



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN RADIOMETRO SOLAR
AUTONOMO QUE UTILIZA UN ARREGLO DE LEDs COMO
DETECTORES PARA LA MEDICION DE AEROSOLEs
ATMOSFERICOS”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C A
P R E S E N T A :
I L S E R U I Z M E R C A D O



DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARTHA ROSETE AGUILAR

2005



m. 344773

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
 "Diseño y construcción de un radiómetro solar autónomo que utiliza un
 arreglo de LEDs como detectores para la medición de aerosoles
 atmosféricos"

realizado por Ruiz Mercado Ilse

con número de cuenta 096290772 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director	
Propietario	Dra. Martha Rosete Aguilar
Propietario	Dr. Agustín Muhlia Velázquez
Propietario	Dra. Graciela Lucía Binimelis de Raga
Suplente	Dr. Augusto García Valenzuela
Suplente	Dr. Amando Leyva Contreras

Rosete Aguilar Martha
Agustin
Graciela B Raga
Augusto Garcia V.

Consejo Departamental de



Alicia Zarzosa Perez

M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ
 FACULTAD DE CIENCIAS
 DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Para Isabel y Edgar

Para Dan y Fermin

Prólogo

La presente tesis trata de la caracterización de los diodos emisores (LEDs) de luz como detectores y de su aplicación en el diseño de un radiómetro solar que usa un arreglo de dichos diodos para funcionar de manera autónoma.

Este proyecto ha sido resultado del trabajo en equipo. La idea original del diseño que utiliza un arreglo de LEDs para operar en forma autónoma fue concebida durante la estancia de investigación que realicé en el año 2001 con el Grupo de Percepción Remota del Centro de Ciencias Ópticas de la Universidad de Arizona bajo la asesoría del Dr. Kurt Thome. La investigación básica, protocolos de medición y primeras caracterizaciones de los LEDs como detectores las hemos realizado desde el año 2002 en el Centro de Ciencias Avanzadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM un equipo de estudiantes de la licenciatura de física bajo la supervisión de la Dra. Martha Rosete Aguilar. En ese mismo año se caracterizó espectralmente un grupo de LEDs en el Laboratorio del Grupo de Percepción Remota dirigido por el Dr. Kurt Thome. La caracterización espectral precisa de los LEDs usados en el prototipo presentado fue posible gracias a las mediciones realizadas en el Centro Nacional de Metrología en Querétaro, con la ayuda del Dr. Wolfgang Schmid. Finalmente, el prototipo presentado fue construido en el Laboratorio de Biometeorología de la Universidad de California en Berkeley con la ayuda de Ted Hehn, bajo la supervisión y con el apoyo del Dr. Dennis Baldocchi. Las mediciones comparativas fueron realizadas con los radiómetros solares automatizados del Laboratorio de Percepción Remota del Dr. Kurt Thome.

En este trabajo se presentan las ideas que definen el principio de funcionamiento y el diseño del radiómetro. Los conceptos básicos y las referencias necesarias para continuar la construcción de prototipos que lleven a una versión final del instrumento son presentados aquí como una invitación para estudiantes e investigadores que estén interesados en la construcción y aplicaciones de este instrumento. La continuación exitosa de este proyecto

requerirá de un equipo interdisciplinario que incluya personas con experiencia en: ciencias de la atmósfera (aerosoles), radiometría solar, diseño óptico, y diseño e instrumentación electrónica. Actualmente se encuentran en preparación dos artículos que resumen los resultados de los estudios de los LEDs como detectores, así como la construcción de otro instrumento que los utiliza. En caso necesario, las ideas y datos experimentales que sean extraídas de esta tesis o de los trabajos originales aquí referenciados deberán ser citados adecuadamente.

Este trabajo no hubiera sido posible sin los trabajos desarrollados y las ideas aportadas por mis compañeros Roberto Velasco y Fermín Reygadas, así como la ayuda de Ted Hehn. Quisiera agradecer también el apoyo de mi directora de tesis, la Dra. Martha Rosete Aguilar, y de mis asesores externos, el Dr. Kurt Thome y el Dr. Dennis Baldocchi, así como la participación de Matías Arroyo, Zoraida Trejo, Ignacio Rozada y Luis Erantzcani. También agradezco la ayuda incondicional de Leatha Thome y el apoyo financiero parcial de los programas “Movilidad Internacional de Estudiantes” de la Dirección General de Posgrado de la UNAM, y “Verano de la Investigación Científica” de la Academia Mexicana de Ciencias, así como el gusto por la investigación que en las etapas tempranas de mi carrera generó el programa “Jóvenes Hacia la Investigación Científica”.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Ilse Ruiz Mercado.

Indice	Pág.
Introducción	3
1. La radiación solar para el estudio de aerosoles atmosféricos.	5
1.1. Radiación solar.	5
1.1.1. Absorción y dispersión.	6
1.2. La ley de Beer y el método de Langley.	7
1.2.1. Gráficas de Langley.	12
1.2.2. Método de intercepción conocida.	13
1.3. Otros parámetros atmosféricos que pueden obtenerse con mediciones de radiación solar directa.	15
2. Mediciones de radiación solar con radiómetros solares comerciales, de investigación y con radiómetros solares basados en LEDs.	16
2.1. Mediciones de radiación.	16
2.2. Radiómetros solares.	17
2.3. Fuentes de error en la aplicación del método de Langley y en el análisis de mediciones de radiación solar directa.	21
2.3.1. Validez de la ley de Beer: luz estrictamente monocromática.	21
2.3.2. Validez de la ley de Beer: luz difusa en el campo visual del detector.	21
2.3.3. Validez de la ley de Beer: estabilidad de las condiciones atmosféricas.	23
2.3.4. Determinación de la hora local.	23
2.3.5. Refracción atmosférica.	24
3. Radiómetros solares que utilizan LEDs como detectores.	27
3.1. Surgimiento y evolución.	27
3.2. Radiometría solar con radiómetros de LEDs.	31
3.2.1. El uso de los LEDs como detectores.	31
3.2.2. Consideraciones para el uso de LEDs en radiometría solar.	33
4. Caracterización de los LEDs como detectores.	35
4.1. Pruebas de linealidad para diodos emisores de luz como detectores ópticos.	36
4.1.1. Arreglo experimental para la medición de linealidad del fotómetro de LEDs.	38
4.1.2. Pruebas de linealidad para el LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.	39
4.1.3. Linealidad bajo condiciones de iluminación uniforme.	40
4.2. Caracterización de la respuesta angular de diodos emisores de luz como detectores ópticos.	40
4.2.1. Geometría de los LEDs y los procesos de extracción de luz	

