo 2 y los resultados obtenidos en cada caso se presentan en el capítulo 3.

Capítulo 2.

Sistema de medición y calibración.

El tipo de recubrimiento de los LEDs (epoxy), determina el tipo de iluminación que se puede obtener de estos usándolos como emisores, obteniendo iluminación directa o difusa, según sea el tipo de recubrimiento. También se obtiene una respuesta angular dependiendo de la geometría del LED, tanto del chip semiconductor como del epoxy. Lo mismo es de esperarse cuando funcionan como detectores. Por lo cual se llevó a cabo dos tipos de calibración, bajo iluminación directa normal y bajo iluminación difusa, pudiendo obtener así una comparación en la respuesta espectral de los LEDs bajo distintos tipos de iluminación.

La calibración en condiciones de iluminación difusa se llevo a cabo a temperatura ambiente (entre 19°C y 21°C) y la calibración en iluminación directa normal se hizo a varias temperaturas dentro de un rango de 20°C a 75°C.

El método que se llevó a cabo para medir la responsividad espectral de los LEDs es el de sustitución, esto es, comparando la respuesta espectral del LED con la respuesta de un fotodiodo de silicio patrón, bajo las mismas condiciones de iluminación monocromáticas de longitud de onda λ .

2.1 Monocromador basado en la configuración Czerny-Turner.

La configuración Czerny-Turner se muestra en la figura 2.1.1. Luz de una fuente apropiada es enfocada sobre una rendija de entrada, la luz pasa a través de esta rendija y es colimada por un espejo cóncavo el cual refleja la luz sobre una rejilla de difracción. La rejilla a su vez dirige la luz difractada sobre un segundo espejo cóncavo, el cual la refleja y enfoca sobre una segunda rendija de salida. Se utilizan espejos en vez de lentes para no introducir aberración cromática aunque se introducen otras aberraciones que limitan la resolución del instrumento. La rejilla produce luz difractada, esto es, el haz de luz se dispersa y para diferentes longitudes de onda la luz se refleja con diferentes ángulos. Girando la rejilla alrededor de su eje central podemos variar el rango de longitudes de onda que pueden ser reflejadas y enfocadas por el segundo espejo sobre la rendija de salida.

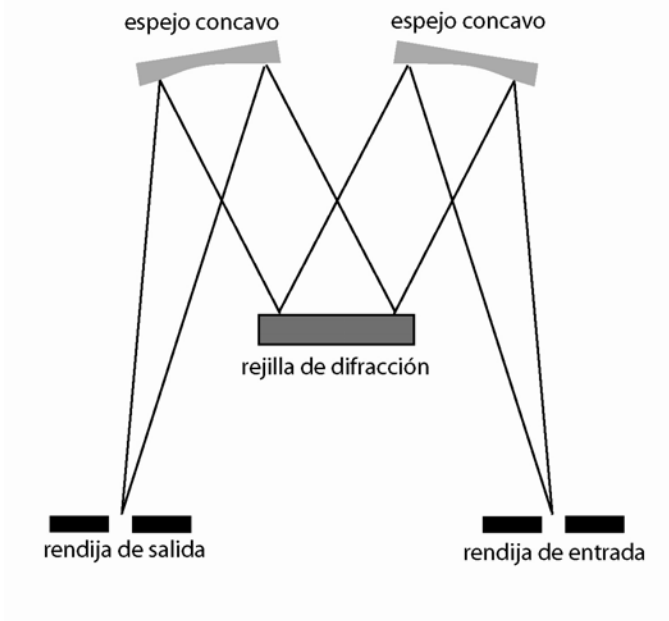


Figura 2.1.1: Configuración Czerny-Turner.

El funcionamiento del monocromador Czerny-Turner es en base a la difracción de Fraunhofer o de campo lejano, esto es, la fuente debe estar alejada de la rejilla de difracción al igual que el punto de observación. Esta aproximación se logra con los espejos cóncavos que se usan como colimadores. Una de las partes esenciales del monocromador es la rejilla de difracción.

2.1.1. Ecuación de la rejilla.

En esta sección describimos la forma en la que se deriva la ecuación de la rejilla.

Para obtener el campo eléctrico en un punto P lejano de la rejilla consideremos una fuente también lejana de esta, como se muestra en la figura 2.1.2.

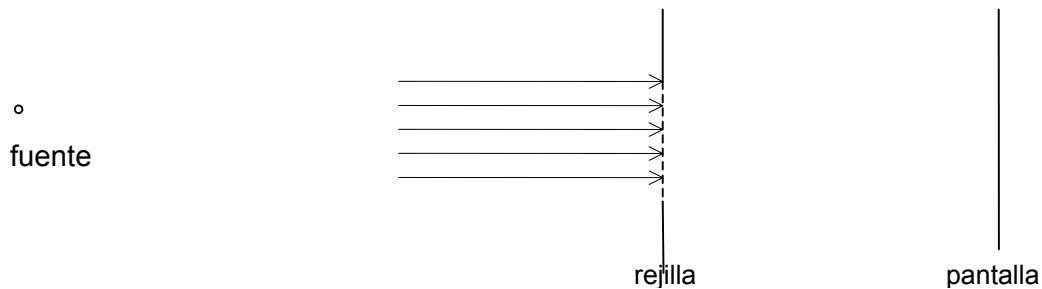


Figura 2.1.2. Difracción de campo lejano.

Al iluminar la rejilla cada rendija va a generar un campo eléctrico y el campo en un punto P en la pantalla va a ser la suma de todos los campos generados por cada una de las rendijas, y lo que vamos a poder observar es la irradiancia, dada por el promedio del campo eléctrico total en P :

$$I \propto \langle E^2 \rangle \quad (2.1)$$

Obtengamos primero el campo eléctrico generado por una sola rendija larga y angosta.

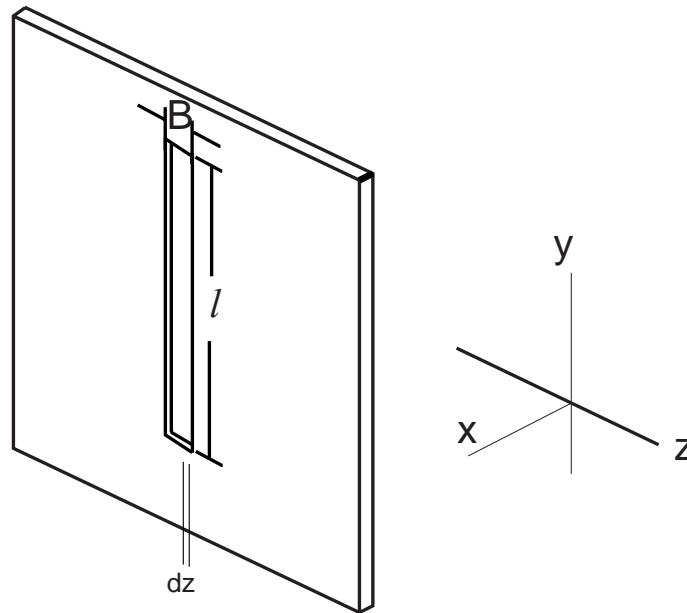


Figura 2.1.3 Rendija sencilla.

Como se muestra en la figura 2.1.3 dividimos la rendija en tiras infinitesimales dz a lo largo de esta, estas tiras van a ser fuentes lineales y como son largas ($l \gg \lambda$), los efectos de borde van a ser mínimos los cuales no se van a notar. Podemos considerar a cada tira a lo largo del eje y como un segmento infinitesimal a lo largo del eje z , obteniendo nuevamente una fuente lineal.

Por otro lado, consideremos una fuente lineal coherente de largo B (varios cientos de λ) y muy angosta (menor que λ), como se muestra en la figura 2.1.4.

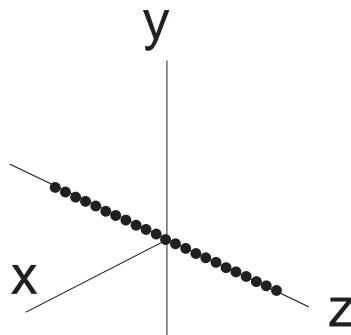


Figura 2.1.4 Fuente lineal coherente.

Por el principio de Huygens-Fresnel podemos considerar cada punto como una fuente secundaria, el campo generado por cada fuente va a ser:

$$E = \frac{\varepsilon_0}{r} \text{sen}(wt - kr - \varepsilon) \tag{2.2}$$

Donde ε es una fase que generada por la incidencia oblicua del frente de onda generado por la fuente principal, y $\varepsilon = k d (\text{sen}\theta - \text{sen}\theta_i)$, donde d es la separación entre las fuentes, θ es el ángulo de salida del haz y θ_i es el ángulo de incidencia del haz.

Para poder considerar una fuente lineal continua coherente el número de fuentes debe de tender a infinito y como se debe conservar constante la potencia total de la fuente lineal entonces ε_0 debe de tender a cero, sea entonces ε_L la potencia de la fuente lineal por unidad de longitud.

$$e_L = \frac{1}{B} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N$$

Si dividimos el largo de la rendija en M segmentos de longitud Δz_i , lo suficientemente pequeña para poder despreciar la diferencia relativa de fase entre cada fuente y poder considerar a r_i constante. Cada segmento Δz_i va a contener $\Delta z_i (N / B)$ fuentes y el campo eléctrico en P debido a cada segmento, va a ser:

$$E_i = \frac{e_0}{r_i} \text{sen} \left[k r_i - \frac{e}{k} \Delta z_i \right] \tag{2.3}$$

Sumando los campos generados por cada Δz_i , obtenemos que el campo en P es:

$$E = \sum_{i=1}^M \frac{e_0}{r_i} \text{sen} \left[k r_i - \frac{e}{k} \Delta z_i \right] \tag{2.4}$$

Haciendo Δz_i infinitesimal, la suma se convierte en una integral bien definida, obteniendo una fuente lineal continua y el campo eléctrico en P va a ser:

$$E = e_L \int_{-B/2}^{B/2} \frac{1}{r_i} \sin \left(k r_i \frac{z}{r_i} \right) dz \quad (2.5)$$

El punto de observación se encuentra lejos de la rendija, por tanto $r(z)$ no se desvía apreciablemente de su valor medio ($\langle r \rangle = R$), lo que si va a ser sensible es la fase, desarrollando en serie de Maclaurin a $r(z)$,

$$r = R \left[1 - \frac{z^2}{2R^2} \cos^2 \theta + \dots \right] \quad (2.6)$$

dado que estamos la difracción de campo lejano, podemos despreciar los términos de grado dos y mayores, entonces $r(z)$ nos queda:

$$r(z) = R - z \cos \theta \quad (2.7)$$

donde θ se mide desde el plano xz , entonces dE es:

$$dE = \frac{e_L}{R} \sin \left(k \left(R - z \cos \theta \right) \frac{z}{R} \right) dz \quad (2.8)$$

Resolviendo la integral:

$$E = \frac{e_L B}{R} \frac{\sin b}{b} \sin \left(k R \cos \theta \right) \quad (2.9)$$

donde

$$b = \frac{k B z \cos \theta}{R} \quad (2.10)$$

La irradiancia queda:

$$I = \frac{I_0}{2} \left(\frac{\sin b}{b} \right)^2 \quad (2.11)$$

Tomando ahora el caso de N rendijas paralelas, angostas y largas, de ancho b y separación a.

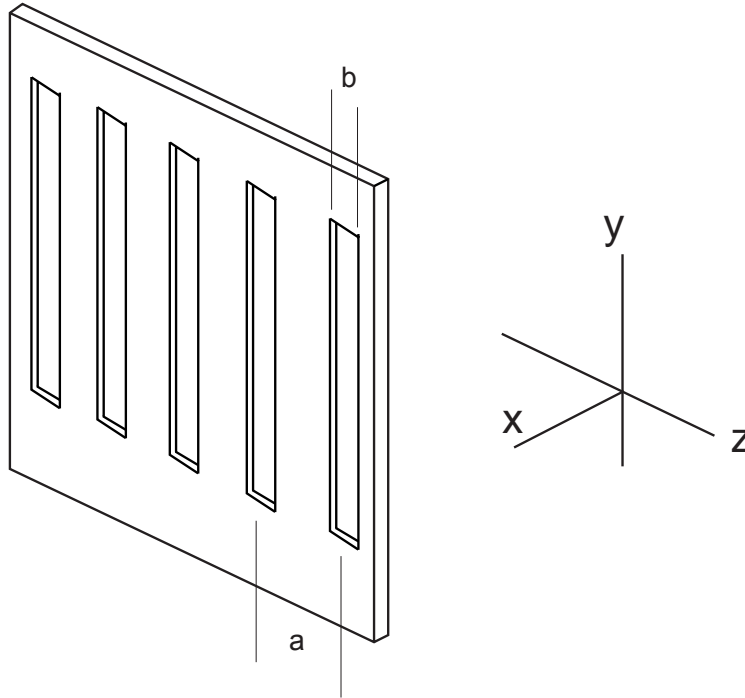


Figura 2.1.5 Múltiples rendijas.

La perturbación en un punto P lejano va a ser la suma de los campos eléctricos generados por cada una de las rendijas:

$$E = C \int_{-b/2}^{b/2} e^{i(kz - \omega t)} e^{-i(ky - \omega t)} dy + C \int_{-b/2}^{b/2} e^{i(kz - \omega t)} e^{-i(ky - \omega t)} dy + \dots + C \int_{-b/2}^{b/2} e^{i(kz - \omega t)} e^{-i(ky - \omega t)} dy \quad (2.12)$$

Donde:

$$F_z = \int_{-b/2}^{b/2} e^{-i(ky - \omega t)} dy = \frac{2 \sin(q_i)}{q_i} \quad (2.13)$$

La contribución de la j-ésima rendija va a ser:

$$E_j = C \frac{\sin \left[t - kR \left(\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1 \right) \right]}{k \sin \theta_j - \sin \theta_i} \quad (2.14)$$

Dado que $\theta \approx \theta_j$, y manipulándolo un poco queda:

$$E_j = b C \frac{\sin \left[\frac{b}{a} \left(\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1 \right) \right]}{\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1} \quad (2.15)$$

Con:

$$b = \frac{k b}{2 \sin \theta_i - \sin \theta_j} \quad (2.16)$$

$$a = \frac{k a}{2 \sin \theta_i - \sin \theta_j} \quad (2.17)$$

El campo eléctrico va a ser la suma de las contribuciones de cada rendija, la cual es:

$$E = b C \frac{\sin \left[\frac{b}{a} \left(\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1 \right) \right]}{\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1} \quad (2.18)$$

La distribución de densidad de flujo o irradiancia que

$$I = \frac{b^2}{a^2} \frac{\sin^2 \left[\frac{b}{a} \left(\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1 \right) \right]}{\left(\frac{\sin \theta_j}{\sin \theta_i} - 1 \right)^2} \quad (2.19)$$

En la figura 2.1.6 se muestra el patrón de difracción para 10 rendijas. Al aumentar el número de rendijas lo que se obtiene es que el ancho de cada máximo principal disminuye.

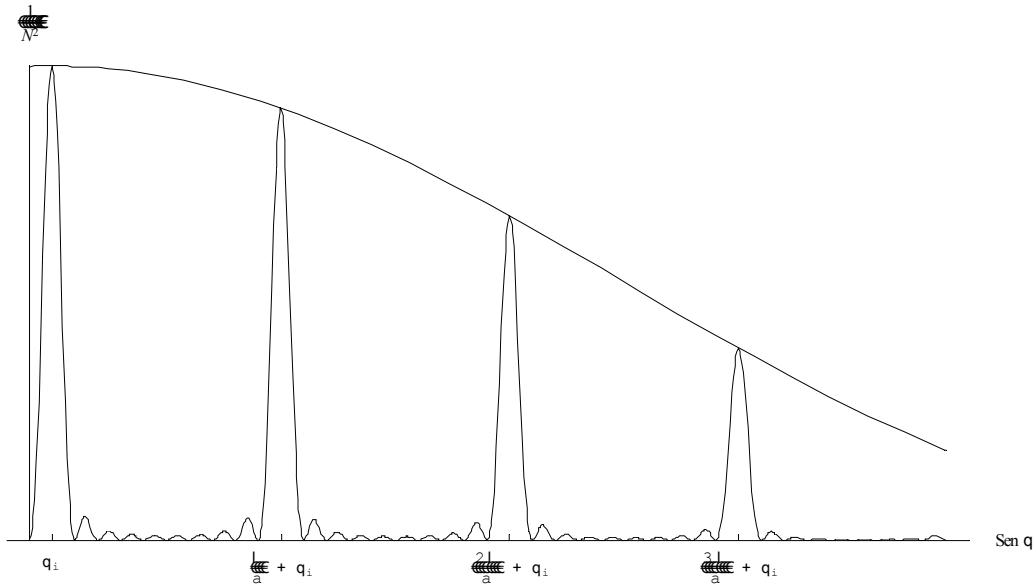


Fig. 2.1.6 Patrón de difracción para una rejilla de 10 rendijas.

Los máximos principales se obtiene para $\alpha = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \pm3\pi, \dots$ o bien, cuando:

$$a \sin \alpha = m \lambda \quad (2.20)$$

La ecuación (2.20) se conoce como la ecuación de la rejilla de difracción.

2.2 Descripción del sistema de medición (monocromador, rejillas de difracción, filtros, fuente).

El sistema de medición consta de una fuente sintonizable de luz, componentes auxiliares para la formación del haz (caso iluminación directa normal), para el posicionamiento de los detectores y para la medición de las señales.

La fuente sintonizable de luz consiste en un monocromador doble (configuración Czerny-Turner, sección 2.1), en una lámpara incandescente de 450 watts y en un espejo cóncavo.

El suministro de corriente de la lámpara es una fuente de corriente estabilizada (marca HP, modelo HP6675A con corriente de 0/18A). Para la estabilización de la lámpara (proceso denominado comúnmente como quemado) se le suministra corriente gradualmente de 0 a 10 amperes (a razón de 1 amp por cada 3 seg) dejándola encendida, con la corriente de 10 amperes, al menos 10 minutos antes de empezar las mediciones.

Con el espejo cóncavo se proyecta la imagen del filamento de la lámpara en la rendija de entrada del monocromador.

La rejilla de difracción usada en el monocromador es de 600 líneas/mm, y se uso también un filtro para evitar el traslape de ordenes de difracción.

En el monocromador se usaron las rendijas rectangulares con un ancho de 1.25mm, lo cual nos proporciona un ancho de banda de 8nm, en el haz de salida del monocromador.

2.3 Iluminación difusa y directa del LED.

En esta sección presentamos las dos configuraciones usadas para medir la responsividad espectral del LED.

2.3.1 Iluminación directa.

Para medir la responsividad espectral con luz directa se colocaron tanto el LED como el detector patrón, sobre un riel movable, controlado por la computadora, perpendicular al haz de salida del monocromador. Usando una lente divergente a la salida del monocromador, se ensanchó el haz de salida, obteniendo un haz uniforme para abarcar la superficie del LED.

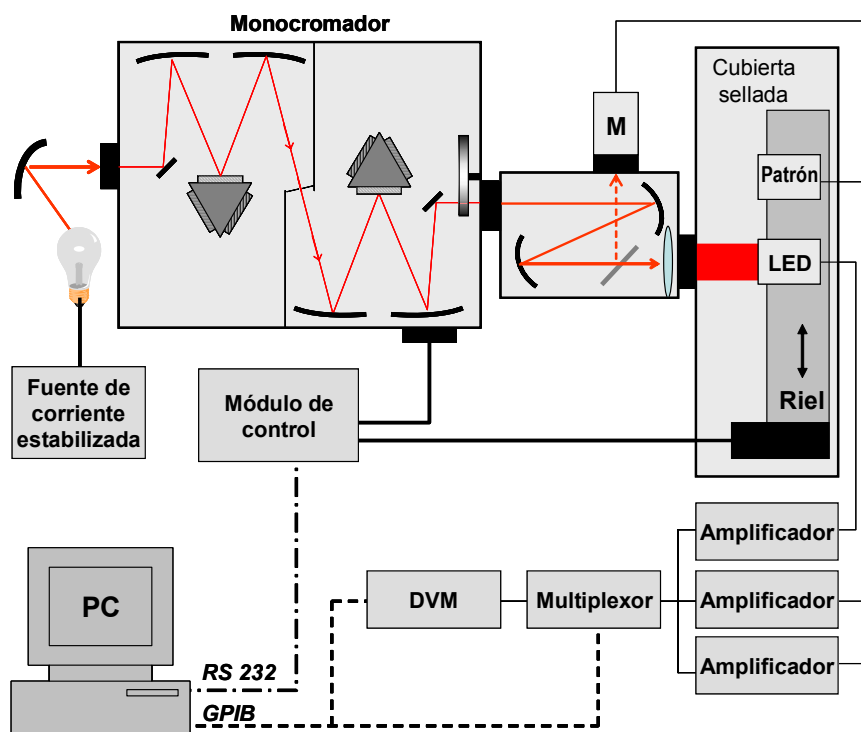


Figura 2.3.1: Sistema de medición para iluminación directa.

2.3.2 Iluminación difusa.

Para tener una iluminación uniforme se colocó una esfera integradora a la salida del monocromador. Se colocó el LED en una compuerta de la esfera y el detector patrón se colocó en la compuerta contraria.

Para analizar posibles in-homogeneidades de la esfera integradora se hizo la siguiente prueba: se intercambié la posición del LED con el detector patrón.

Con este tipo de iluminación no se puede obtener una responsividad espectral absoluta puesto que el detector patrón utilizado no está calibrado para este tipo de iluminación.

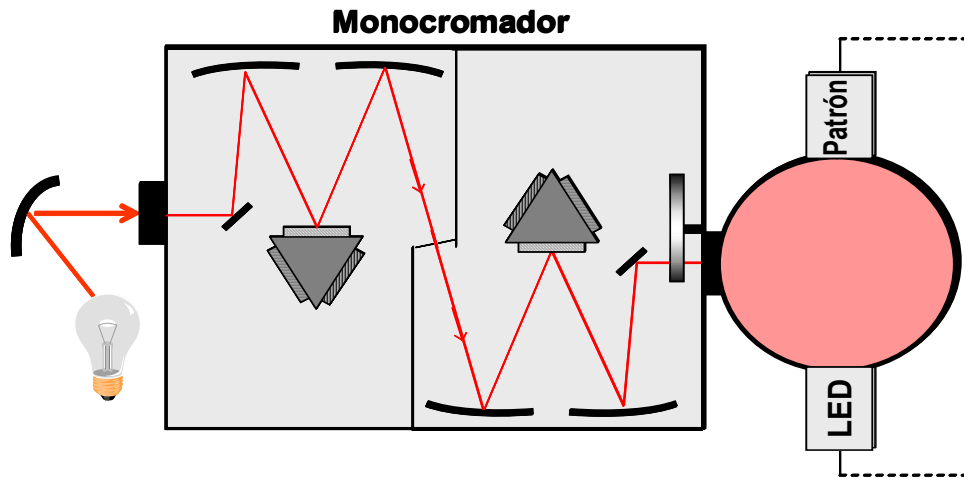


Figura 2.3.2: Sistema de medición para iluminación difusa.

2.4 Descripción del sistema de control y medición de temperatura.

Para aumentar la temperatura de los LEDs se usó un resistor eléctrico, de uso común en cafeteras, de 600Ω (Reygadas, 2003), conectado a una fuente de corriente estabilizada de corriente directa (marca HP, modelo HP6675A con corriente de 0/18A) la cual permite controlar la corriente que pasa por el resistor y como consecuencia la temperatura de este, logrando una estabilidad de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el alcance de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. El resistor consiste de un filamento de 18 cm de longitud y esta cubierto por un tubo flexible de fibra de vidrio, ver figura 2.4.1

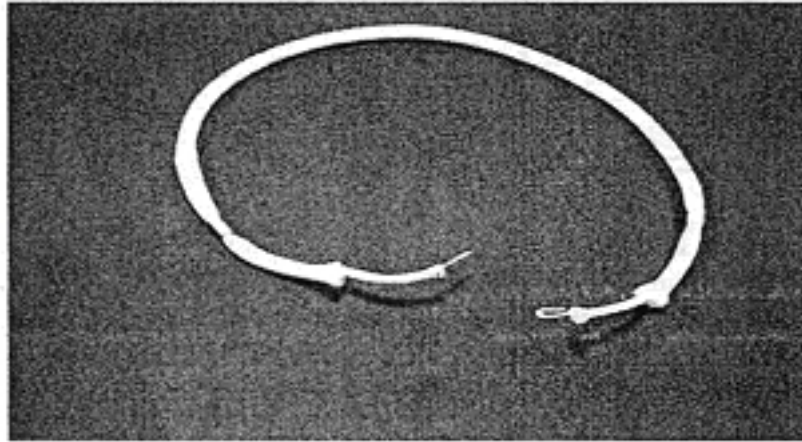


Figura 2.4.1 Resistor eléctrico de 600Ω , de uso común en cafeteras, (foto: F. Reygadas).

El resistor va enrollado en un cilindro de aluminio, el cual tiene un diámetro de 1 pulgada y un espesor de 1 pulgada. El cilindro tiene dos perforaciones, de 5mm de diámetro, colocadas simétricamente con respecto al diámetro de la base del cilindro, en una perforación se coloca el LED de prueba por un extremo y en la otra se coloca el LED-termómetro para poder medir la temperatura (Reygadas, 2003), ver figura 2.4.2.

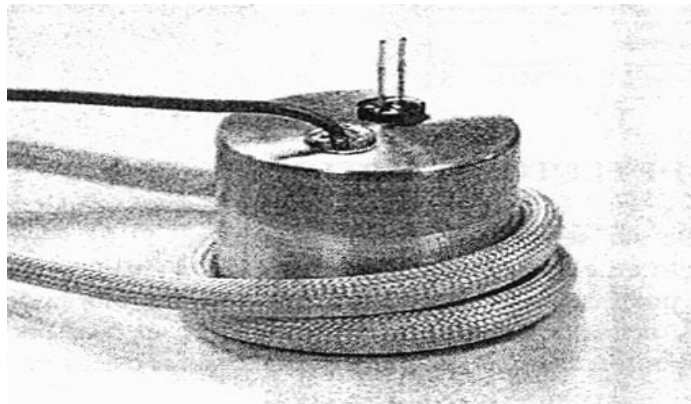


Figura 2.4.2 Cilindro de aluminio en el cual se monta el LED termómetro y el LED de prueba. La resistencia se enreda en el cilindro, (foto: F. Reygadas).

Para hacer el LED-termómetro se tomó un LED del mismo tamaño y con la misma geometría que los LEDs de prueba y se le hizo un orificio en la parte inferior, entre las patas de este, para poder colocar un termopar lo más cercano posible a la región donde se encuentran el chip semiconductor, ver figura 2.4.3. El termopar va conectado a un multímetro digital (marca BRYMEN, modelo BM817X) que permite la lectura de temperatura con una resolución de 1°C.

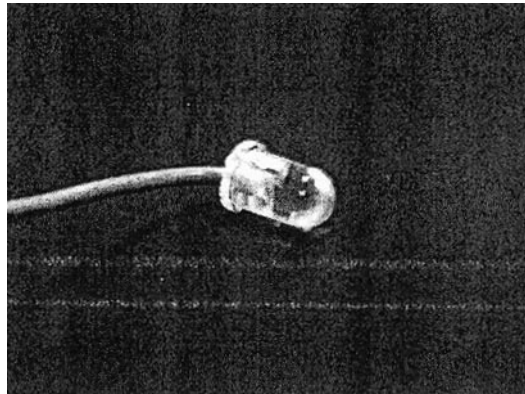


Figura 2.4.3 LED termómetro

Para poder hacer las mediciones a distintas temperaturas primero se suministraba corriente al resistor, dejando calentar el dispositivo al menos 15 minutos para poder asegurar la estabilidad de la temperatura en este y no tener cambios de temperatura durante la medición.

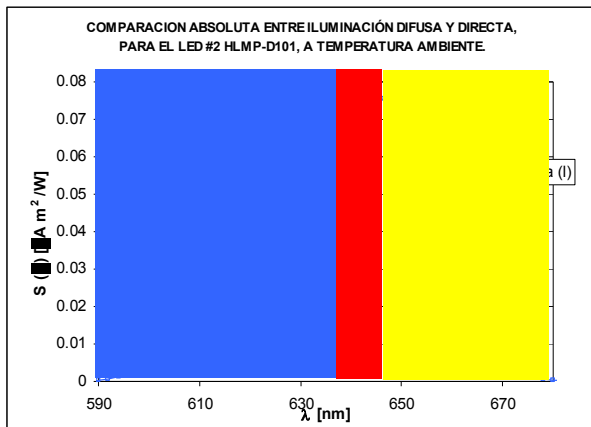
Dada la geometría del dispositivo para calentar el LED y la disposición simétrica del LED de prueba y del LED termómetro podemos asegurar que la temperatura que estamos midiendo con el LED termómetro es la misma que la que tiene el LED de prueba. Experimentalmente se verificó este resultado, midiendo la temperatura en ambos orificios.

Cabe señalar que la fuente de corriente para la resistencia tiene que ser necesariamente de corriente directa, ya que el usar corriente alterna se induce una corriente dentro del LED de prueba, lo cual provoca una señal ruidosa.

2.5 Lectura de señal y captura de datos.

Para determinar el intervalo espectral en donde se iba a ser la caracterización de la responsividad se hicieron pruebas, ubicando el máximo de absorción y el ancho de banda de cada modelo de LED. Este intervalo se dividió en tres regiones, ver figura 2.5.1:

Regiones del intervalo espectral:



- i) ■ Antes del máximo de absorción
- ii) ■ Cercana al máximo de absorción
- iii) ■ Después del máximo de absorción

Figura 2.5.1. Regiones del intervalo espectral.

La toma de datos se hizo de la siguiente manera: en la región uno, cada 5nm a 2nm, en la región dos cada 1nm, y en la región tres cada 2nm. Para los LED's infrarrojos la región uno se dividió en dos, puesto que se observó que había una señal pequeña a partir de los 300nm hasta alrededor de los 750nm (para uno de los LEDs) y 850nm (para el otro LED), en dichos intervalo se hicieron mediciones cada 100nm, a partir de los 750nm (en un caso) y 850nm (en el otro) se hizo el muestreo cada 5nm y finalmente se siguió el orden descrito anteriormente en las regiones 2 y 3.

Para iluminación difusa, las lecturas de la señal se hicieron de la siguiente forma: para cada longitud de onda se tomaron 10 datos de la señal de salida del LED, y luego 10 datos de la señal de salida del detector patrón. La señal en oscuro se hizo antes y después de cada barrido del intervalo espectral.

Para iluminación directa, las lecturas de la señal se hicieron de la siguiente manera: primero se medía la señal en oscuro del detector, ya sea el LED o el detector patrón (10 mediciones), luego se media la señal de salida del detector para todo el intervalo espectral (10 mediciones de la señal del detector y 10 mediciones de la señal del detector de monitoreo, para cada longitud de onda) y nuevamente se medía la señal en oscuro (otras 10 mediciones).

La señal en oscuro sirve para corregir el nivel de offset en la señal de salida de los detectores.

Para la captura de datos de la medición de las fotocorrientes del LED y del detector patrón, para ambos tipos de iluminación, se usaron un par de amplificadores, uno conectado al LED, con una ganancia de 10^8 V/A y el otro conectado al detector patrón con una ganancia de 10^3 V/A. Ambos amplificadores iban conectados a un multiplexor automatizado (Agilent 34970 A) que escogía la señal a leer en el multímetro digital (HP3457A de 7 ½ dígitos). El control del multiplexor y la captura de datos, se realiza por la interfaz GPIB (Schmid, 2003). Puesto que la señal del LED es pequeña, el cable que conecta al LED con el amplificador no debe tener una longitud mayor a 30cm, pues la señal se pierde si el cable es muy largo.

2.6 Monitoreo de la señal de salida del monocromador.

En el caso de iluminación directa, se tiene que las mediciones que se toman para la comparación de la respuesta del LED y la del detector patrón no son simultáneas, por tanto con la ayuda de un detector auxiliar (fotodiodo de silicio) y un divisor de haz, se lleva a cabo un monitoreo de la potencia óptica del haz a la salida del monocromador, puesto que aún cuando la lámpara incandescente está alimentada por una fuente de corriente estabilizada y está sometida a un proceso de estabilización, pueden ocurrir posibles derivas en la potencia óptica, que mediante este proceso de monitoreo se corrigen.

En el caso de las mediciones con luz difusa no es necesario llevar a cabo este monitoreo puesto que las mediciones son casi simultáneas y las posibles derivas que pueda tener la potencia óptica son despreciables.

Para todas las mediciones el detector de monitoreo estaba conectado a un amplificador de trans-impedancia de Grasby Optronics con una ganancia de 10^3 V/A.

2.7 Calibración.

La calibración mediante el método de sustitución consiste en comparar la fotocorriente generada en el LED con la fotocorriente generada en el detector patrón (un fotodiodo de silicio), bajo una misma iluminación monocromática de longitud de onda λ . La responsividad espectral del detector patrón usado, modelo Hamamatsu S1337 con número DH300C, se muestra en la Figura 2.7.1.

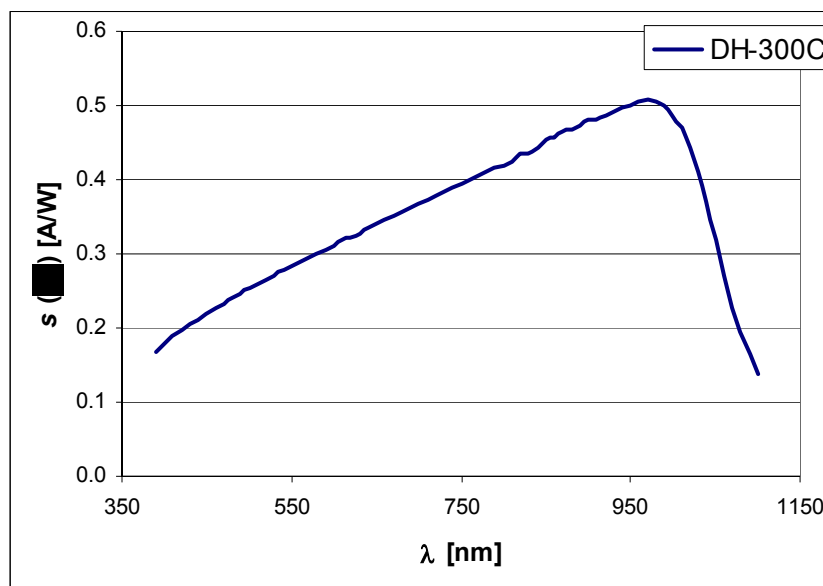


Figura 2.7.1. Responsividad espectral del detector patrón.

La medición de la responsividad espectral se realizó exponiendo al LED y al fotodiodo de silicio patrón a una misma iluminación monocromática de longitud de onda λ . Al hacer esto se obtiene tanto la fotocorriente generada por el LED, $I_{LED}(\lambda)$, como la fotocorriente del detector patrón, $I_{patrón}(\lambda)$. Y la responsividad espectral $s_{LED}(\lambda)$ del LED se obtiene por:

$$s_{LED}(\lambda) = \frac{I_{LED}(\lambda)}{I_{patrón}(\lambda)} \cdot s_{patrón}(\lambda) \quad (2.21)$$

donde, $s_{patrón}(\lambda)$ la responsividad espectral (para irradiancia) del fotodiodo de silicio, $M_{LED}(\lambda)$ y $M_{patrón}(\lambda)$ son las señales del detector de monitoreo al momento de la medición con el LED y el detector patrón, respectivamente, (Schmid, 2003).

2.8 Cálculo de: la longitud de onda dominante, las señales para un espectro constante y el solar, y el coeficiente de temperatura.

En esta sección se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la longitud de onda dominante, para el cálculo de la respuesta del LED si se iluminara con luz que idealmente tuviera una intensidad constante con la longitud de onda, y si se iluminara con la luz del sol. Finalmente se presenta la ecuación para el cálculo del coeficiente de temperatura relativo.

2.8.1. Longitud de onda dominante.

La longitud de onda dominante λ_D está dada por :

$$\lambda_D = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2.22)$$

en donde $s(\lambda)$ está dada por la ecuación (2.21).