	Pág.
y de detección.	41
4.2.2. Arreglo experimental para la caracterización de la respuesta angular de LEDs.	43
4.2.3. Caracterización angular para el LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.	45
4.3. Caracterización espectral de diodos emisores de luz como detectores.	46
4.3.1 Arreglo experimental para la caracterización de la respuesta espectral de LEDs.	48
4.3.2 Caracterización espectral para el LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.	49
4.4. Caracterización de la respuesta térmica de diodos emisores de luz como detectores ópticos.	50
4.4.1. Arreglo experimental para la caracterización de la respuesta térmica de LEDs.	51
4.4.2. Caracterización térmica del LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.	52
5. Diseño y principio de funcionamiento.	54
5.1. Geometría de las trayectorias solares.	55
5.2. Distribución de luz aureolar difusa alrededor del Sol.	58
5.3. Geometría del arreglo de LEDs y principio de funcionamiento.	60
5.4. Campo visual rectangular.	65
6. Construcción del primer prototipo.	67
6.1. Descripción del instrumento.	67
6.2. Circuito electrónico y adquisición de datos.	69
7. Análisis y discusión de los resultados de las pruebas de campo.	
Recomendaciones para futuros diseños.	74
7.1. Mediciones con el prototipo construido.	74
7.2. Resultados de las mediciones.	75
7.3. Gráficas de Langley obtenidas.	78
7.4. Discusión de los resultados	80
7.4.1. Estabilidad atmosférica.	80
7.4.2. Precisión de la posición y orientación de los LEDs en el arreglo y dentro de la estructura cilíndrica.	81
7.4.3. Campos visuales de los detectores.	82
7.5. Nuevo diseño propuesto y recomendaciones para futuros diseños.	83
Referencias.	89

Introducción.

Los aerosoles atmosféricos juegan un papel fundamental en el balance de la radiación terrestre, por lo que el monitoreo de sus propiedades ópticas y físicas a lo largo de grandes extensiones geográficas es esencial para entender su dinámica y desarrollar modelos climáticos precisos, así como para entender los efectos que los eventos naturales y las actividades antropogénicas pueden tener en el clima y en la salud humana. Su estudio y medición es también importante para la corrección de imágenes de satélite, con cuya información se alimentan gran parte de los modelos de predicción climática.

A nivel regional, en la zona metropolitana de la Ciudad de México los aerosoles volcánicos y antropogénicos han mostrado ser una fuente importante de la reducción de la visibilidad (Galindo, 1970; Molina, 2002), y se ha sugerido que pueden contribuir al cambio en el clima local de las inmediaciones de la ciudad (Jáuregui, 1999). Sin embargo, la dinámica de estas nubes de aerosoles no ha podido ser monitoreada en forma continua y por períodos de tiempo largos para poder estudiar su dinámica y los efectos que pueden tener en el clima global.

La medición de los aerosoles atmosféricos en México inició en los setentas con los trabajos de Galindo-Muhlia (1970), Galindo-Muhlia-Leyva (1974) y Galindo-Bravo (1975), aunque ya se habían realizado mediciones perheliométricas en el Observatorio de Tacubaya desde 1911 (Gorczyński). Las mediciones continuas realizadas por la Red de Monitoreo Atmosférico Automatizado (RAMA) han permitido obtener información sobre la composición de la nube de aerosoles de la ciudad. Sin embargo sus propiedades ópticas solo han sido medidas en estudios aislados o en campañas de medición con cobertura geográfica y temporal limitada.

Actualmente existen varias redes de monitoreo de aerosoles atmosféricos en el mundo. Algunas, como Aeronet, Aerocan o Skynet, utilizan radiómetros solares automatizados. Otras como la red del programa GLOBE, o la BSSN usan mediciones realizadas manualmente con radiómetros portátiles. Aunque las primeras pueden obtener un registro casi continuo, el elevado costo de su implementación por lo general limita su cobertura geográfica. Por otro lado, las redes con instrumentos manuales citadas han podido cubrir áreas geográficas notablemente más extensas al hacer uso de otras redes (las instituciones

educativas) para facilitar la recolección de datos y reducir el costo de implementación. Además, el bajo costo de los instrumentos manuales portátiles usados en estos casos facilita y acelera la distribución y mantenimiento de los instrumentos.

En México, por ejemplo, el programa GLOBE (Aprendizaje y Observaciones Globales en Beneficio del Medio Ambiente, <http://www.globe.gov>) afilió en sólo cuatro años alrededor de 90 sitios de monitoreo ambiental, 38 de los cuales realizan mediciones del aerosol. En contraste, la red Aeronet (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) estableció en 1999 en Ciudad Universitaria su única estación de monitoreo en México a la fecha. Un ejemplo similar es el caso de la red de mediciones biometeorológicas Ameriflux (<http://public.ornl.gov/ameriflux>), cuyo único sitio en México opera en La Paz, Baja California Sur desde el año 2000.

En esta tesis se presenta el primer prototipo de un radiómetro solar que utiliza un arreglo de diodos emisores de luz (LEDs) como detectores para realizar mediciones autónomas de la profundidad atmosférica total. En los primeros dos capítulos se presentan los conceptos básicos de radiometría solar, aerosoles atmosféricos y se introduce el Método de Langley, mientras que el tercer capítulo enfoca estos conceptos a los radiómetros solares que usan LEDs como detectores. El capítulo cuatro está dedicado a la caracterización completa de los LEDs como detectores y constituye junto con el capítulo cinco la parte central de la tesis. En el capítulo cinco se exponen las ideas y principio de funcionamiento del diseño propuesto. Por último, los capítulos seis y siete muestran la construcción del prototipo para una longitud de onda, las gráficas de Langley y las profundidades ópticas obtenidas con éste, así como la comparación de su desempeño en la calibración Langley con mediciones simultáneas realizadas con un radiómetro automatizado. También se presenta una breve lista de recomendaciones para futuros diseños.

Al ser un dispositivo de bajo costo y autónomo, el instrumento propuesto aquí podría ser usado para establecer una red de medición de las profundidades ópticas atmosféricas que permita el monitoreo del aerosol atmosférico y de la visibilidad en zonas en donde la adquisición de varios instrumentos comerciales para este propósito no puede financiarse, o bien, en áreas donde no existe la posibilidad de realizar mediciones manualmente en forma continua.

Capítulo 1

La radiación solar para el estudio de aerosoles atmosféricos.

1.1 Radiación Solar.

El Sol tiene un espectro de emisión que depende de la temperatura de su superficie, de acuerdo a la ley de Planck $M(\lambda) = 2hc^2\lambda^{-5} / e^{hc/\lambda T}$. La figura 1.1 muestra las curvas de Planck para 5780 K y 5900 K, así como una curva del espectro solar medida experimentalmente en el exterior de la atmósfera. El valor de la integral de esta última curva sobre todas las longitudes de onda es la llamada constante solar exoatmosférica (o constante solar) representa la cantidad de energía solar que recibiría una superficie plana de área unitaria que se encontrara normal a la dirección del rayo solar, en el vacío espacial y a la distancia media de la Tierra al Sol.

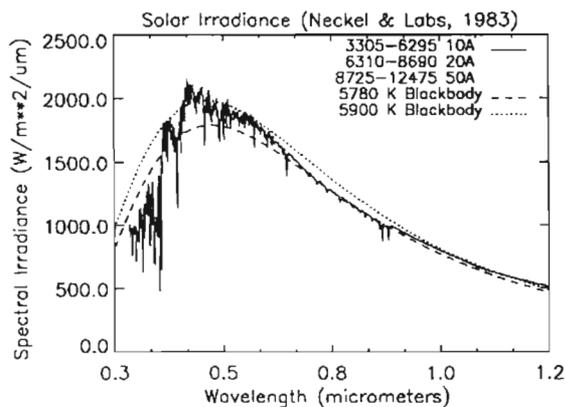


Figura 1.1

La radiación solar que llega a la atmósfera de la Tierra puede ser reflejada, refractada, dispersada, transmitida o absorbida y re-emitida por ésta, lo que produce un espectro solar discontinuo.

1.1.1 Absorción y dispersión.

Las líneas de absorción de la atmósfera son debidas a las moléculas de oxígeno (O_2), vapor de agua (H_2O), ozono (O_3), bióxido de Carbono (CO_2), monóxido de Carbono (CO), dióxido de Azufre (SO_2), óxidos de Nitrógeno (NO_x) y a otros gases que la componen. También hay absorción por aerosoles, aunque ésta es más débil. En la figura 1.2 pueden observarse algunas líneas de absorción molecular en el espectro solar. La dispersión de la luz solar es también causada por moléculas y aerosoles, sin embargo su efecto en el espectro es una atenuación continua (ver línea azul o línea marcada como $1/\lambda^4$, figura 1.3).

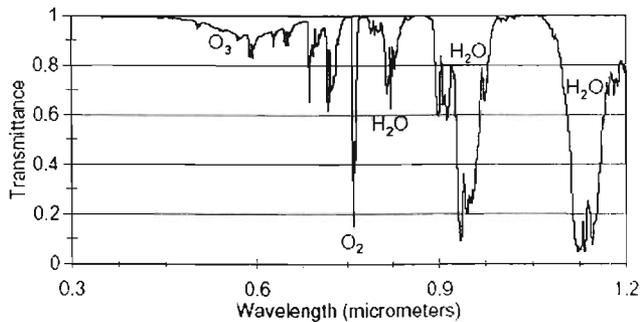


Figura 1.2

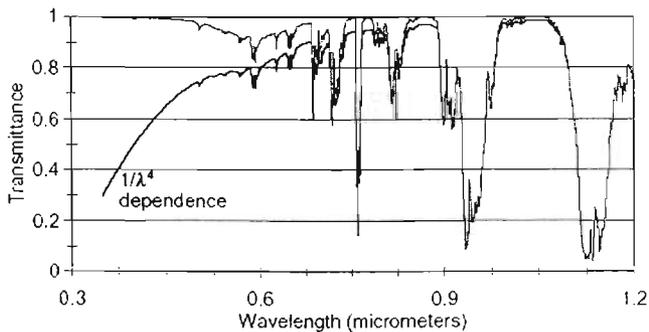


Figura 1.3

Las moléculas (O_2 , vapor de agua, O_3 , CO_2 , CO , SO_2 , NO_x) son mucho más pequeñas que los aerosoles (polvo, cenizas volcánicas), cuyo tamaño varía entre 0.2 y 5 μm .

Si las moléculas pueden considerarse esféricas y su radio r es menor que la longitud de onda de la luz con la que interactúan ($r < 0.1 \lambda$), se puede utilizar el modelo Rayleigh para describir la dispersión que causan. En esta aproximación, la dispersión molecular tiene una dependencia inversa con la longitud de onda que se incrementa predominantemente como $1/\lambda^4$ (§1.2). Existen varias fórmulas para la determinación de la dispersión de Rayleigh. En la figura 1.3 se observa el efecto de la dispersión molecular de Rayleigh en el mismo espectro solar de la figura anterior.

La modelación de aerosoles resulta más compleja, principalmente porque la distribución de sus tamaños varía espacialmente y sus tiempos de residencia son menores a los de los gases no volátiles (del orden de días en la tropósfera y de meses en la estratósfera). Sin embargo, asumiendo un modelo de distribuciones de tamaños, su dispersión puede ser aproximada por la dispersión de Mie para partículas esféricas de tamaño $0.1 \lambda \leq r < 50 \lambda$. En este caso la dispersión también tiene una dependencia inversa con la longitud de onda, aunque mucho más lenta.

Son la absorción y la dispersión lo que causan en conjunto la atenuación de la radiación solar por la atmósfera, lo que en ocasiones vemos como una disminución en la visibilidad.