El ancho de banda se mide cuando la intensidad máxima decae al 50%.

2.8.2. Respuesta del LED para un espectro constante y para el espectro solar.

Las respuestas que daría el LED, A_{plano} y A_{solar} , cuando se le ilumina con una irradiancia constante E_0 (“espectro plano”) y con el espectro solar a nivel del mar, $E_{solar}(\lambda)$, respectivamente están dadas por:

$$A_{plano} = \int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) E_0 d\lambda \quad (2.23)$$

$$A_{solar} = \int_{-\infty}^{\infty} s(\lambda) E_{solar}(\lambda) d\lambda \quad (2.24)$$

El espectro solar se obtuvo mediante la medición de puntos de una gráfica del manual de *Oriel Corporation* donde se muestra la incidencia normal del espectro solar en un día despejado. Los valores del espectro solar se midieron directamente en la gráfica, y una vez obtenidos estos valores se hizo una interpolación lineal entre ellos, dicho espectro se muestra en la figura 2.8.1.

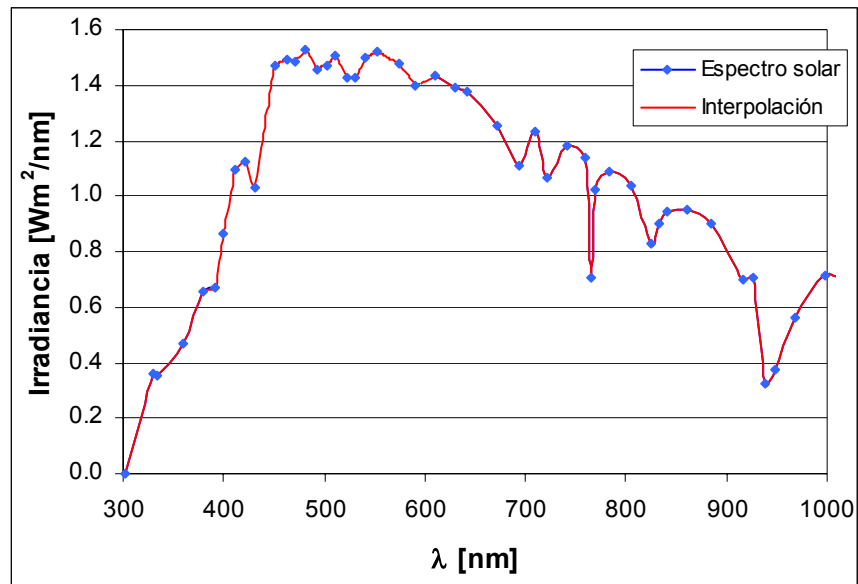


Figura 2.8.1 Incidencia normal del espectro solar a nivel del mar en un día despejado.

2.8.3. Coeficiente de temperatura relativo.

Los coeficientes de temperatura relativos están dados por:

$$C_{T-rel} = \frac{s(\lambda, T_2) - s(\lambda, T_1)}{(s(\lambda, T_2) + s(\lambda, T_1))/2} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} \quad (2.25)$$

El coeficiente de temperatura relativo da la razón de cambio de la responsividad con respecto a la temperatura para cada longitud de onda.

Capítulo 3.

Resultados y Discusión.

3.1 LEDs analizados.

Se analizaron dos LEDs difusos con emisión en el visible: (A) SMF-HM1530SRD-509, de Lumex compuesto de GaAlAs, que emite a una longitud de onda pico $\lambda_{pico} = 660\text{nm}$, y (B) HLMP-D101 de Agilent, compuesto por AlGaAs, emitiendo a $\lambda_{pico} = 645\text{nm}$, ambos con un ancho de banda de 20nm. Además se analizaron dos LEDs que emiten en el infrarrojo: (C) CQX15 F240, de Fairchild semiconductors, compuesto por GaAs emitiendo a $\lambda_{pico} = 940\text{nm}$ y (D) F5E1 F348, de Fairchild semiconductors, compuesto por AlGaAs, emitiendo a $\lambda_{pico} = 880\text{nm}$, con un ancho de banda de 75nm. También se analizaron dos LEDs transparentes con emisión en el visible: (E1) CMD-5752 de Chicago miniature emitiendo a $\lambda_{pico} = 635\text{nm}$ entero y (E2) CMD-5752 igual que E1 con la diferencia de que se encuentra limado de la punta ver tabla 3.2.1. Un LED color verde transparente (F) emitiendo en $\lambda_{pico} = 565\text{nm}$ con un ancho de banda de 25nm, se desconoce fabricante. Y un LED verde difuso (G), se desconoce emisión, ancho de banda y fabricante.

Los LED's A, B, C, D, E₁ y E₂ son considerados de calidad óptica, esto es, que llevan un proceso de control de calidad durante su fabricación. Los LED's F y G no son de calidad óptica y son los que normalmente se compran en tiendas y que no vienen con ninguna información sobre su composición, emisión, etc., Se les hicieron pruebas a todos ellos para observar su reproducibilidad espectral, tanto en los de calidad óptica como en los que no tienen un control de calidad durante el proceso de fabricación.

	Modelo.	Fabricante.	Material.	Encapsulado.	λ_{pico} (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
A	SMF-HM1530SRD-509	Lumex.	GaAlAs	Rojo, difuso.	660	Desc.
B	HLMP-D101	Agilent.	AlGaAs	Rojo, difuso.	645	20
C	CQX15 F240	Fairchild semiconductor.	GaAs	s/c, transparente.	940	Desc.
D	F5E1 F348	Fairchild semiconductor.	AlGaAs	s/c transparente.	880	75
E ₁	CMD-5752 entero	Chicago miniatura.	Desconocido	Rojo, transparente.	635	Desc.
E ₂	CMD-5752 limado	Chicago miniatura.	Desconocido	Rojo, transparente, limado.	635	Desc.
F	LED verde T	Desconocido	Desconocido	Verde, transparente.	Desc.	Desc.
G	LED verde D	Desconocido	Desconocido	Verde, difuso.	Desc.	Desc.

Tabla 3.1.1. LEDs analizados y sus características como emisores dadas por el fabricante. (s/c: sin cápsula)


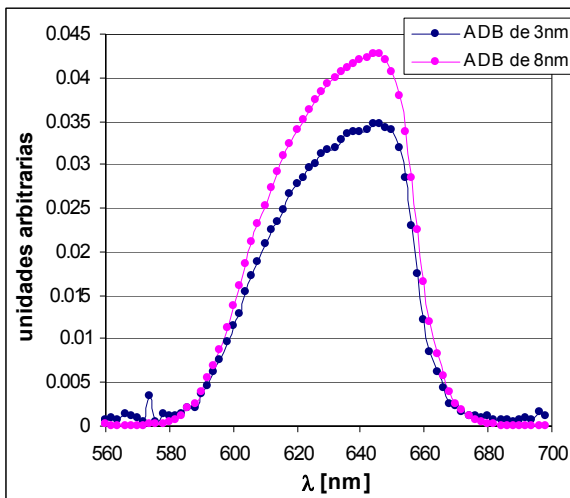
	Modelo.	
A	SMF- HM1530 SRD-509	
B	HLMP- D101	
C	CQX15 F240	
D	F5E1 F348	
E ₁	CMD- 5752 <i>Entero</i>	
E ₂	CMD- 5752 <i>Limado</i>	
F	LED <i>verde T</i>	
G	LED <i>verde D</i>	

Tabla 3.1.2. LEDs analizados y sus con su fotografía.

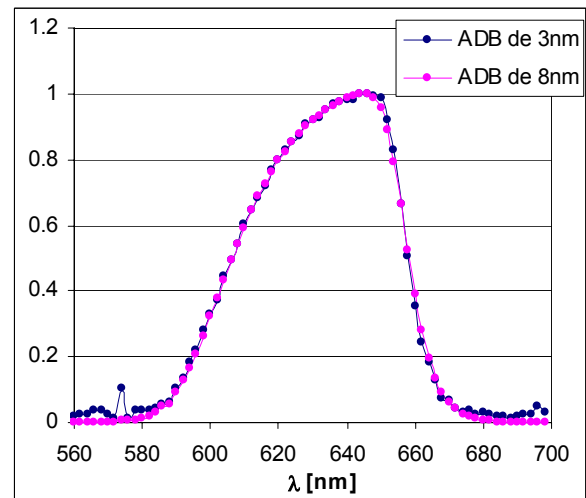
3.2 Determinación del ancho de banda.

Para determinar el ancho de banda de salida de la fuente sintonizable de luz se usó un LED del modelo A y se caracterizó espectralmente mediante iluminación difusa, de dos formas:

- i) Con ancho de banda de salida de la fuente sintonizable de 3nm (es decir con rendijas de entrada y de salida del monocromador de 0.5mm de ancho).
- ii) Con ancho de banda de salida de la fuente sintonizable de 8nm. (con rendijas de entrada y de salida del monocromador de 1.25mm de ancho).



Gráfica 3.2.1. Responsividad absoluta para el LED SMF-HM1530SRD-509 con un ancho de banda (ADB) del haz de salida del monocromador de 3nm y de 8nm.



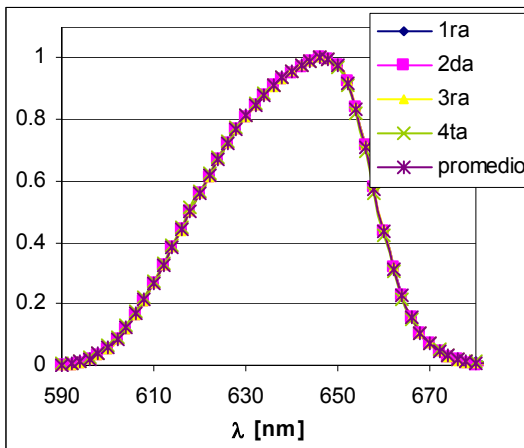
Gráfica 3.2.2. Responsividad relativa para el LED SMF-HM1530SRD-509 con un ancho de banda (ADB) del haz de salida del monocromador de 3nm y de 8nm.

En la gráfica 3.2.1 se muestran dos mediciones de la responsividad absoluta para un LED modelo SMF-HM1530SRD-509. Una medición corresponde al caso cuando el haz de salida del monocromador tiene un ancho de banda de 3nm y la segunda medición para cuando el haz de salida tiene un ancho de banda de 8nm. Se observa una disminución en la señal del LED al iluminarlo con el haz de ancho de banda de 3nm, esto se debe a que el haz con un ancho de banda de 8nm tiene más energía que el otro. En la gráfica 3.2.2 se muestran dos mediciones de la responsividad espectral relativa para el mismo LED de la gráfica 3.2.1, para cuando el haz de salida del monocromador tiene un ancho de banda de 3nm y 8nm. De esta gráfica se observa que la forma de la responsividad espectral relativa no es afectada o modificada por el ancho de banda de salida de la fuente sintonizable, pues se observa que son prácticamente iguales, con la diferencia de que la señal para el haz de 3nm es ruidosa.

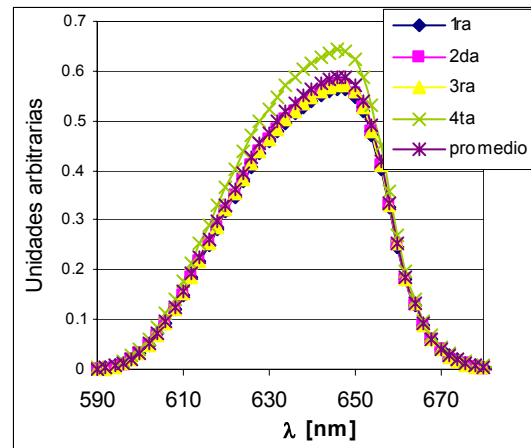
3.3 Prueba con la esfera integradora.

Para comprobar que no existen in-homogeneidades en la esfera integradora se usó el LED # 5 modelo HLMP-D101 (B), con el cual se hicieron tres mediciones (1ra, 2da y 3ra) en un puerto de la esfera y para la cuarta medición (4ta) se intercambiaron las posiciones del LED y del detector patrón.

Los resultados obtenidos se pueden observar en las gráficas 3.3.1 y 3.3.2.



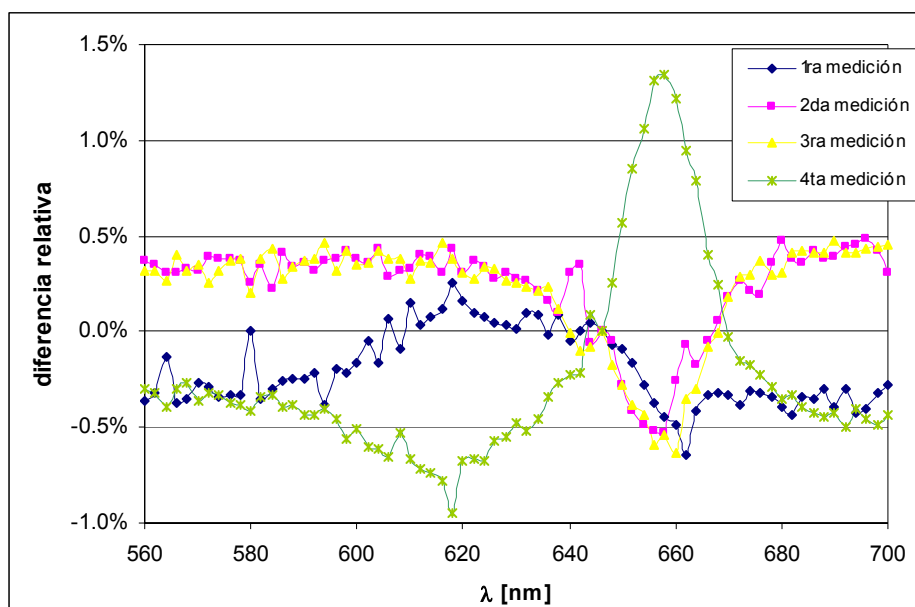
Gráfica 3.3.1. Responsividad espectral relativa obtenida en cada una de las mediciones del LEDs #5 modelo HLMP-D101 y el promedio.



Gráfica 3.3.2. Responsividad espectral "absoluta" obtenida en cada una de las mediciones del LEDs #5 modelo HLMP-D101 y el promedio.

medición	λ_p [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$s(\lambda_p)$ unidades arbitrarias	dif % "absoluta" respecto al promedio
1ra	646	39	0.563567	-4.09
2da	646	39	0.570762	-2.87
3ra	646	39	0.572851	-2.51
4ta	646	39	0.643283	9.47
promedio	646	39	0.5876155	--

Tabla 3.3.1. Comparación entre las distintas mediciones hechas al LED HLMP-D101 en la esfera integradora.



Gráfica 3.3.3 Diferencia relativa porcentual entre $s(\lambda)$ de cada una de las mediciones con el promedio.

En la gráfica 3.3.3 se muestra la diferencia porcentual entre la responsividad espectral relativa de cada una de las mediciones y el promedio. Se puede observar de esta misma gráfica que la diferencia relativa de la 1ra, 2da y 3ra medición es menor que 0.5% y en el caso de la 4ta medición tenemos una diferencia relativa menor al 1.5%. De la tabla 3.3.1 se muestra que no hay corrimientos en la longitud de onda donde la responsividad es máxima. En esta misma tabla se muestra la diferencia porcentual “absoluta” respecto al promedio. Para la cuarta medición se obtiene la mayor diferencia de casi 10%; probablemente provocado por la cantidad de luz que incide en el LED, ya que pudo estar en una posición en el cual incidía más luz en el chip que para las otras mediciones. Estos resultados muestran que la responsividad medida con la esfera integradora es sensible a la posición del LED en el puerto de la esfera.

3.4 Iluminación difusa.

Se caracterizó la responsividad espectral relativa en iluminación difusa para los LEDs: A, B, C, D, E₁, E₂, F, y G.

Para los modelos A, B, C y D se caracterizaron varios LEDs de cada modelo para observar la reproducibilidad entre varios individuos de un mismo tipo, en la tabla 3.4.1 se muestran la cantidad de LEDs que se usaron para cada modelo:

	Modelo	# de LEDs
A	SMF-HM1530SRD-509	3
B	HLMP-D101	4
C	CQX15 F240	2
D	F5E1 F348	2
E ₁	CMD-5752 <i>entero</i>	1
E ₂	CMD-5752 <i>limado</i>	1
F	LED <i>verde T</i>	1
G	LED <i>verde D</i>	1

Tabla 3.4.1. Cantidad de LEDs usados por cada modelo.

En la tabla 3.4.2 se muestra el número de mediciones hechas a cada LED con iluminación difusa.

Modelo LED.	LED #	Mediciones
SMF-HM1530SRD-509	1	7
	2	3
	3	3
HLMP-D101	2	3
	3	3
	4	3
	5	4
CQX15 F240	1	3
	2	3
F5E1 F348	1	3
	2	1
CMD-5752 <i>entero</i>	1	1
CMD-5752 <i>limado</i>	2	1
LED <i>verde T</i>	1	2
LED <i>verde D</i>	1	2

Tabla 3.4.2 Mediciones hechas a cada LED en iluminación difusa.

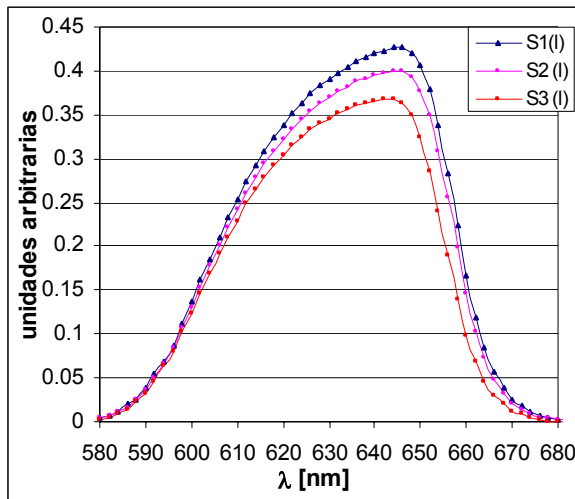
A continuación mostraremos la responsividad espectral de los LEDs listados en la tabla 3.4.2. Para cada LED, la responsividad espectral es graficada en su valor absoluto, y en su valor relativo, $s_{rel}(\lambda)$. Se debe mencionar que para la evaluación de la responsividad espectral absoluta se utilizaron los datos para el detector patrón que fue calibrado con iluminación directa y no con iluminación difusa. De tal manera que para el cálculo de responsividad espectral absoluta se usaron los valores del detector patrón calibrado con iluminación directa. Adicionalmente en la sección 3.3 se vio que la respuesta absoluta del LED varia apreciablemente dependiendo de su posición en el puerto de la esfera y no hay forma de saber cuanta luz está incidiendo en el chip. Por estos motivos las unidades están dadas en unidades arbitrarias y hemos escrito la palabra “absoluta” entre comillas.