1.2 La ley de Beer y el método de Langley.

La atenuación de la energía radiante al pasar por un medio puede ser descrita, bajo ciertas condiciones, por la ley de Beer-Lambert-Bouguer (en adelante referida como ley de Beer):

$$I_\lambda = I_{0,\lambda} e^{-\tau m} \quad (1.1)$$

I_λ es la energía (flujo radiante o irradiancia) de longitud de onda λ incidente, m es un parámetro que representa la distancia atravesada y τ es el coeficiente de extinción volumétrico, relacionado con las propiedades y concentración de los atenuantes. La forma diferencial de esta ley:

$$\frac{d}{dm} I_{\lambda} = -\tau I_{\lambda} \quad (1.2)$$

muestra que el cambio de la energía espectral incidente con la distancia es una función lineal de la energía espectral a la distancia recorrida m y del poder de atenuación del medio. Esta ley tiene aplicaciones como la determinación de la concentración de soluciones, la estimación de la densidad de hojas de un bosque y la medición de la atenuación atmosférica.

El método desarrollado por Langley se basa en la Ley de Beer para poder inferir el valor de la constante solar I_{λ} y de los índices de atenuación atmosférica (profundidades ópticas) a partir de mediciones de luz solar directa incidente en la superficie terrestre a varios ángulos solares.

Si:

- (a) Sólo luz solar directa llega al detector,
- (b) La luz es estrictamente monocromática,
- (c) La respuesta del detector es lineal a la energía incidente, y
- (d) Se mantiene una atmósfera estable durante las mediciones, en el sentido de que las concentraciones verticales y horizontales de los atenuadores así como la distribución espacial de sus tamaños permanezcan constantes, entonces, la luz detectada por un radiómetro (irradiancia o flujo radiante) puede ser expresada por la ley de Beer como:

$$I_{\lambda} = \left(\frac{R_m}{R} \right)^2 I_{0,\lambda} e^{-m \tau_{\lambda, \text{total}}} \quad (1.3)$$

donde:

$m(\theta)$ - masa de aire o "cantidad de atmósfera" atravesada, función del ángulo solar cenital θ e igual a 1 para $\theta=0$.

- $\tau_{\lambda, total}$ - profundidad óptica atmosférica (POA) total para la longitud de onda λ .
- I_{λ} - radiación de longitud λ detectada en la superficie de la Tierra.
- $I_{0, \lambda}$ - radiación solar de longitud λ incidente para masa de aire cero (si no hubiera atmósfera), a la distancia promedio de la Tierra al Sol.
- R_m - distancia promedio entre la Tierra y el Sol.
- R - distancia entre la Tierra y el Sol en el instante de la observación.

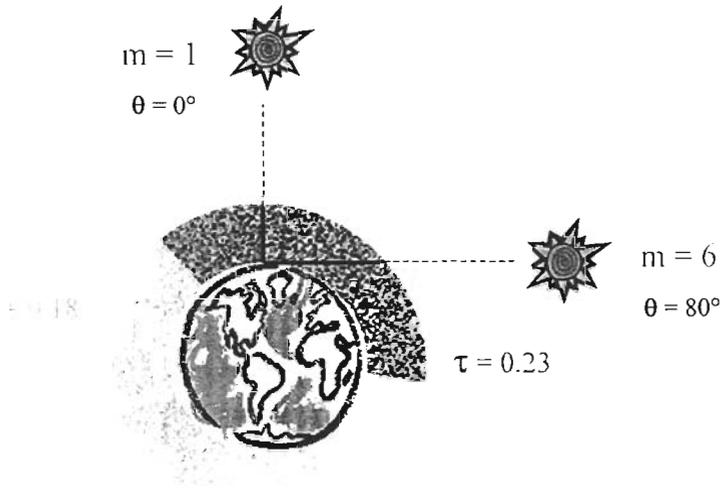


Figura 1.4

La profundidad óptica está compuesta por:

$$\tau_{\lambda, total} = \tau_{\lambda, R} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \tau_{\lambda, g} + \tau_{\lambda, a} \quad (1.4)$$

- $\tau_{\lambda, R}$ - profundidad óptica debida a la dispersión molecular o de Rayleigh.
- $\tau_{\lambda, g}$ - profundidad óptica debida a la absorción de gases atmosféricos.
- $\tau_{\lambda, a}$ - profundidad óptica debida a la dispersión y absorción de aersoles.
- (P/P_0) - cociente de la presión atmosférica local P respecto a la presión a nivel del mar para una atmósfera estándar P_0 .

En la práctica, la profundidad óptica del aerosol $\tau_{\lambda,a}$ se obtiene calculando $\tau_{\lambda,R}$ con el modelo de Rayleigh y escogiendo para las mediciones longitudes de onda en las que la absorción por gases sea mínima (generalmente es suficiente con evitar las líneas del H₂O, del CO₂ y considerar las bandas de Chappius de O₃).

Existen distintas fórmulas para la determinación de $\tau_{\lambda,R}$, como (1.5a) derivada de datos experimentales por Pendorf (1957) o los ajustes de curva (1.5b) propuestos por Hansen y Travis (1974):

$$\tau_{\lambda,R} = \frac{8\pi^3(n^2-1)^2 N_C}{3\lambda^4 N_S^2} \left(\frac{6+3\gamma}{6-7\gamma} \right) \left(\frac{P}{P_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (1.5a)$$

$$\tau_{\lambda,R} = 0.008569\lambda^{-4} \left(1 + 0.0113\lambda^{-2} + 0.00013\lambda^{-4} \right) \quad (1.5b)$$

π - profundidad óptica debida a la dispersión molecular o de Rayleigh.

n - índice de refracción del aire.

N_C - número de densidad de columna (=2.154x10²⁵ en condiciones estándar).

N_S - número de densidad molecular (=2.547x10¹⁹ en condiciones estándar).

γ - factor de despolarización

(T/T_0) - cociente de la temperatura atmosférica local T respecto a la temperatura estándar T_0 .

En ambas expresiones λ debe darse en micrómetros.

Comparaciones exhaustivas de las distintas expresiones disponibles para el cálculo de $\tau_{\lambda,R}$ pueden encontrarse en los trabajos de Teillet (1990) y Bodhaine, et al. (1999).