Las diferentes curvas de cada gráfica muestran la reproducibilidad entre individuos del mismo modelo, salvo en los casos de los LEDs tipo F y G, ya que solo se contaba con un individuo de cada LED.

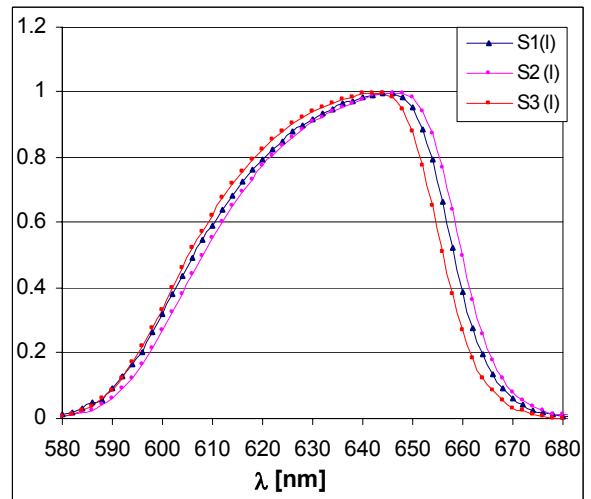
Estas mediciones también sirvieron para observar la respuesta de los LEDs bajo estas condiciones de iluminación y poder compararla con la respuesta en iluminación directa, viendo así como afecta el tipo de iluminación en la responsividad espectral de los LEDs.

(A) SMF-HM1530SRD-509.

En las gráficas 3.4.1 y 3.4.2 se muestra la responsividad espectral “absoluta” y la responsividad espectral relativa, respectivamente, para los tres LEDs de este modelo



Gráfica 3.4.1. Responsividad “absoluta” para el modelo SMF-HM1530SRD-509, con iluminación difusa.



Gráfica 3.4.2. Responsividad relativa para el modelo SMF-HM1530SRD-509, con iluminación difusa.

En la tabla 3.4.3 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

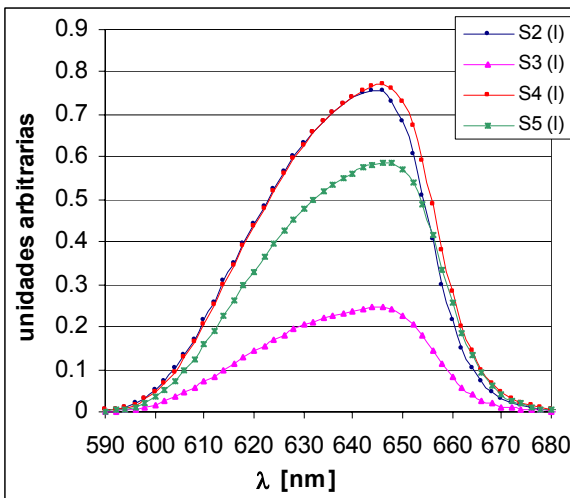
LED #	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
1	646	631.9	52
2	644	631.6	52
3	642	630.5	50
Promedio	644	631.33	51.3

Tabla 3.4.3. Resultados para el modelo SMF-HM1530SRD-509, con iluminación difusa.

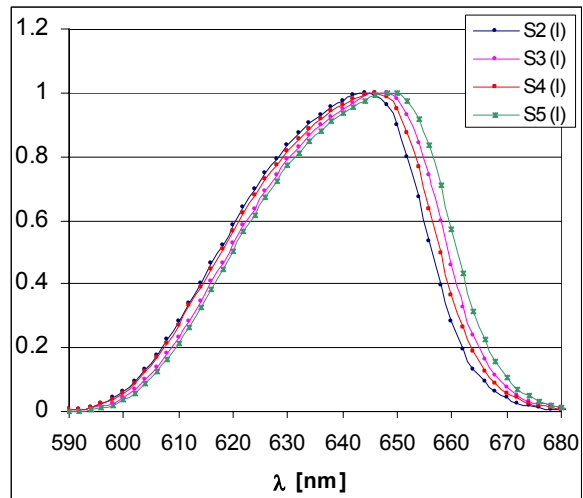
La diferencia máxima de la responsividad “absoluta”, $s_{max} = s(\lambda_p)$, en la longitud de onda pico, λ_p , es alrededor del 15% y la longitud de onda pico difiere 4nm entre mediciones, teniendo como promedio $\lambda_p = 644\text{nm}$. En la longitud de onda dominante se tiene que la diferencia es de 1.4nm, con un promedio para $\lambda_D = 631.3\text{nm}$. También se encuentra que la diferencia en el ancho de banda espectral es de solo 2nm, obteniendo como promedio, $\Delta\lambda = 51.3\text{nm}$. Por tanto podemos decir que no se encontraron diferencias significativas en la responsividad espectral relativa de LEDs del mismo modelo.

(B) HLMP-D101.

En las gráficas 3.4.3 y 3.4.4 se muestra la responsividad espectral “absoluta” y la responsividad espectral relativa, respectivamente, para los cuatro LEDs de este modelo.



Gráfica 3.4.3. Responsividad “absoluta” para el modelo HLMP-D101, con iluminación difusa.



Gráfica 3.4.4. Responsividad relativa para el modelo HLMP-D101, con iluminación difusa.

En la tabla 3.4.4 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

LED #	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
2	644	636.2	38
3	644	636.7	40
4	646	637.2	40
5	646	637.9	40
Promedio	645	637.0	39.5

Tabla 3.4.4. Resultados para el modelo HLMP-D101, con iluminación difusa.

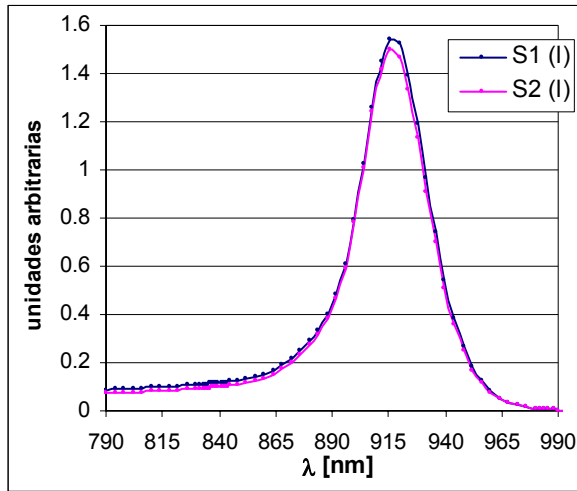
De la gráfica 3.4.3, comparando la responsividad “absoluta” en la longitud de onda pico del LED # 3 con la del LED #4 se obtiene una diferencia de casi el 70%. Se sospecha que el LED # 3 esta defectuoso, no solo por los resultados mostrados en esta gráfica, sino porque además a este LED se le habían realizado pruebas en su respuesta térmica y un sobrecalentamiento afecto su funcionamiento. En el caso del LED #5 se encontró una diferencia de casi 30% en la responsividad máxima con respecto a los LEDs #2 y #4.

Al comparar la responsividad espectral relativa se encuentra, gráfica 3.4.4, que las diferencias entre los 4 LEDs es pequeña, para la longitud de onda pico, λ_p , es de 2nm, teniendo como promedio $\lambda_p = 645\text{nm}$. En la longitud de onda dominante se tiene que la diferencia es de 1.8nm, con un promedio para $\lambda_D = 637.0\text{nm}$. También se encuentra que la diferencia en el ancho de banda espectral es solo 2nm, obteniendo como promedio, $\Delta\lambda=39.5\text{nm}$.

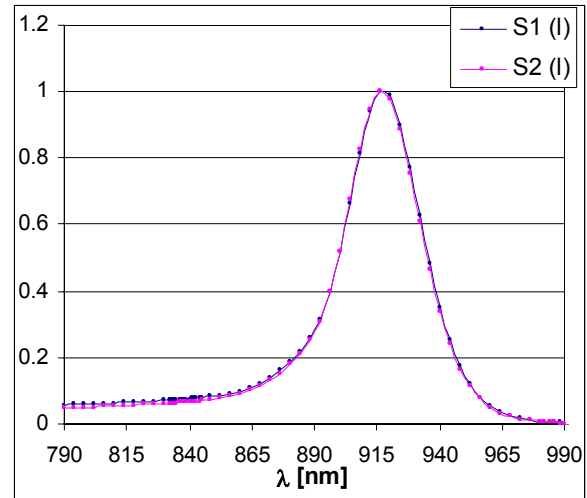
Cabe señalar que aún teniendo grandes diferencias en la responsividad “absoluta” en el caso del LED #3, la forma de la respuesta espectral se mantuvo, es decir no hubo grandes diferencias en la responsividad relativa.

(C) CQX15 F240.

En las gráficas 3.4.5 y 3.4.6 se muestra la responsividad espectral “absoluta” y la responsividad espectral relativa, respectivamente, para los dos LEDs de este modelo. Estos LEDs detectan en el cercano infrarrojo.



Gráfica 3.4.5. Responsividad “absoluta” para el modelo CQX15 F240, con iluminación difusa.



Gráfica 3.4.6. Responsividad relativa para el modelo CQX15 F240, con iluminación difusa.

En la tabla 3.4.4 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

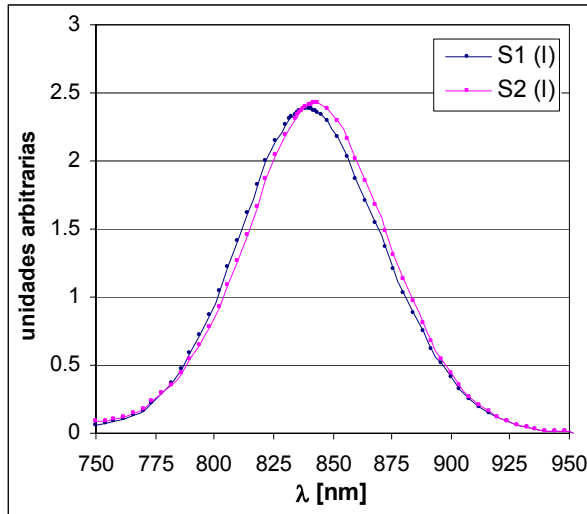
LED #	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
1	916	860.1	36
2	916	870.7	36
Promedio	916	865.4	36

Tabla 3.4.4. Resultados para el modelo CQX15 F240, con iluminación difusa.

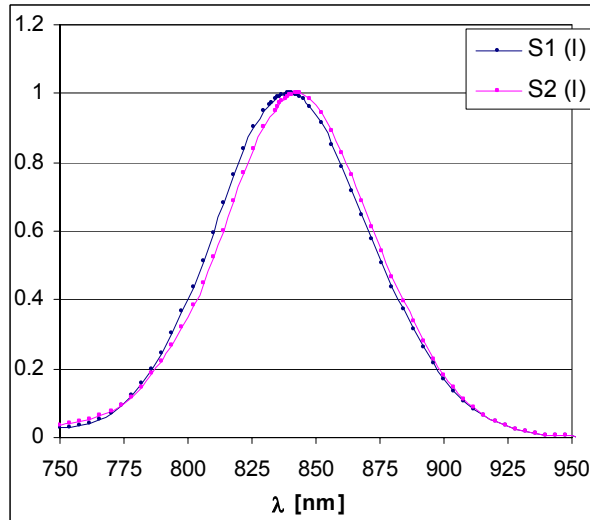
De la gráfica 3.4.5 podemos observar que la diferencia entre ambos LEDs es muy pequeña alrededor del 3% en el máximo de la responsividad, y en la gráfica 3.4.6 observamos que en la longitud de onda pico, λ_p , no hay diferencias entre ambos LEDs, obteniendo como promedio $\lambda_p = 916\text{nm}$. En la longitud de onda dominante si se tiene una diferencia apreciable de 10.6nm , con un promedio para $\lambda_D = 865.4\text{nm}$. Se encuentra también que no hay diferencia en el ancho de banda espectral, obteniendo como promedio, $\Delta\lambda = 36\text{nm}$. Por tanto podemos decir que no se encontraron diferencias en la responsividad espectral relativa. Cabe señalar que la diferencia encontrada en la longitud de onda dominante se debe básicamente a que existe una sensibilidad del LED para longitudes de ondas que van desde los 400nm hasta los 850nm (en la gráfica no se muestra todo este intervalo). Esto se debe a que aún cuando la sensibilidad es pequeña en este intervalo, éste es muy grande. Para hacer la comparación se aproximó el área mediante triángulos; el área bajo la curva de $s_{rel}(\lambda)$ para ambos LEDs en la región comprendida entre los 850nm y 990nm es, aproximadamente, de 45 unidades cuadradas, y para la región comprendida entre los 400nm y 850nm para el LED #1 es de 16 unidades cuadradas (26% del área total) y para el LED #2 es de 11.5 unidades cuadradas (20% del área total), por lo cual podemos decir que la región comprendida entre los 400nm a los 850nm tiene un efecto significativo en la longitud de onda dominante.

(D) F5E1 F348.

En las gráficas 3.4.7 y 3.4.8 se muestra la responsividad espectral “absoluta” y la responsividad espectral relativa, respectivamente, para los dos LEDs de este modelo. Estos LEDs detectan en el cercano infrarrojo.



Gráfica 3.4.7. Responsividad “absoluta” para el modelo F5E1 F348, con iluminación difusa.



Gráfica 3.4.8. Responsividad relativa para el modelo F5E1 F348, con iluminación difusa.

En la tabla 3.4.5 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

LED #	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
1	840	835.4	70
2	843	828.3	66
Promedio	841.5	831.85	68

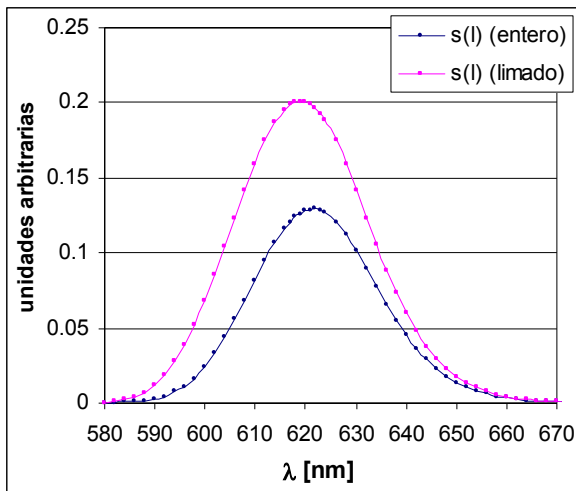
Tabla 3.4.5. Resultados para el modelo F5E1 F348, con iluminación difusa.

De la gráfica 3.4.7 podemos observar que la diferencia entre ambos LEDs es muy pequeña, alrededor del 2% en el máximo de la responsividad, y en la gráfica 3.4.8 observamos que para la longitud de onda pico, λ_p , la diferencia es de 3nm, teniendo como promedio $\lambda_p = 841.5\text{nm}$. En la longitud de onda dominante se tiene que la diferencia es de 7nm, con un promedio para $\lambda_D = 831.85\text{nm}$. También

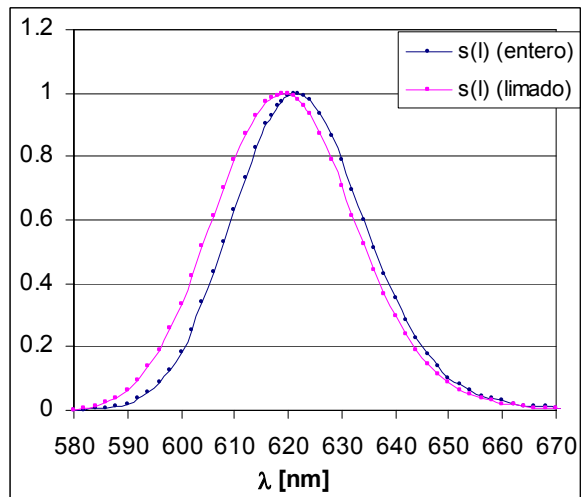
se encuentra que la diferencia en el ancho de banda espectral es solo de 4nm, obteniendo como promedio, $\Delta\lambda = 68\text{nm}$. Por tanto podemos decir que no se encontraron diferencias significativas en la responsividad espectral relativa, salvo el pequeño corrimiento de 4nm. Como en el caso anterior la diferencia entre la longitud de onda dominante y la longitud de onda pico, se debe a que existe una sensibilidad del LED en el intervalo que va desde los 400nm hasta los 775nm (no mostrado en la gráfica), pero a diferencia del caso anterior la contribución es mucho menor. El área bajo la curva de $s_{rel}(\lambda)$ para ambos LEDs en la región comprendida entre los 775nm y 950nm es, aproximadamente, de 75 unidades cuadradas, y para la región comprendida entre los 400nm y 775nm para el LED #1 es de 2.7 unidades cuadradas (3.5% del área total) y para el LED #2 es de 6.6 unidades cuadradas (8.1% del área total), por lo que podemos decir que en este LED el efecto en la longitud de onda dominante es menor que en el caso del LED C. Por este motivo este LED modelo F5E1 F348 se seleccionó en la construcción del instrumento para medir el índice de diferencial de vegetación normalizada.

(E₁, E₂) CMD-5752 (entero y limado).

En esta sección se analizó la responsividad espectral para un LED que emite en el visible (635nm) y que tiene la configuración de la figura 1.1.1 con el objeto de analizar el efecto en la responsividad si se quita la parte del encapsulado esférico, dejándola plana, como se muestra en la tabla 3.1.2 (E₂). Nos referiremos a este LED plano como limado. En las gráficas 3.4.9 y 3.4.10 se muestra la responsividad espectral “absoluta” y la responsividad espectral relativa, respectivamente, para el LED entero y para el limado.



Gráfica 3.4.9. Responsividad “absoluta” para el modelo CMD-5752 (entero y limado), con iluminación difusa.