Es importante hacer notar que la aplicación de (1.4) a (1.3) implica que la misma masa relativa es válida para cada una de los atenuadores, es decir:

$$I_\lambda = \left(\frac{R_m}{R} \right)^2 I_{0,\lambda} e^{-\left[m\tau_{\lambda,R} \left(\frac{P}{P_0} \right) + m\tau_{\lambda,g} + m\tau_{\lambda,a} \right]} \quad (1.6)$$

lo que equivale a suponer que el poder de atenuación de cada componente cambiará de igual forma como función del ángulo solar cenital. Como describimos en §1.1.1 y §2.3.3 esta suposición no es siempre válida.

La masa de aire m es función del ángulo solar cenital θ , el que puede ser medido o calculado a partir de las coordenadas geográficas y temporales del observador mediante algoritmos astronómicos como los desarrollados por Meeus (1998). Para $\theta < 60^\circ$ la aproximación $m = \sec \theta$ es por lo general suficiente. Sin embargo, la refracción sufrida por los rayos solares a través de la atmósfera puede ocasionar que el ángulo cenital aparente θ_{ap} al momento de la observación difiera del ángulo cenital θ_{calc} calculado con algoritmos (ver §2.3.5). Meeus propone la siguiente expresión para calcular la desviación Δ_{refr} debida a la refracción angular, como función de la temperatura T y presión atmosférica P en el sitio de la observación:

$$\Delta_{refr} = \left[\frac{1.02}{\tan \left(\frac{90 - \theta_{calc} + 1.03}{90 - \theta_{calc} + 5.11} \right)} \right] \frac{1}{60} \frac{P}{1010} \frac{283}{273 + T} \quad (1.7)$$

De donde:

$$\theta_{ap} = \theta_{calc} - \Delta_{refr} \quad (1.8)$$

y la masa de aire puede calcularse con la expresión :

$$m_{refr} = \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{180} \theta_{ap} \right) + \frac{0.50572}{(96.07995 - \theta_{ap})^{1.6364}}} \quad (1.9)$$

En ambas expresiones, (1.7) y (1.9), los ángulos deben ser introducidos en grados.

Por otro lado, Young (1994) ofrece otra expresión que toma en cuenta la refracción atmosférica, pero que permite calcular la masa de aire como función del ángulo cenital calculado θ_{calc} :

$$m_{\text{Young}} = \frac{1.002432 \cos^2(\theta_{\text{calc}}) + 0.148386 \cos(\theta_{\text{calc}}) + 0.0096467}{\cos^3(\theta_{\text{calc}}) + 0.149864 \cos^2(\theta_{\text{calc}}) + 0.0102963 \cos(\theta_{\text{calc}}) + 0.000303978} \quad (1.10)$$

En §2.3.5 puede encontrarse una comparación de estas fórmulas.

1.2.1 Gráficas de Langley

Para un radiómetro cuya señal de salida es un voltaje, y por cuya apertura entra además una cantidad $I_{\lambda,\text{dif}}$ de luz difusa, podemos describir (1.6) como:

$$V_{\lambda} = \left(\frac{R_m}{R} \right)^2 V_{0,\lambda} e^{-\left[m \tau_{\lambda,R} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \tau_{\lambda,a} \right]} + V_{\lambda,\text{dif}} \quad (1.11)$$

$$\ln V_{\lambda} = \left[2 \ln \left(\frac{R_m}{R} \right) + \ln V_{0,\lambda} + \ln V_{\lambda,\text{dif}} \right] - m \left[\tau_{\lambda,R} \left(\frac{P}{P_0} \right) + \tau_{\lambda,a} \right] \quad (1.12)$$

De manera que una gráfica del logaritmo natural del voltaje de salida como función de la masa de aire (llamada gráfica de Langley) dará como resultado una línea recta con pendiente $-m[\tau_{\lambda,R}(P/P_0) + \tau_{\lambda,a}]$. La extrapolación de la línea para $m=0$ será proporcional al logaritmo natural de la constante solar exoatmosférica I_{λ} al momento de la medición. En la figura 1.5 se muestra una gráfica de Langley obtenida con datos experimentales en una día despejado en Tucson, Arizona, la ecuación de la línea recta se ve en el recuadro.

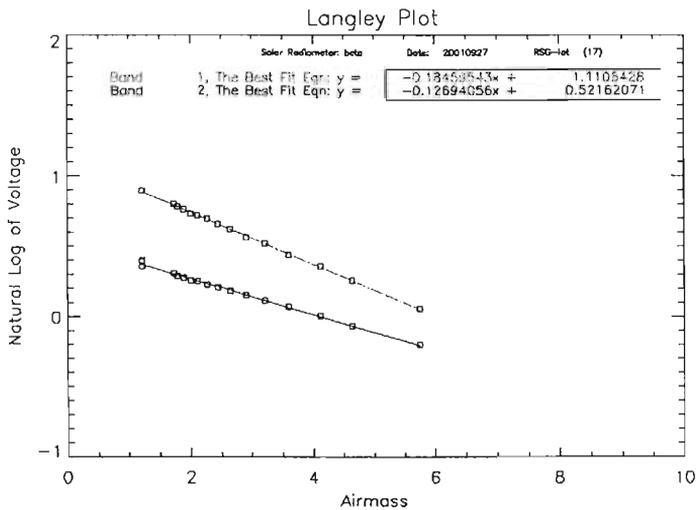


Figura 1.5

Si $\tau_{\lambda, \text{total}}$ se mantiene constante durante las mediciones y el diseño del radiómetro permite desprestigiar las variaciones en $V_{\lambda, \text{dif}}$, entonces el valor del voltaje para una masa de aire cero puede ser considerado una constante de calibración que sólo dependerá del radiómetro mismo. La medición sistemática de la constante de calibración para cada longitud de onda permite comparar el promedio de los valores $V_{\lambda, 0}$ obtenidos en varios días y relacionarlos con datos tabulados del flujo solar incidente en el exterior de la atmósfera, para obtener una calibración absoluta del radiómetro.

1.2.2 Método de intercepción conocida.

Una vez determinada la constante de calibración de un radiómetro por el método de Langley, es posible obtener para cada medición el valor de la profundidad óptica total instantánea $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$:

$$\tau_{\lambda, \text{total}}(t) = \frac{2 \ln\left(\frac{R_m}{R}\right) + \ln V_{0,\lambda} + \ln V_{\lambda, \text{dif}} - \ln V_{\lambda}(t)}{m(t)} \quad (1.13)$$

El monitoreo de $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$ permite en particular, el estudio de los patrones diarios de la profundidad óptica del aerosol, cuya importancia se ha destacado en la introducción.