Gráfica 3.4.10. Responsividad relativa para el modelo CMD-5752 (entero y limado), con iluminación difusa.

En la tabla 3.4.6 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

LED #	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
Entero	622	623.6	28
Limado	619	618.7	30
Promedio	620.5	621.1	29

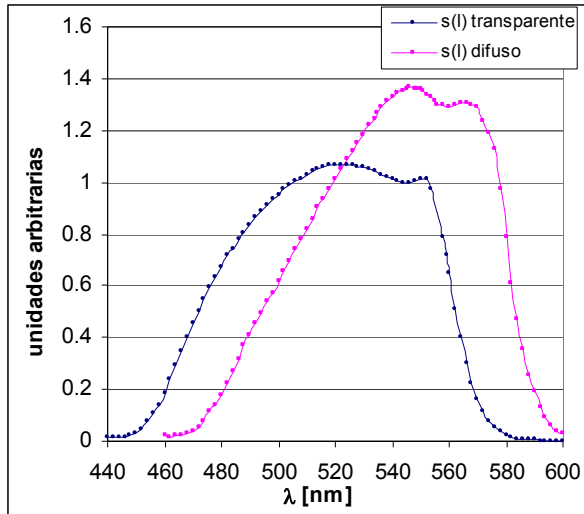
Tabla 3.4.6. Resultados para el modelo CMD-5752 (entero y limado), con iluminación difusa.

De la gráfica 3.4.9 podemos observar que hay diferencia en la reponsividad de los LEDs, alrededor del 36% en el máximo de la reponsividad, y en la gráfica 3.4.10 observamos que para la longitud de onda pico, λ_p , la diferencia es de 3nm, teniendo como promedio $\lambda_p = 620.5\text{nm}$. En la longitud de onda dominante se tiene que la diferencia es de 4.85nm, con un promedio para $\lambda_D = 621.1\text{nm}$. La diferencia en el ancho de banda espectral es solo de 2nm, obteniendo como promedio, $\Delta\lambda = 29\text{nm}$. Por tanto las diferencias en la reponsividad espectral relativa es de alrededor de 3nm.

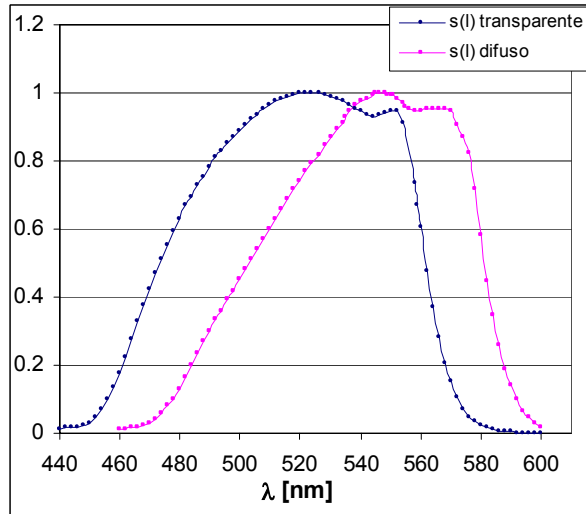
Cabe señalar que la diferencia encontrada en el máximo de la reponsividad “absoluta” se debe a la diferencias en la geometría del recubrimiento que tiene estos LEDs.

(F, G) LED verde transparente y difuso.

En las gráficas 3.4.11 y 3.4.12 se muestra la reponsividad espectral “absoluta” y la reponsividad espectral relativa, respectivamente, para el LED verde transparente y para el verde difuso.



Gráfica 3.4.11. Responsividad “absoluta” para el LED verde transparente y difuso, con iluminación difusa.



Gráfica 3.4.12. Responsividad relativa para el LED verde transparente y difuso, con iluminación difusa.

En la tabla 3.4.7 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

LED #	λ_p^1 [nm]	λ_p^2 [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
Transparente	524	550	518.29	88
Difuso	546	568	540	78

Tabla 3.4.7. Resultados para el LED verde transparente y difuso, con iluminación difusa.

Aquí no se podría hablar de una comparación como tal, puesto que solo se sabe que ambos LEDs emiten luz de color verde y que en un caso el recubrimiento es transparente y en el otro es difuso. Pero aún así se ve en la forma de la gráfica que existen ciertas similitudes, como el que ambos tienen dos longitudes de onda pico.

3.5 Iluminación directa.

Se caracterizó la responsividad espectral absoluta en iluminación directa a distintas temperaturas a los LEDs: A, B, C, D, E₁, E₂ y F. En la tabla 3.5.1 se muestran las temperaturas a las que fueron caracterizados cada tipo de LED.

	Modelo LED.	Temperatura (°C)
A	SMF-HM1530SRD-509	19
		21
		21
		22
		35
		42
		43
		57
		69
	75	
B	HLMP-D101	19
		36
		45
		53
		60
		69
		75
C	CQX15 F240	19
		35
		53
D	F5E1 F348	20
		30
		52
E ₁	CMD-5752 <i>entero</i>	19
E ₂	CMD-5752 <i>limado</i>	19
F	LED verde <i>T</i>	19
		36
		51

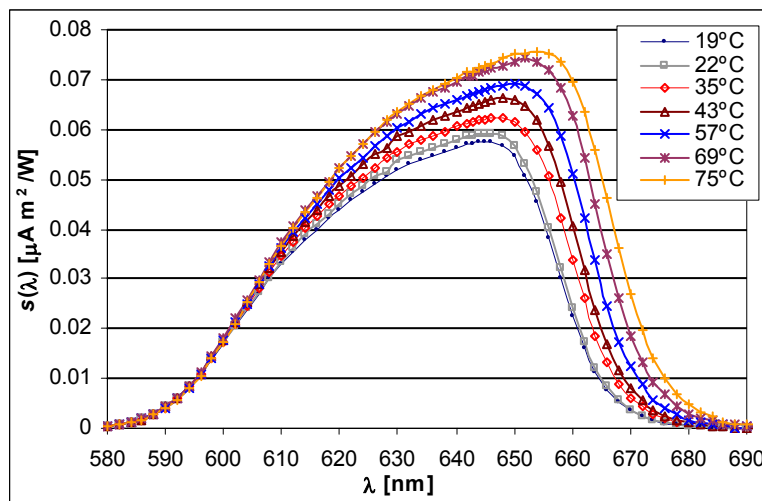
Tabla 3.5.1. Temperatura a la cual fueron caracterizados cada tipo de LED.

Los LEDs modelo CMD-5752 (E₁, E₂) solo se caracterizaron a una temperatura de 19°C puesto que se quiere observar como afecta la geometría del

recubrimiento de estos en la responsividad espectral bajo estas condiciones de iluminación.

(A) SMF-HM1530SRD-509.

En la gráfica 3.5.1 se muestra la responsividad espectral absoluta para las distintas temperaturas de este tipo de LED.



Gráfica 3.5.1. Responsividad espectral absoluta para el modelo SMF-HM1530SRD-509, en iluminación directa, a diferentes temperaturas.

En la tabla 3.5.2 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

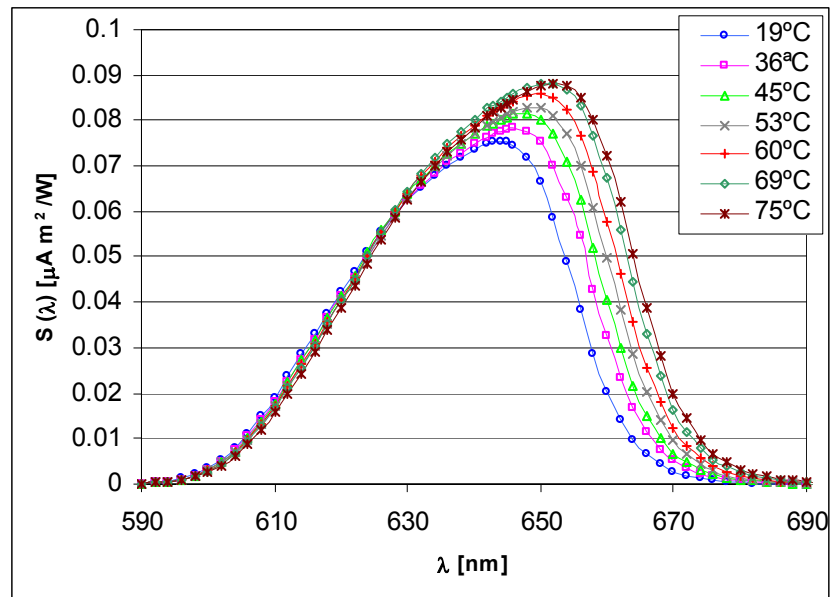
Temperatura [°C]	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
19	646	632.44	50
21	646	632.58	50
21	646	632.63	50
22	646	632.66	50
35	648	633.92	52
42	648	634.87	54
43	648	634.77	54
57	650	636.07	54
69	652	637.39	56
75	654	638.78	58

Tabla 3.5.2. Resultados para el modelo SMF-HM1530SRD-509, con iluminación directa, a diferentes temperaturas.

De la gráfica 3.5.1 se observa un aumento de la responsividad al aumentar la temperatura. La longitud de onda pico sufre un corrimiento hacia longitudes de onda mayores al incrementar la temperatura, también se observa que el ancho de banda espectral crece, en la primera mitad de la “rama de pendiente positiva” (la región que va de los 580nm a los 600nm) no hay diferencias y a partir de los 600nm hacia longitudes de onda mayores si hay un incremento en la responsividad espectral. Este comportamiento es típico de los fotodiodos de silicio.

(B) HLMP-D101.

En la gráfica 3.5.2 se muestra la responsividad espectral absoluta para las distintas temperaturas de este tipo de LED.



Gráfica 3.5.2. Responsividad espectral absoluta para el modelo HLMP-D101, en iluminación directa, a diferentes temperaturas.

En la tabla 3.5.3 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

Temperatura [°C]	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
19	644	636.52	38
36	646	638.32	38
45	648	639.21	40
53	648	640.27	42
60	650	641.07	40
69	652	642.06	42
75	652	642.87	44

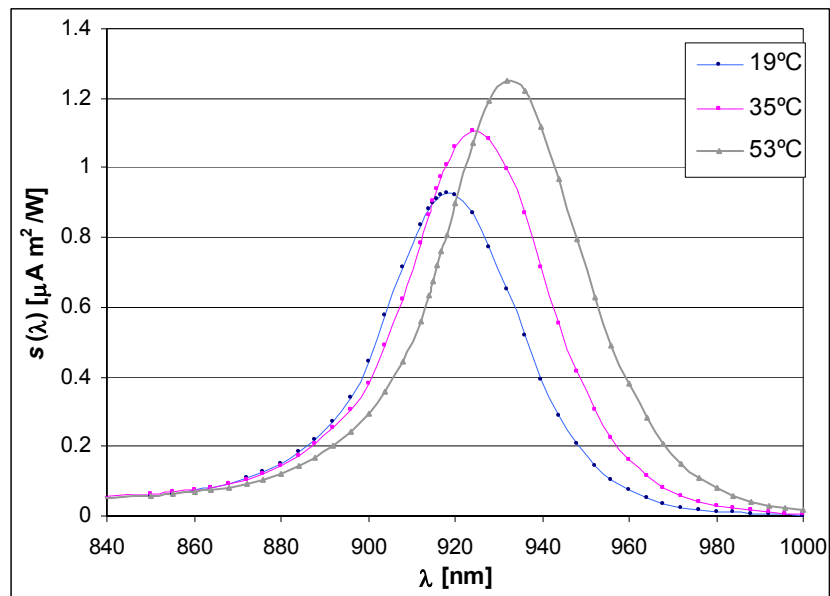
Tabla 3.5.3. Resultados para el modelo HLMP-D101, con iluminación directa, a diferentes temperaturas.

De la gráfica 3.5.2 se observa un aumento de la responsividad al aumentar la temperatura. La longitud de onda pico sufre corrimientos hacia longitudes de

onda mayores al incrementar la temperatura, también se observa que el ancho de banda espectral crece, ensanchándose hacia longitudes de onda mayores, se observa que la primera mitad de la “rama de pendiente positiva” (la región que va de los 590nm a los 630nm) hay una diferencia, y es que se recorre un poco hacia longitudes de onda mayores, del orden de 2nm entre la responsividad a 20°C y la de 75°C. O bien se puede ver que en esta zona la responsividad sufre un decremento de no más del 8% para esta región. A partir de los 630nm hacia longitudes de onda mayores si hay un incremento en la responsividad espectral.

(C) CQX15 F240.

En la gráfica 3.5.3 se muestra la responsividad espectral absoluta para las distintas temperaturas de este tipo de LED.



Gráfica 3.5.3. Responsividad espectral absoluta para el modelo CQX15 F240, en iluminación directa, a diferentes temperaturas.

En la tabla 3.5.4 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

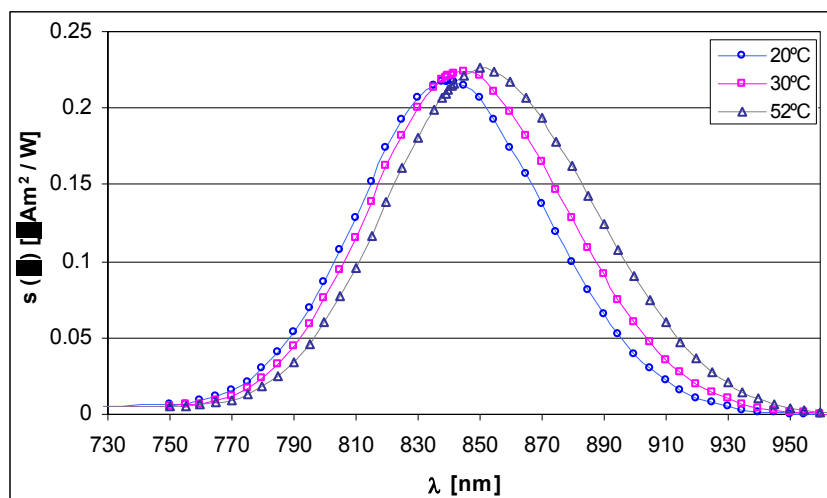
Temperatura [°C]	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
19	918	888.64	36
35	924	898.69	36
53	932	907.39	38

Tabla 3.5.4. Resultados para el modelo CQX15 F249, con iluminación directa, a diferentes temperaturas.

De la gráfica 3.5.3, se observa que al incrementar la temperatura la responsividad espectral se recorre hacia longitudes de onda mayores, incrementándose notablemente la sensibilidad del LED y también el ancho de banda espectral. En la región comprendida de los 400nm a los 860nm no hay diferencias al incrementar la temperatura. Las diferencias encontradas entre la responsividad medida a 19°C y la responsividad a 53°C son: en la rama con pendiente positiva se nota un corrimiento de alrededor de 8nm hacia longitudes de onda mayores y en la rama con pendiente negativa se encuentra un corrimiento de alrededor de 20nm hacia longitudes de onda mayores. El corrimiento que hay en la longitud de onda pico es de 14nm. El ancho de banda se incrementa en 2nm.

(D) F5E1 F348.

En la gráfica 3.5.4 se muestra la responsividad espectral absoluta para las distintas temperaturas de este tipo de LED.



Gráfica 3.5.4. Responsividad espectral absoluta para el modelo F5E1 F348, en iluminación directa, a diferentes temperaturas.

En la tabla 3.5.5 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

Temperatura [°C]	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
20	840	835.33	70
30	845	841.49	75
52	850	848.65	80

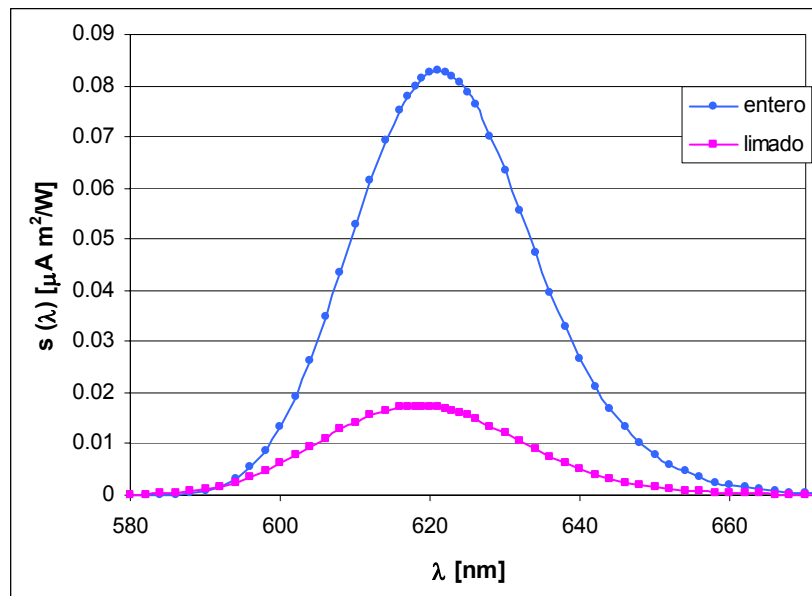
Tabla 3.5.5. Resultados para el modelo F5E1 F348, con iluminación directa, a diferentes temperaturas.

De la gráfica 3.5.4, se observa que al incrementar la temperatura la responsividad espectral se recorre hacia longitudes de onda mayores, incrementándose notablemente el ancho de banda espectral. No así la sensibilidad del LED la cual aumenta alrededor del 4% en las longitudes de onda pico, para las temperaturas extremas. En la región comprendida de los 400nm a

los 750nm no hay diferencias al incrementar la temperatura (no mostrado en la gráfica). A partir de los 750nm hacia longitudes de onda mayores, las diferencias encontradas entre la responsividad espectral medida a 20°C y la responsividad a 52°C son: en la rama con pendiente positiva se nota un corrimiento de alrededor de 10nm hacia longitudes de onda mayores y la rama con pendiente negativa muestra un corrimiento de alrededor de 15nm hacia longitudes de onda mayores. El corrimiento que hay en la longitud de onda pico es de 10nm. El ancho de banda se incrementa en 10nm.

(E₁, E₂) CMD-5752 (entero y limado).

En la gráfica 3.5.5 se muestra la responsividad espectral absoluta para los dos LEDs CMD-5752 a temperatura ambiente (19°C).



Gráfica 3.5.5. Responsividad espectral absoluta para los LEDs CMD-5752, en iluminación directa, a una temperatura de 19°C.

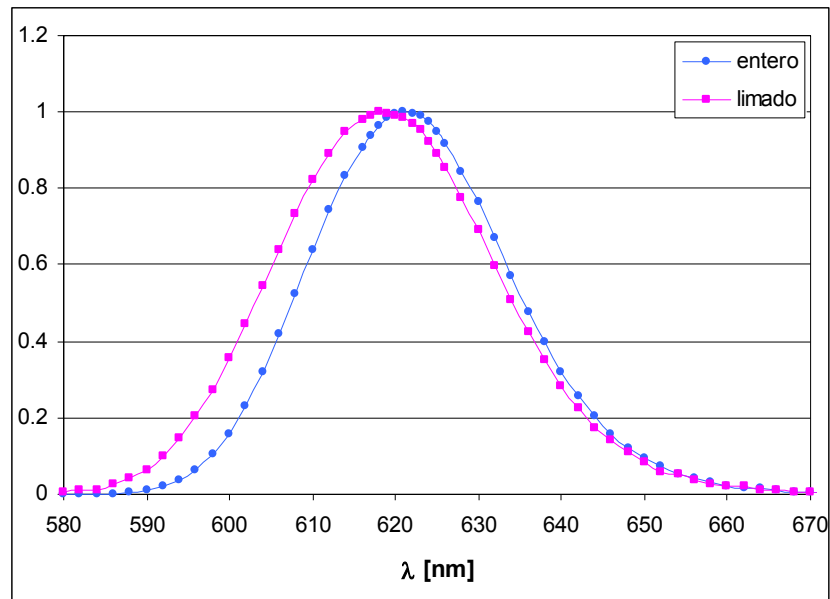
En la tabla 3.5.5 se muestran los resultados obtenidos para una temperatura de 19°C, para: la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

LED	λ_p [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
Entero	621	622.7	28
Limado	618	619.7	30

Tabla 3.5.6. Resultados para los LEDs modelo CMD-5752, con iluminación directa, a una temperatura de 19°C.

De la gráfica 3.5.5 se observa que se modifica la sensibilidad del LED por el hecho de alterar la geometría del encapsulado del LED. La responsividad espectral absoluta del LED limado disminuye en comparación con la del LED entero, contrario a los resultados obtenidos bajo iluminación difusa (ver gráfica 3.4.9). Los fenómenos de esparcimiento y refracción que sufre la luz al incidir en el encapsulado determinan la cantidad de luz que incide en el semiconductor. En el caso del LED entero y transparente es el fenómeno de refracción el que contribuye de manera más importante en la respuesta del LED. En el caso del LED limado es el fenómeno de esparcimiento el que contribuye de manera más importante en su respuesta. La respuesta del LED se ve afectada por el tipo de iluminación que incide en este.

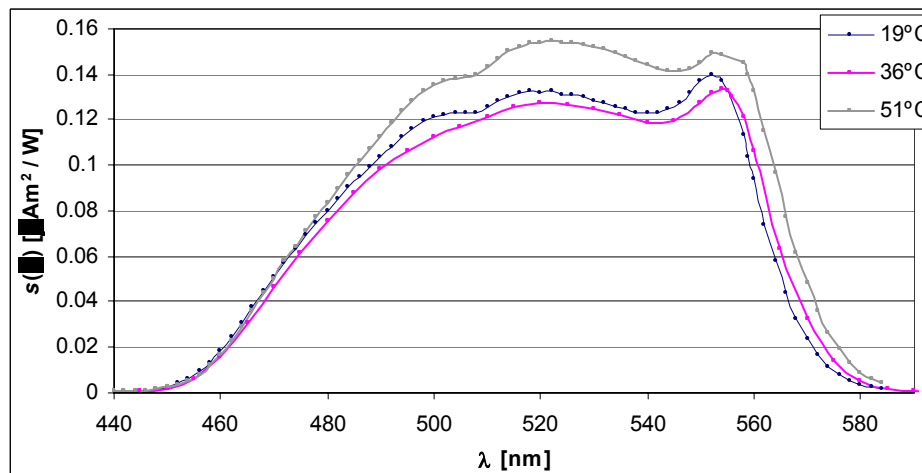
Tanto en la longitud de onda pico como en la dominante hay una diferencia de 3nm entre el limado y el entero. En la gráfica 3.5.6 podemos observar que en el caso del LED limado hay un ensanchamiento hacia longitudes de onda cortas de 5nm debido a que hay menor absorción en el encapsulado, al haber retirado parte de éste.



Gráfica 3.5.5 Comparación de la responsividad espectral relativa para los LEDs CMD-5752 entero y limado, en iluminación directa, a una temperatura de 19°C.

(F) LED verde T.

En la gráfica 3.5.7 se muestra la responsividad espectral absoluta para las distintas temperaturas de este tipo de LED.



Gráfica 3.5.7. Responsividad espectral absoluta para el LED verde T, en iluminación directa, a diferentes temperaturas.

En la tabla 3.5.5 se muestran los resultados obtenidos para la longitud de onda pico (λ_p), la longitud de onda dominante (λ_D) y el ancho de banda espectral ($\Delta\lambda$).

Temperatura [°C]	λ_p^1 [nm]	λ_p^2 [nm]	λ_D [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
19	518	552	519.22	84
36	520	554	520.56	88
51	522	552	521.72	88

Tabla 3.5.7. Resultados para el LED verde T, con iluminación directa, a diferentes temperaturas.

De la gráfica 3.5.7, se observa que la responsividad espectral crece con la temperatura. La sensibilidad se incrementa en alrededor de 10% en la zona central y derecha de la gráfica (región comprendida entre los 470nm a los 580nm) comparando las respuestas de los LEDs obtenidas a temperaturas de 19°C y 36°C con la de 51°C. Esto se traduce en tener una sensibilidad mayor y ensanchamiento de banda espectral al aumentar la temperatura. También observamos que la respuesta obtenida para una temperatura de 36°C, disminuyó un poco la sensibilidad, pero se observa que si se tiene un ensanchamiento de banda hacia longitudes de onda mayores del orden de 4nm. La longitud de onda dominante se va recorriendo conforme aumenta la temperatura del orden de 1nm por cada 15°C. La primera longitud de onda pico, λ_p^1 , sufre un corrimiento del orden de 2nm por cada 15°C, y segunda, λ_p^2 , sufre un corrimiento de 2nm al comparar las respuestas medidas a 19°C y a 36°C, y no hubo corrimiento obtenido para esta λ_p^2 al comparar las respuestas medidas a 19°C y a 51°C.

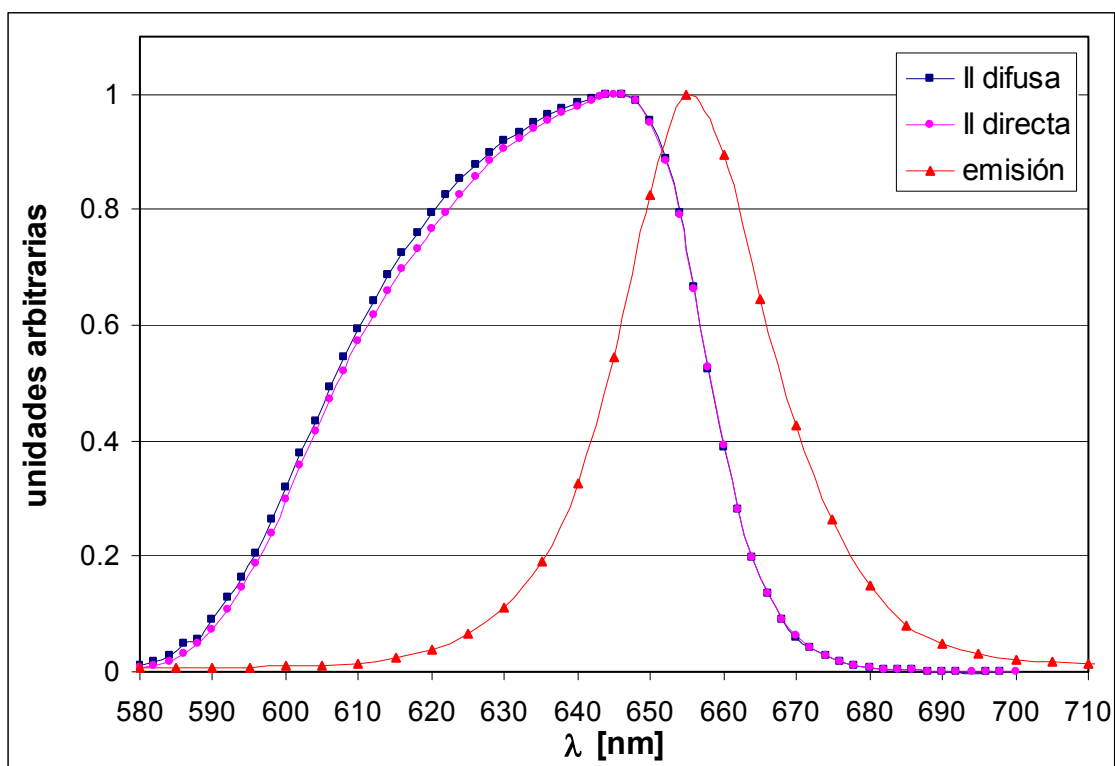
3.6 Comparación entre iluminación directa y difusa.

A continuación se muestra la comparación relativa entre la responsividad espectral para iluminación difusa y directa, En el caso de los LEDs que trabajan en el visible se ha incluido el espectro (radiancia relativa) de emisión, el cual fue

medido con un espectroradiómetro portátil. Para los LEDs del IR no fue posible obtener los espectros de emisión.

(A) SMF-HM1530SRD-509.

En la gráfica 3.6.1 se muestra la responsividad espectral relativa para el LED SMF-HM1530SRD-509 (A) medidas en los diferentes tipos de iluminación, también se incluyó el espectro de emisión del mismo LED, a temperatura ambiente.

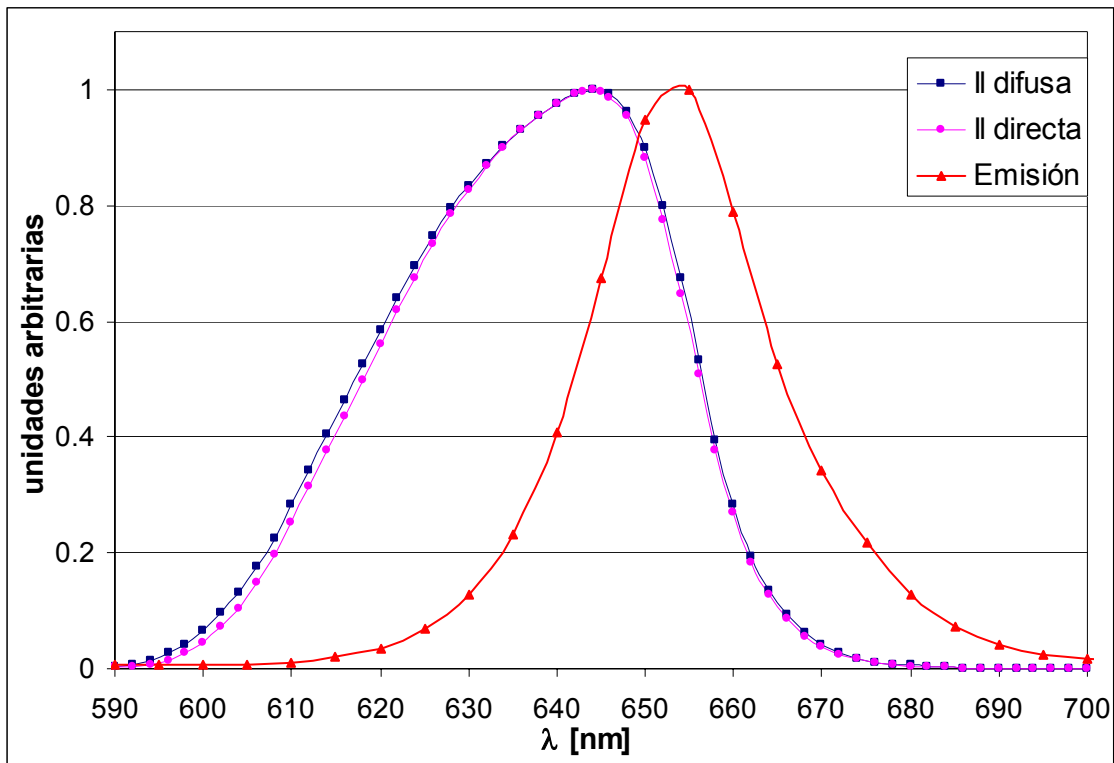


Gráfica 3.6.1. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED SMF-HM1530SRD-509, a temperatura ambiente, se incluye espectro de emisión.

Se muestra que el tipo de iluminación no afecta la forma de la responsividad espectral. Se ve que existe un traslape con el espectro de emisión.

(B) HLMP-D101.

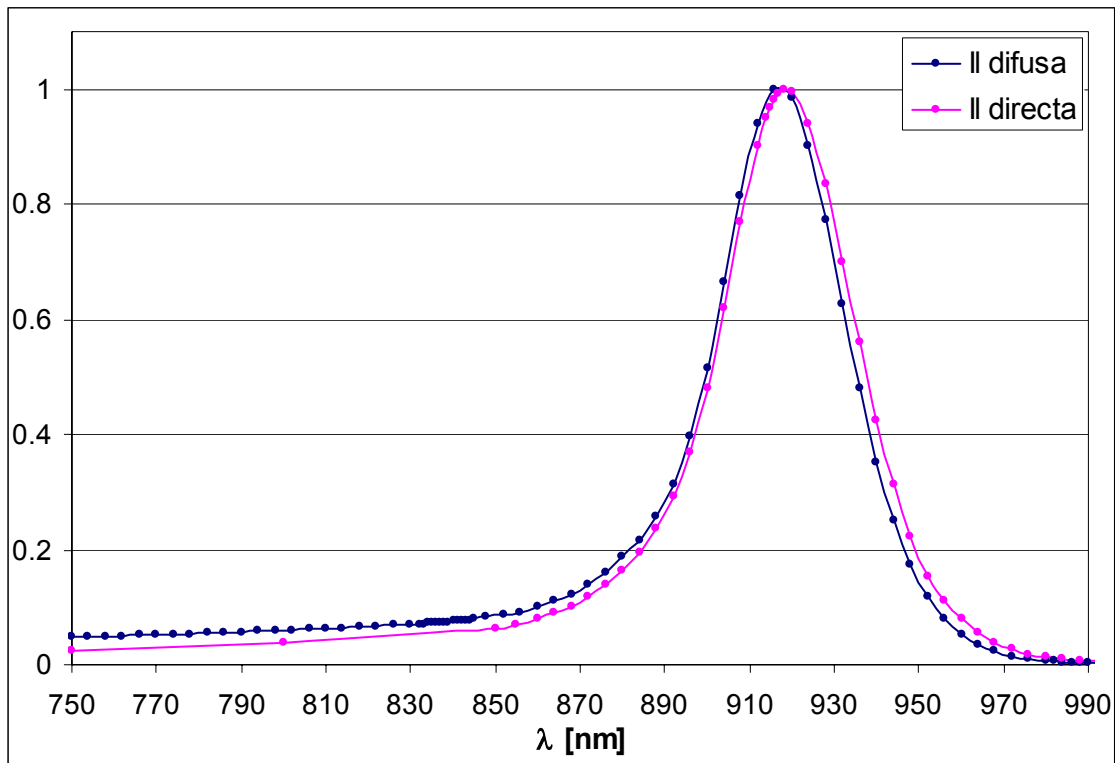
En la gráfica 3.6.2 se muestra la responsividad espectral relativa para el LED HLMP-D101 (B) medidas en los diferentes tipos de iluminación, también se incluyó el espectro de emisión del mismo LED, a temperatura ambiente.



Gráfica 3.6.2. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED HLMP-D101, a temperatura ambiente, se incluye espectro de emisión.

(C) CQX15 F240.

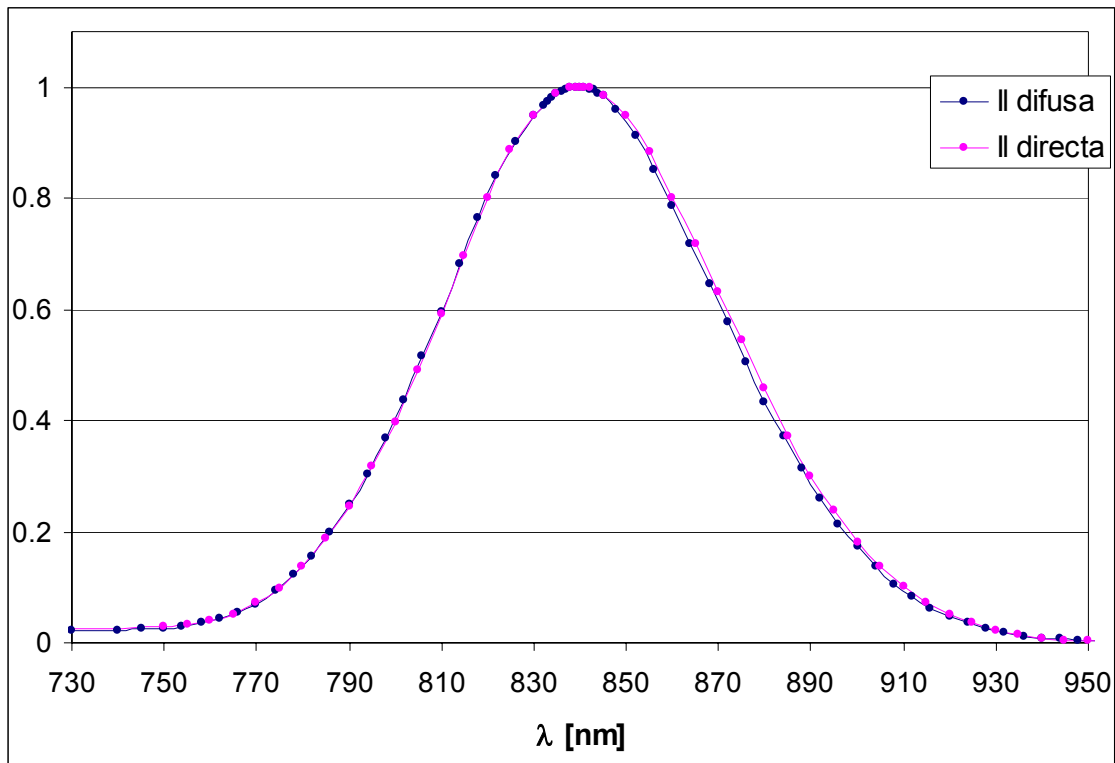
En la gráfica 3.6.3 se muestra la responsividad espectral relativa para el CQX15 F240 (C) medidas en los diferentes tipos de iluminación, a temperatura ambiente.