Aunque la estabilidad de la atmósfera es un requisito sólo necesario para la calibración del radiómetro y no para la obtención de $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$, en la práctica se procura obtener gráficas de Langley en cada oportunidad posible para mantener un registro de posibles deterioros del instrumento.

La obtención de $\tau_{\lambda, \text{total}}$ sin el conocimiento previo de las constantes de calibración del instrumento es una de las principales ventajas del método de Langley, sin embargo también es posible realizar una calibración absoluta del radiómetro en el laboratorio para utilizar el método de intercepción conocida. Esto generalmente se realiza utilizando lámparas estándar de irradiancia operando a corriente constante y en condiciones de temperatura controlada. Existen diversos trabajos en la literatura que comparan ambos métodos de calibración. En particular, el trabajo de Schimid y Wehrli (1995) compila una de las listas de referencias más completas al respecto. También pueden realizarse transferencias de calibraciones entre un instrumento calibrado y otros que no lo están.

Si mediante el método de Langley, una calibración de laboratorio o una calibración transferida el valor de $V_{\lambda,0}$ se conoce con una incertidumbre $\Delta V_{\lambda,0}$, la derivación implícita de (1.13) permite calcular el error en la obtención de $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$. Como Reagan y sus colegas hacen notar (Reagan, 1986a), este error será de:

$$\Delta \tau_{\lambda, \text{total}}(t) = \frac{[\Delta V_{0,\lambda} / V_{\lambda}(t)]}{m(t)} \quad (1.14)$$

1.3 Otros parámetros atmosféricos que pueden obtenerse con mediciones de radiación solar directa.

Mediante mediciones de tipo Langley con radiómetros solares usando distintas longitudes de onda también pueden derivarse los coeficientes α y β de turbiedad atmosférica, útiles en la determinación de la visibilidad (Galindo, 1970). Por otro lado, la columna total de vapor de agua puede ser determinada realizando mediciones de tipo Langley con radiómetros que tengan una longitud de onda localizada en la banda de absorción de vapor de agua de 940 nm y otra (u otras) en regiones adyacentes no absorbentes (Thome, 1994).

Adicionalmente, las mediciones de radiación circunsolar realizadas con radiómetros pueden ser utilizadas para corregir mediciones de luz directa (Box, 1979; Reagan, 1992; Tanaka, 1986) y para medir las funciones de fase de los aerosoles, útiles en la obtención su distribución de tamaños (Junge, 1955; Grotbeck, 1993a; Grotbeck, 1993b; Tomasi, 1983; O'Neill, 1984).

Capítulo 2

Mediciones de radiación solar con radiómetros solares comerciales, de investigación y con radiómetros solares basados en LEDs.

2.1 Mediciones de Radiación

La radiometría se encarga de la medición de radiación óptica (radiación electromagnética con longitudes de onda entre 0.01 y 1000 μm). La fotometría en cambio, abarca la medición de luz o radiación electromagnética sólo en el rango en que puede ser detectada por el ojo humano (de 360 a 830 nm). La física en ambas disciplinas es la misma, y lo único que las distingue es que en la fotometría la mayoría de las unidades de energía o geométricas están referenciadas a la respuesta espectral del ojo humano.

Como el dispositivo para medir radiación que aquí se describe, tiene una respuesta espectral en el visible, en un sentido estricto, debe ser referido como fotómetro. Sin embargo, como el interés por analizar la radiación medida no está exclusivamente relacionado a la respuesta del ojo humano, en esta investigación utilizaremos los símbolos, unidades y nomenclatura de la radiometría.

Hay dos unidades relevantes para nuestro estudio: flujo radiante e irradiancia. El *flujo radiante* (Φ) es la energía radiada por una fuente por unidad de tiempo, y es medida en W. La *irradiancia* (o densidad de flujo radiante) es el flujo radiante por unidad de área comprendido en todas las direcciones en un hemisferio, que incide en o sale de una superficie que coincide con la base de dicho hemisferio. La irradiancia incidente se

denomina con la letra E, y la irradiancia emitida con la letra M. Ambas son medidas en unidades de $W m^{-2}$.

2.2 Radiómetros Solares

La radiometría generalmente trata con sistemas compuestos por: fuente, blanco, medio de transmisión, sistema óptico, detector, procesamiento de la señal y datos de salida, ver figura 2.1.

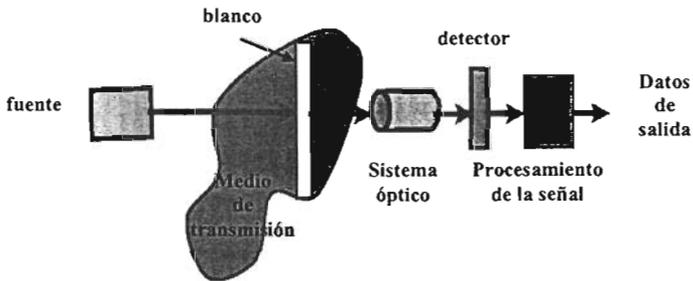


Figura 2.1 Sistema radiométrico

En el caso de la radiometría solar, la fuente es el Sol. El blanco puede ser la superficie de la Tierra y el medio de transmisión es la atmósfera terrestre, ver figura 2.2.

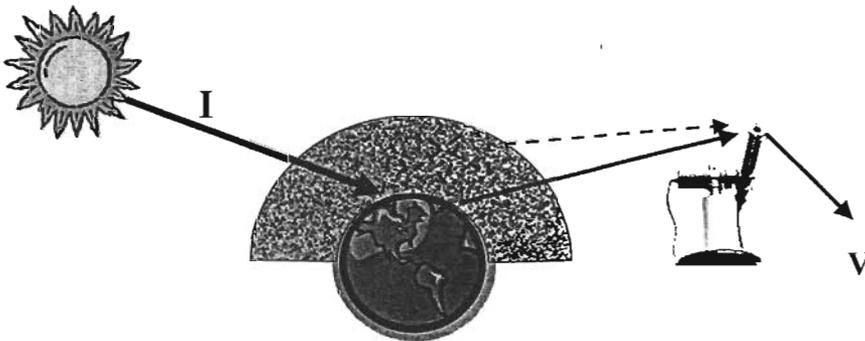


Figura 2.2 Sistema de Radiometría Solar.