Gráfica 3.6.3. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED CQX15 F240, a temperatura ambiente, se incluye espectro de emisión.

(D) F5E1 F348.

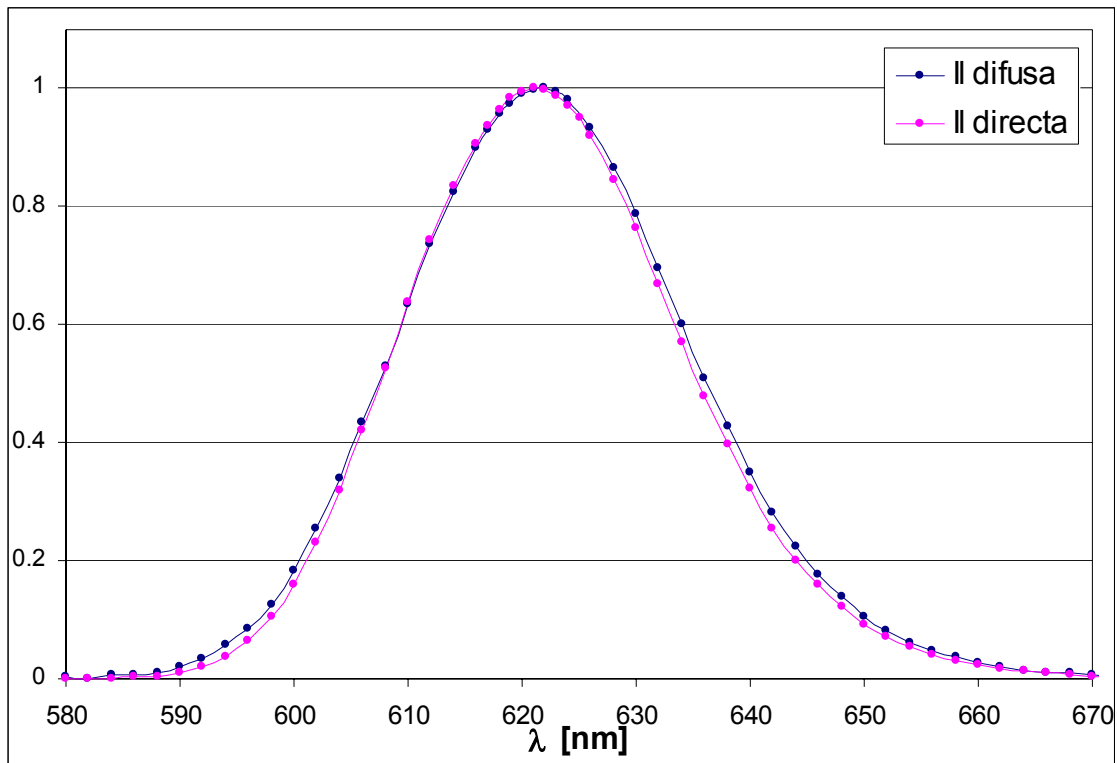
En la gráfica 3.6.4 se muestra la responsividad espectral relativa para el F5E1 F348 (D) medidas en los diferentes tipos de iluminación, a temperatura ambiente.



Gráfica 3.6.4. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED F5E1 F348, a temperatura ambiente.

(E₁) CMD-5752 entero.

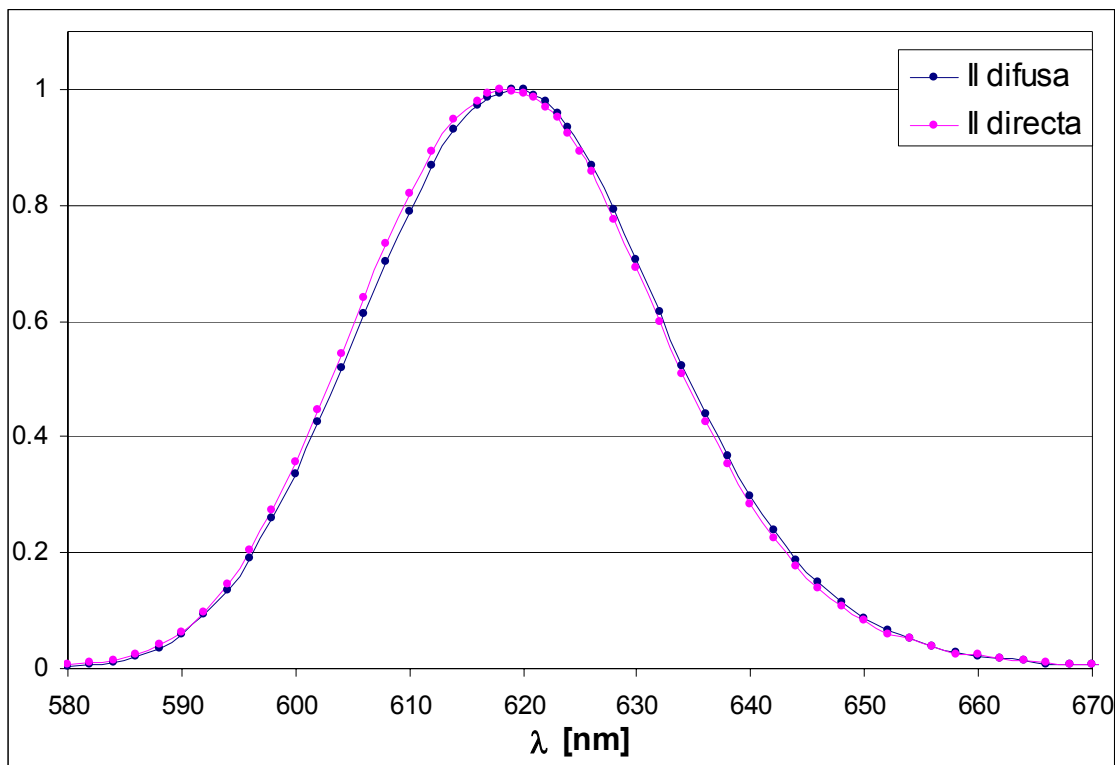
En la gráfica 3.6.5 se muestra la responsividad espectral relativa para el CMD-5752 (E₁) medidas en los diferentes tipos de iluminación, a temperatura ambiente.



Gráfica 3.6.5. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED CMD-5752 entero, a temperatura ambiente.

(E₂) CMD-5752 limado.

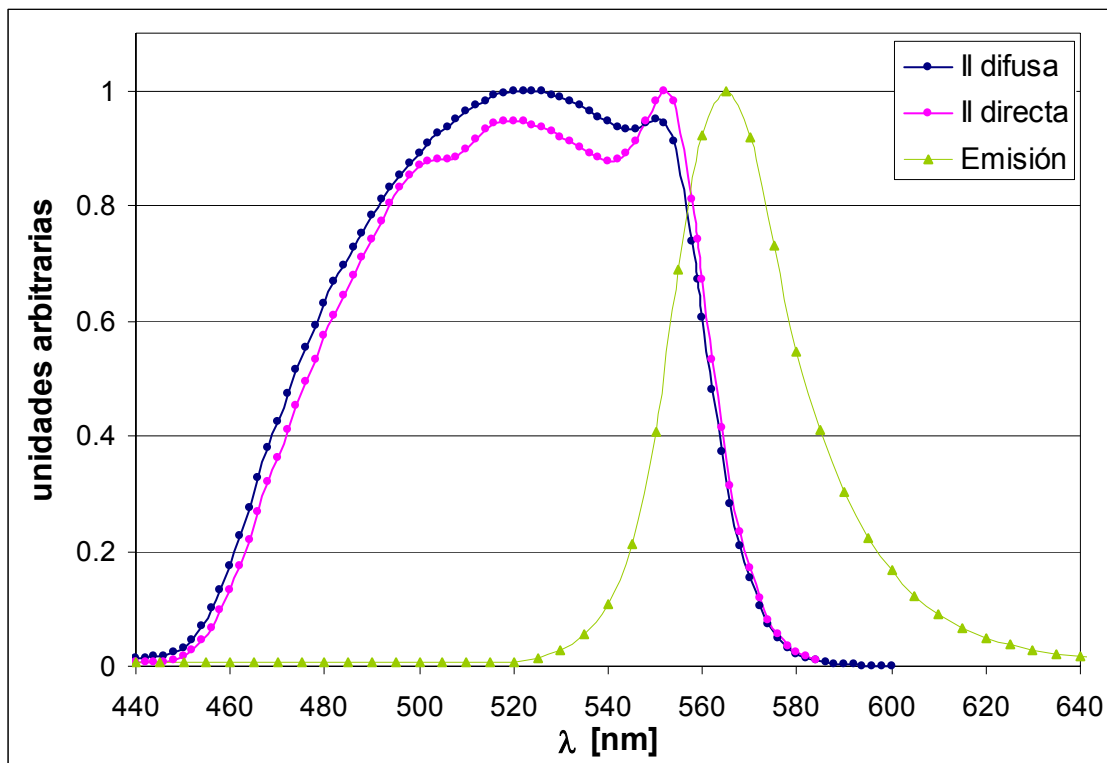
En la gráfica 3.6.6 se muestra la responsividad espectral relativa para el CMD-5752 (E₂) medidas en los diferentes tipos de iluminación, a temperatura ambiente.



Gráfica 3.6.6. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED CMD-5752 limado, a temperatura ambiente.

(F) LED verde T.

En la gráfica 3.6.7 se muestra la responsividad espectral relativa para el LED verde T (F) medidas en los diferentes tipos de iluminación, también se incluyó el espectro de emisión del mismo LED, a temperatura ambiente.



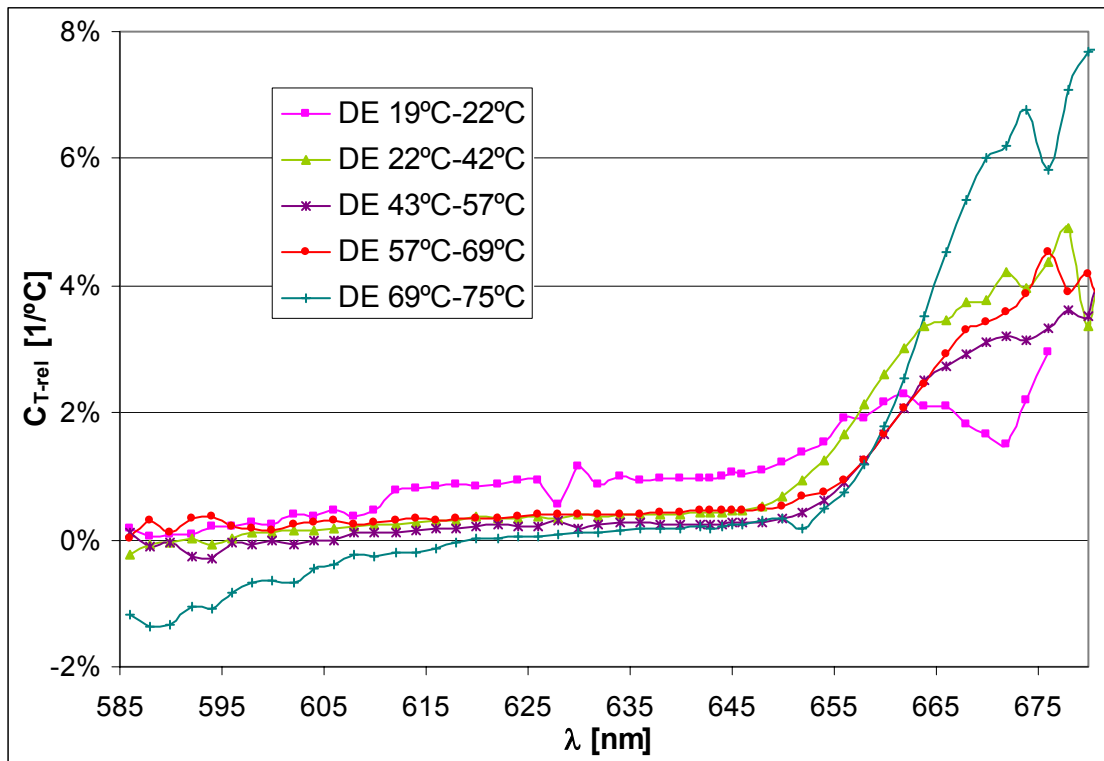
Gráfica 3.6.7. Comparación relativa entre distintos tipos de iluminación (difusa y directa) para el LED verde T, a temperatura ambiente, se incluye espectro de emisión.

3.7 Coeficiente de temperatura relativo.

A continuación se muestra el coeficiente de temperatura relativo para los LEDs A, B, C, D, y F.

(A) SMF-HM1530SRD-509.

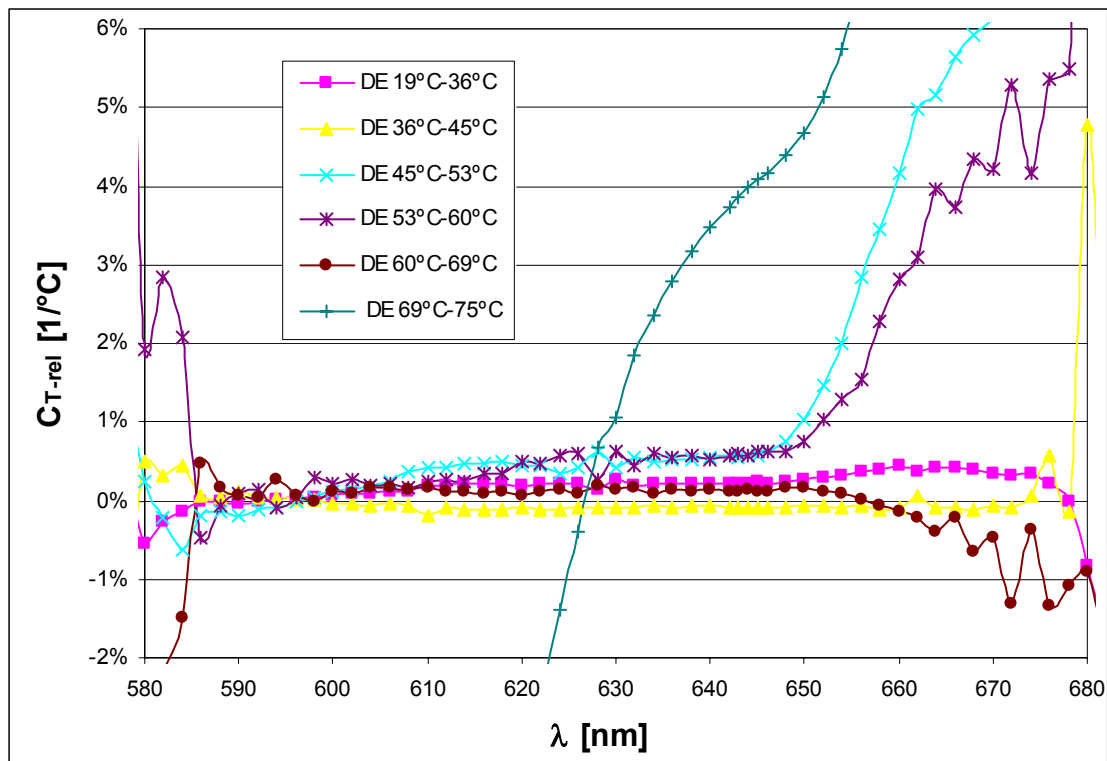
En la gráfica 3.7.1, se muestra el coeficiente de temperatura relativo calculado para distintos intervalos de temperatura para este modelo de LED.



Gráfica 3.7.1. Coeficiente de temperatura relativo para el LED SMF-HM1530SRD-509.

(B) HLMP-D101.

En la gráfica 3.7.2, se muestra el coeficiente de temperatura relativo calculado para distintos intervalos de temperatura para este modelo de LED.

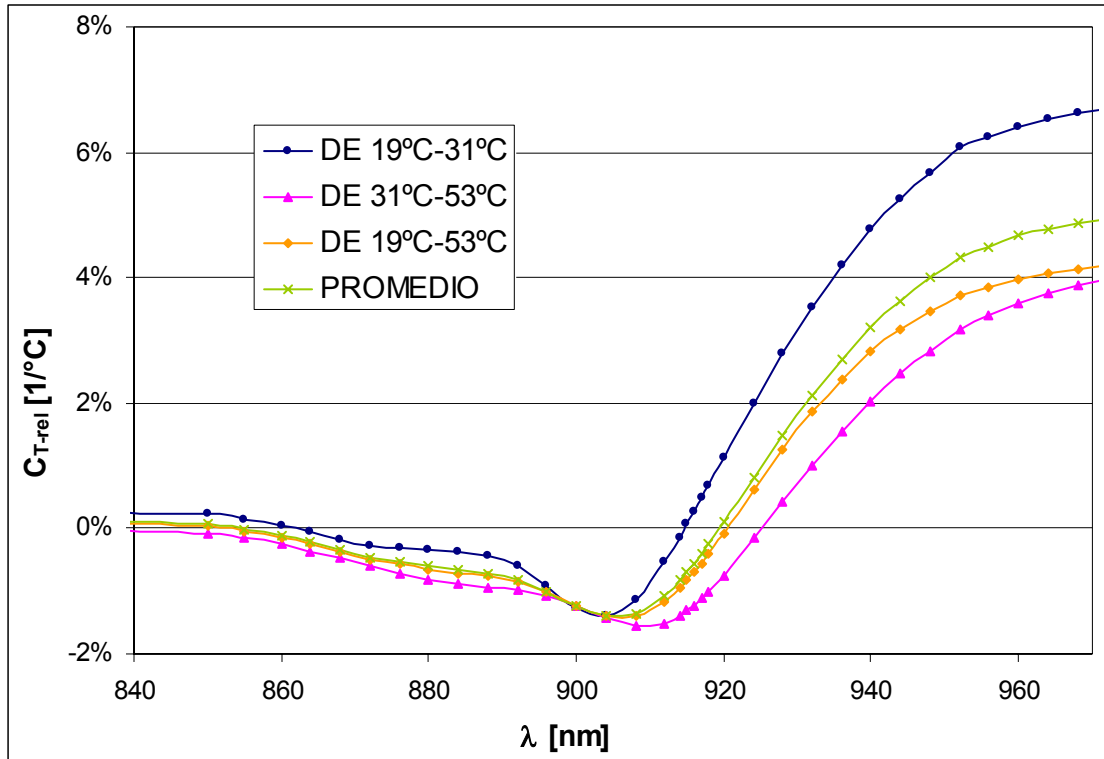


Gráfica 3.7.2. Coeficiente de temperatura relativo para el LED HLMP-D101.