En un radiómetro solar sencillo, un sistema óptico (O) colecta la radiación en un detector (D). El área (A) de la apertura de entrada del sistema óptico determina la cantidad de radiación que se colecta, mientras que el área (a) del detector define el campo visual (Ω), y las reflexiones internas son eliminadas mediante el uso de baffles deflectores (B). La señal del detector (una corriente, un voltaje o una diferencia de temperaturas) es amplificada y acondicionada en un circuito (C) para poder ser registrada y almacenada (R) con un multímetro y una computadora o con un datalogger. El sistema está contenido en un empaque de acuerdo a las condiciones de operación, ver figura 2.3.

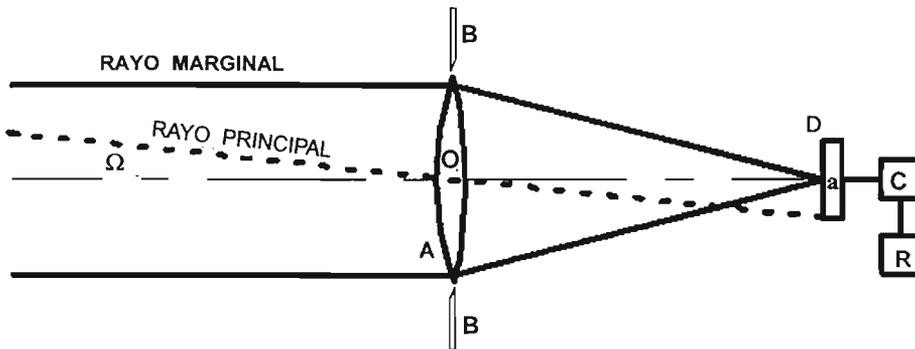


Fig 2.3 Radiómetro Solar Sencillo

Cada parte del sistema cumple especificaciones determinadas por la aplicación del radiómetro (medición de radiación global, difusa, directa, circunsolar), la precisión requerida, el uso deseado (operación continua, manual, autónoma) y el costo requerido. A continuación se enlistan las características más relevantes de los radiómetros solares usados para el estudio de aerosoles atmosféricos con el método de Langley.

PROPIEDADES RADIÓMETRICAS		
	NOTAS	Unidades
Linealidad	La linealidad entre la señal de salida y la irradiancia detectada por el instrumento es una suposición fundamental en la utilización del método de Langley (ver §1.2).	% de no-linealidad
Precisión	En §2.3 se discuten los factores más importantes que determinan la precisión de un radiómetro.	% de POA
Sensibilidad	La señal más pequeña susceptible de ser medida está generalmente determinada por la digitalización o los niveles de ruido. En el caso de arreglos de detectores, se especifica las sensibilidades absolutas o relativas de cada detector.	mW cm ⁻² μA μmol ⁻¹ s ⁻¹ cm ⁻²
CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES		
	NOTAS	Unidades
Ancho de banda espectral (rango total)	En el estudio de aerosoles atmosféricos, es común encontrar radiómetros de varios canales cubriendo rangos alrededor de 400 – 1020 nm.	nm
Sistema de selección espectral	Continua (con un monocromador) o discreta (con filtros de interferencia o de absorción). El uso de filtros de interferencia tiene la desventaja de que éstos degradan sus desempeño (longitud de onda pico, ancho de banda, coeficiente de transmisión) con el tiempo y requieren una caracterización continua. Sus parámetros pueden también depender del ángulo de incidencia.	---
Longitud de onda pico, dominante, efectiva y ancho de banda espectral.	En el estudio de aerosoles atmosféricos, la selección de las longitudes de onda pico y de los anchos de banda espectrales de cada canal se realiza evitando las líneas de absorción en el espectro solar (§1.2). El ancho de banda espectral debe ser lo suficientemente estrecho para que la suposición de luz cercanamente monocromática del método de Langley sea válida (§1.2) y la función de transmisión pueda ser modelada con una función exponencial. (ver Reagan, 1986b). En radiómetros que utilizan filtros de interferencia es común encontrar anchos de banda de 10nm FWHM. En §2.3.1 y en §3.2.2 se discute el uso de anchos de banda finitos y en §3.2.2 se define λ _{efectiva} y en Arroyo (2004) se define λ _{dominante} .	nm
Coefficiente térmico de la longitud de onda pico	Determinada por las respuestas térmicas del detector y del sistema de selección espectral del radiómetro. Los filtros de interferencia por ejemplo, tienen coeficientes de temperatura lineales entre 0.01 y 0.2	nm C ⁻¹

	nm C ⁻¹ y los detectores de silicio una sensibilidad de hasta 2% C ⁻¹ en el visible, dependiendo del tipo de detector.	
OTRAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS		
	NOTAS	Unidades
Detector	El tipo (fotodiodo, fototransistor, fotorresistencia, etc) y el material (Si, InGaAs, GaP, etc) están determinados por el rango espectral de interés, así como la linealidad, coeficiente térmico y estabilidad dentro del rango dinámico buscado.	---
Campo visual angular	$\omega_{1/2}$ = ángulo visual medio Ω = ángulo visual completo = $2 \omega_{1/2}$ FWHM* = ancho total a media altura Considerando que el disco solar subtende un ángulo aproximadamente de 0.5°, se pretende que el ángulo de visión sea lo suficientemente pequeño para que al detector llegue la menor cantidad de luz difusa que pudiera introducir errores en los parámetros obtenidos (ver §2.3). Sin embargo, tanto en el caso de radiómetros de rastreo automatizado como de rastreo manual, el ángulo visual debe ser lo suficientemente grande para superar la precisión del sistema de rastreo o para hacer posible la alineación manual del instrumento. La mayoría de los radiómetros utilizados para mediciones de luz directa tienen ángulos visuales completos entre 1.2 y 3 grados. *Mientras Ω está definido por el rayo principal y describe el último rayo de luz que llega al detector, el término FWHM describe el ancho a media altura de respuestas angulares gaussianas, independiente de Ω .	grados
CARACTERÍSTICAS TEMPORALES		
	NOTAS	Unidades
Tiempo de respuesta	En la mayoría de los casos el tiempo de respuesta del detector predomina sobre el del circuito amplificador. En sistemas de rastreo manual el tiempo de respuesta debe ser tal que facilite la lectura durante el proceso de orientación. En sistemas automatizados el tiempo de respuesta debe ser menor al tiempo de rastreo.	s

2.3 Fuentes de error en la aplicación del método de Langley y en el análisis de mediciones de radiación solar directa.

En esta sección se discuten los factores más importantes que determinan la precisión de un radiómetro.