En este caso se ve que para el coeficiente de temperatura relativo calculado para el intervalo de temperatura de 69°C a 75°C tiene un comportamiento diferente a los otros C_{T-rel} la cual se debe a que probablemente se llegó al límite en el cual ya no aumenta la responsividad espectral al aumentar la temperatura y lo que realmente ocurre es que el espectro de detección se recorre hacia longitudes de onda mayores.

(C) CQX15 F240.

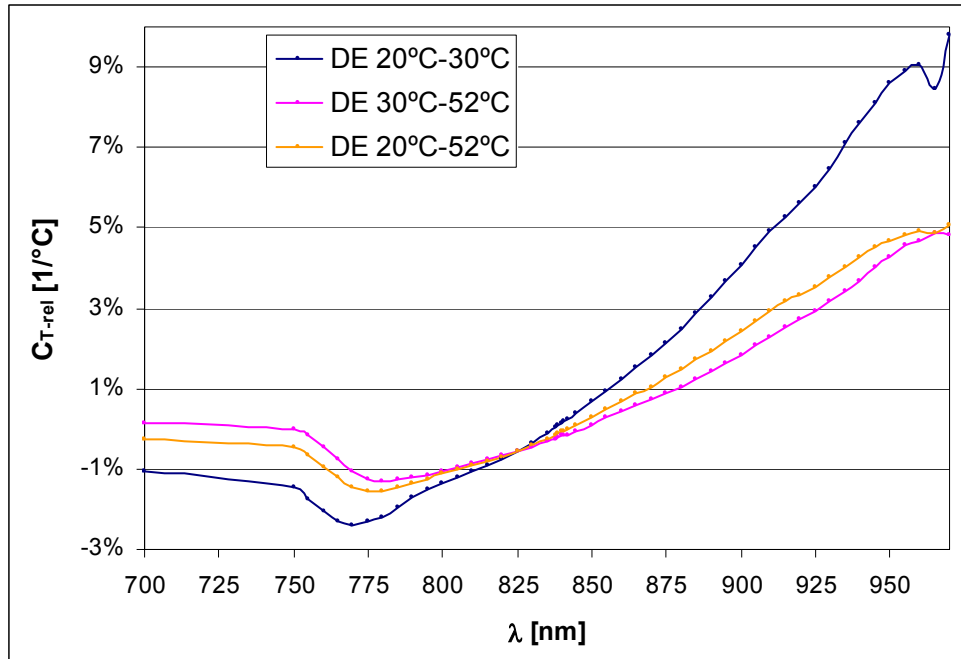
En la gráfica 3.7.3, se muestra el coeficiente de temperatura relativo calculado para distintos intervalos de temperatura para este modelo de LED.



Gráfica 3.7.3. Coeficiente de temperatura relativo para el LED CQX15 F240.

(D) F5E1 F348.

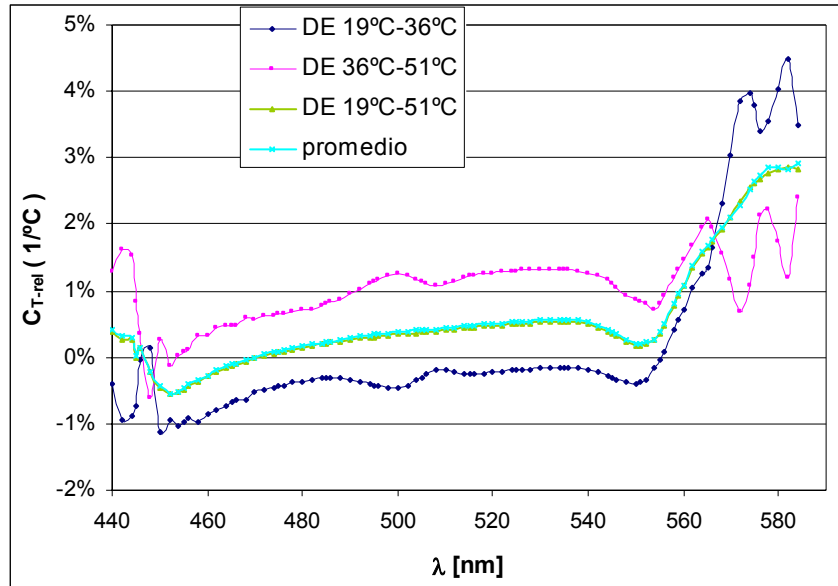
En la gráfica 3.7.4 se muestra el coeficiente de temperatura relativo calculado para distintos intervalos de temperatura para este modelo de LED.



Gráfica 3.7.4. Coeficiente de temperatura relativo para el LED F5E1 F348.

(F) LED verde T.

En la gráfica 3.7.5 se muestra el coeficiente de temperatura relativo calculado para distintos intervalos de temperatura para este modelo de LED.



Gráfica 3.7.5. Coeficiente de temperatura relativo para el LED verde T.

En todos los casos, el coeficiente de temperatura relativo tiene un comportamiento ruidoso a partir de cierta longitud de onda (dependiendo del LED), cercana a la longitud de onda pico de detección, esto se debe a que la señal obtenida para una temperatura menor, en esta parte del espectro es mucho menor que la señal a una temperatura mayor.

3.8 Respuesta integral de los LEDs.

Haciendo uso de las ecuaciones (2.24) y (2.23) para calcular la respuesta integral de los LEDs, se encontró para los distintos LEDs la siguiente respuesta, mostrada en la tabla 3.8.1.

LED	TEMP. (°C)	Esp. solar A_{solar} [μ A]	Esp. plano A_{plano} [μ A]
SMF- HM1530 SRD-509	19	3,991	3,991
	21	4,141	4,141
	22	4,112	4,113
	35	4,446	4,454
	42	4,729	4,743
	43	4,752	4,766
	57	5,094	5,117
	69	5,552	5,588
HLMP D101	75	5,789	5,839
	19	4,019	4,019
	36	4,321	4,331
	45	4,565	4,582
	53	4,727	4,752
	60	4,967	4,999
	69	5,197	5,238
CQX15 F240	75	5,230	5,278
	19	37,464	37,464
	35	41,623	44,559
F5E1 F348	53	43,975	50,425
	20	16,410	16,410
	30	17,192	17,382
CMD-5752 entero	52	18,009	18,382
	19	3,500	2,494
CMD-5752 limado	19	0,812	0,578

Tabla 3.8.1. Resultados la respuesta integral obtenida para los distintos modelos de LEDs.

Capítulo 4.

Conclusiones.

Para poder usar a los LED como detectores lineales hay que tomar en cuenta el tipo de iluminación que les va a llegar, ésta tiene que ser difusa, es decir que llega luz al LED por todas direcciones (como sucede cuando se introduce el LED en el orificio de una esfera integradora) o luz directa, que se refiere a luz casi colimada que llena completamente el encapsulado del LED. Los resultados en la presente tesis muestran la misma responsividad espectral relativa usando cualquiera de estas dos iluminaciones. El que la respuesta del LED sea lineal o no lineal dependiendo del tipo de iluminación es la diferencia más importante entre un LED y un fotodiodo de Silicio pues como mostró Velasco Segura (2003) si el haz llega enfocado en el LED la respuesta de éste será altamente no lineal, y por lo tanto la responsividad espectral no será la que se reporta en la presente tesis.

Otra consideración que hay que tomar en cuenta es que a diferencia de los fotodiodos convencionales no se puede calcular exactamente cuanta luz incide en la unión semiconductor, debido tanto a la geometría de estos como a los materiales del encapsulado, por lo tanto no se puede saber la cantidad de luz que detecta por unidad de área. En consecuencia los LEDs no se pueden calibrar de

manera absoluta. Para muchas aplicaciones, y en particular para el diseño del radiómetro solar autónomo y el sensor para medir el índice diferencial de vegetación normalizado, no es necesario hacer una calibración absoluta (con las mediciones relativas es suficiente.)

Respecto a la forma de la responsividad espectral y su variación con la temperatura, los LEDs muestran un comportamiento muy similar al de los fotodiodos convencionales:

Su responsividad espectral se incrementa con la longitud de onda (“rama de pendiente positiva”) hasta un límite λ_P , después cae rápidamente a cero (“rama de decaimiento”). A diferencia de los fotodiodos convencionales, la responsividad está limitada a un alcance espectral relativamente estrecho, entre los 40 y 80nm. Este truncamiento en la rama de pendiente positiva puede ser una consecuencia de la absorción del encapsulado en este alcance espectral. El alcance espectral estrecho es otra característica que los hace diferentes a los fotodiodos convencionales, y que además es una característica importante en algunas aplicaciones pues no solo realizan la función de detección sino también de filtro espectral.

Pruebas con el LED al cual se le quitó (limando) una parte del encapsulado muestran un ligero ensanchamiento de la responsividad espectral hacia longitudes de onda cortas, lo que respalda esta interpretación.

Este efecto es menos pronunciado para los LEDs del IR - su responsividad no cae a cero como en el caso de los LEDs del visible. La señal que mide el CQX15-F240 a 19°C entre 400nm y 850nm es de 8,4 μ A que es aproximadamente el 22% de la señal total cuando se integra para el espectro solar. Para el F5E1-F348 en IR, la señal entre 400nm y 750nm es de 0,93 μ A que resulta del 6% de la señal total. Es decir, se encontró que en el caso de los LEDs que emiten en el

infrarrojo, la responsividad espectral no cae a cero en un rango estrecho, en cambio se sigue detectando hacia longitud de onda del visible.

Un incremento de la temperatura resulta en un corrimiento al rojo de la rama de decaimiento de la responsividad espectral, mientras la rama de pendiente positiva se ve muy poco afectada (ver gráficas de la sección 3.5). La consecuencia es un corrimiento al rojo de λ_P , un incremento de $s_{max} = s(\lambda_P)$ y un incremento de la responsividad integral, o sea de las señales A_{solar} y A_{plano} . Este comportamiento también se manifiesta en las gráficas de la sección 3.7 que muestran el coeficiente de temperatura relativo.

Los resultados permiten algunas consideraciones del uso de LEDs como detectores en radiómetros:

Muestran una selectividad espectral en el orden de 40nm a 80nm que para muchas aplicaciones resulta apropiada. El hecho de que los LEDs funcionen como filtros espectrales y como detectores es de suma importancia debido a que el costo de un LED es menor al 1% del costo de un fotodiodo y un filtro de interferencia. En particular en radiometría solar, los resultados experimentales obtenidos con fotómetros solares, construidos con filtros de absorción con un ancho de banda medio de 60nm FWHW en el visible y filtros de interferencia de 35nm FWHW en el IR, han sido satisfactorios, [Volz, F.E. (1974)]. Asimismo los fotómetros solares basados en LEDs con anchos de banda medio entre 60nm y 80nm FWHW, han mostrado ser satisfactorios, [Mims, F.M., III. (2001, 1992), Ruiz Mercado, I. (2001)]. Por lo que los LEDs en el visible caracterizados en este trabajo son adecuados para esta aplicación. Para los LEDs en el IR se deberá tener más cuidado ya que el ensanchamiento de la responsividad espectral es más pronunciado que para los LEDs visibles. Por otro lado, las fotocorrientes generadas son suficientemente altas para no presentar problemas en su medición, incluso en aplicaciones de campo. El punto crítico en aplicaciones de campo puede ser la variación de la temperatura ambiental Sin embargo, mediante

correcciones numéricas de las mediciones o mejor aún, una estabilización del radiómetro en temperatura (p. ej. a temperaturas elevadas de 50°C o 60°C) este problema puede ser resuelto sin mayores complicaciones. Por sus características como detectores, filtros espectrales y su bajo precio, los LEDs parecen ser candidatos interesantes para aplicaciones en radiómetros solares.

También pueden ser utilizados para alguna otra aplicación donde se requiera esa selectividad espectral, aunque para los LEDs infrarrojos: LED CQX15 F240 y LED F5E1 F348, sería necesario un filtro de absorción de longitudes de onda menores a 850nm.

La geometría del encapsulado de los LEDs si afecta en la responsividad de los LEDs, como se puede observar en los resultados obtenidos para el LED CMD-5752, el encapsulado absorbe parte de la energía luminosa que incide en el LED.

Para todos los casos, la longitud de onda pico del LED funcionando como detector es menor que la longitud de onda pico del LED funcionando como emisor, así como su ancho de banda espectral, la cual es mayor en funcionando como detector que como emisor.

Referencias

Acharya, Y.B., Byavahare, P.D. (1997). Study on the temperature sensing capability of a light-emitting diode. *Rev. Sci. Instrum.* 68(12), 4465-4467.

Acharya, Y.B., Byavahare, P.D. (1998). Response time of light emitting diode-logarithmic electrometer”, *Rev. Sci. Instr.*, 69(2), 595-598.

Arroyo, C.M.L., Schmid, W.A., Molina, V.J.C., Rosete, A.M., Ruiz Mercado, I. (2004). “Caracterización de la responsividad espectral de LEDs como detectores ópticos en el alcance de 20°C a 75°C”. Memorias del Simposio de Metrología 2004, X Aniversario del Centro Nacional de Metrología, Santiago de Querétaro, Querétaro.

Bass, M. (1995). *Handbook of Optics V1*. 2nd edition. McGraw-Hill, Capítulo 12.

Berry, R.J., Harris, J.E., Williams, R.R., (1997). Light emitting diodes as sensors for colorimetric analyses, *Appl. Spectroscopy*, 51, No. 10, 1521-1524.

Brooks, D.R., Mims, F.M., III. (2001). Development of an inexpensive handheld LED-based sun photometer for the GLOBE program. *J. Geophys. Res.*106(D5), 4733-4740.

d’Almeida, G.A., Kowpke, P. and Shettle, E.P., (1991) “Atmospheric aerosols: global climatology and radiative characteristics”, Deepak, Hampton, Va.

DeCusatis, C. (editor), *Handbook of applied photometry*. American Institute of Physics Press. 1997.

Galindo, I., Bravo, J.L. (1975). On the presence of a volcanic stratospheric dust stratum over a pollute atmosphere: Mexico City. *Geofisica Internacional*. 15(2), 157-167.

Hecht and Zajac, (1974). *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company, U.S.A.

Mims, F.M., III (1992). Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors. *Appl. Opt.* 31(33), 6965-6967.

Miyazaki, et. al. (1998). Using a light-emitting diode as a high-speed, wavelength selective photodetector, *Review of Scientific Instruments* 69 (11), 3751-3754.

Moorthy, K.K. et. al, (1996) "Time evolution of the optical effects and aerosol characteristics of Mt. Pinatubo origin from ground-based observations", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58, No. 10, 1101-1116 .

Reagan, J.A., Piewskie, Scout-Flemming, I.C., Herman, B.J., Ben David, A., (1987) "Extrapolation of Earth-based solar irradiance measurements to exoatmospheric levels for broad-band and selected absorption-band observations", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* GE-25(6), 647-653.

Reid, D.T., et. al. (1997) Light emitting diodes as measurement devices for femtosecond laser pulses, *Optics Letters*, 22, No. 4, 233-235.

Reygadas, R.F. (2003). "Caracterización térmica de LEDs como detectores ópticos y diseño geométrico de radiómetro solar". Reporte de actividades del servicio social de la carrera de Física. Centro de Instrumentos, UNAM.

Rosete-Aguilar, Ruiz-Mercado, I., Reygadas, R.F., Velasco-Segura, R., Trejo, Z., Erantzcani, L. (2003). "Caracterización espectral, angular y térmica de diodos

emisores de luz como detectores ópticos", XLVI Congreso Nacional SMF / XVI Reunión Anual AMO, Mérida, Yucatán, pp. 10V03-1, 10V03-10.

Ruiz Mercado, I. (2001). "Radiómetros solares que usan LEDs como detectores". Reporte de la estancia de investigación realizada en el Optical Sciences Center de la Universidad de Arizona, Junio-Diciembre 2001.

Ruiz Mercado, I. (2003a). "Caracterización de la respuesta angular de diodos emisores de luz utilizados como detectores para radiometría solar". Informe de trabajo del curso de Temas Selectos de Instrumentación Electrónica impartida por la Dra. Martha Rosete Aguilar. Facultad de Ciencias, UNAM.

Ruiz Mercado, I., (2005). "Diseño y construcción de un radiómetro solar autónomo que utilice un arreglo de LEDs como detectores para la medición de aerosoles atmosféricos", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM

Tomasi, C., Caroli, E., Vitale, V. (1983). Study of the relationship between Angström's wavelength exponent and Junge particle size distribution exponent. *J. Climate Appl. Meteorol.* 22, 1707-1716.

Schmid, W. A., Molina-Vázquez, J.C. (2003). "La escala de la responsividad espectral de detectores ópticos realizada en el CENAM", Publicación electrónica de XVII Congreso de Instrumentación de la Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI, Ingeniería Óptica WS1895. México, D.F.

Streetman, Ben G. (1990). Solid State Electronic Devices, Prentice Hall series in solid states physical electronics, U.S.A.

Velasco-Segura, R., Rosete, A.M. (2003). "Mediciones de no-linealidad de diodos emisores de luz que funcionan como detectores ópticos". SOMI XVIII Congreso de Instrumentación, Ing. Óptica, MRA 18169. México, D.F.

Volz, F.E. (1974). Economical multispectral sun photometer for measurements of aerosol extinction from 0.44 μm to 1.6 μm and precipitable water. *Appl. Opt.*, 13(8) 1732-1733.