2.3.1 Validez de la ley de Beer: luz estrictamente monocromática.

Las profundidades ópticas y los valores de la constante solar exoatmosférica obtenidos mediante el uso de la ley de Beer son, en principio, únicamente válidos para radiación solar directa y estrictamente monocromática. Sin embargo, Thomason y coautores (1982) han mostrado, mediante la integración numérica de la ley de Beer a lo largo de anchos espectrales finitos, que pueden obtenerse profundidades ópticas con una precisión de hasta 0.1% con anchos de banda de 10 nm para longitudes de onda pico mayores a 450 nm. Más tarde, Brooks y Mims (2001) mostraron una reinterpretación de la ley de Beer para anchos de banda finitos (§3.2.2) y obtuvieron concordancia hasta en unas cuantas unidades porcentuales (centésimas de profundidad óptica) entre las profundidades ópticas obtenidas con anchos de banda de 80nm y de 10nm para una longitud de onda pico de 500nm. Los estudios realizados en 2001 con instrumentos similares a los del experimento de Brooks y Mims corroboraron la concordancia hasta en centésimas de profundidad óptica atmosférica en los valores obtenidos con distintos anchos de banda (Ruiz Mercado 2001).

En el caso del error en la constante solar exoatmosférica debido a la suposición de la aplicabilidad de la ley de Beer, el trabajo de Thomason y coautores predice que para la obtención de precisiones del orden del 1% en este parámetro los máximos anchos de banda permisibles están alrededor de los 75nm y 100 nm para longitudes de onda pico de 500 nm y 600 nm respectivamente. De acuerdo a dicho trabajo, el máximo ancho de banda permitible aumenta con la longitud de onda pico.

2.3.2 Validez de la ley de Beer: luz difusa en el campo visual del detector.

La entrada de luz difusa en el detector, es indeseable en radiómetros que pretenden medir únicamente la componente solar directa. Este factor produce la entrada de mayor energía

radiante en el campo visual del radiómetro, lo que se traduce en la errónea subestimación de las profundidades ópticas debido a la medición de transmisiones solares aparentemente mayores. El error introducido es mayor para ángulos de visión mayores y, como muestran Reagan y coautores (Reagan, 1992), aumenta también para profundidades ópticas y valores de la masa de aire mayores. En este último trabajo citado, con la suposición de que la profundidad óptica total $\tau_{\lambda, \text{total}}$ se compone sólo de los términos de dispersión de Rayleigh y de dispersión por aerosoles, es decir:

$$\tau_{\lambda, \text{total}} = \tau_{\lambda, R} + \tau_{\lambda, a} \quad (2.1)$$

y tomando $R_m = R$, los autores proponen que la contribución de luz difusa en la medición causa una subestimación de la profundidad óptica instantánea $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$ de:

$$\Delta \tau_{\lambda, \text{total}}(t) = \frac{\ln \left(1 + \frac{V_{\lambda, \text{dif}}}{V_{\lambda}(t)} \right)}{m(t)} \quad (2.2)$$

En la literatura pueden encontrarse frecuentes referencias a cálculos realizados por Herman y coautores (1971) que indican que para atmósferas limpias (profundidades ópticas totales de hasta $\tau_{\lambda, \text{total}} = 0.5$) y un campo visual Ω de 3 grados, la componente difusa constituye hasta 2% de la radiación “directa” observada a ángulos cenitales $\theta \geq 80^\circ$. En este caso, el error en la profundidad óptica dado por la ecuación (2.1) para $\theta = 80^\circ$ ($m \approx 5.7$) es $\Delta \tau_{\lambda, \text{total}} = 0.003$. En otro trabajo Volz (1974) reporta contribuciones de luz difusa de 4% para un “campo visual efectivo” de 2° , $m \approx 2$ y cielos con algunas cirrus. El error en este caso sería de $\Delta \tau_{\lambda} = 0.019$. Sin embargo no es claro si el campo visual referido es Ω , $\omega_{1/2}$, o FWHM. Box y Deepak (1979) presentan un estudio independiente y más detallado, dividiendo la componente $V_{\lambda, \text{dif}}$ en sus contribuciones debido a dispersión sencilla y múltiple. Los autores concluyen que para radiómetros con campos visuales Ω menores a 10° , y cielos relativamente claros ($\tau_{\lambda, \text{total}} < 0.4$) la contribución total de la componente difusa es aproximadamente 1%.

2.3.3 Validez de la ley de Beer: estabilidad de las condiciones atmosféricas.

La efectividad del método de Langley depende de que la profundidad óptica $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$ permanezca constante a lo largo del rango de masas de aire en las que son realizadas las mediciones. Los efectos de las variaciones de $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$ son analizados por Reagan y coautores (1986a), quienes advierten que algunas variaciones pueden afectar significativamente las estimaciones de $\tau_{\lambda, \text{total}}$ y $V_{0, \lambda}$ a pesar de que la desviación estándar del ajuste lineal indique que los datos radiométricos son buenos.

La estabilidad de $\tau_{\lambda, \text{total}}(\theta)$ es también un requisito de la ley de Beer. La aplicabilidad de la fórmula (1.6) mencionada en §1.2 supone que la misma masa relativa es válida para cada una de las componentes atmosféricas (moléculas, aerosoles, gases), lo que equivale a asignarles la misma distribución vertical. Como Thomason (1983), Dutton (1994) y Schotland (1986) señalan, esta suposición puede conducir a determinaciones erróneas de la profundidad óptica y la constante solar. Schotland y Lea muestran que dicho error crece de manera importante con el ángulo cenital, provocando errores cada vez más grandes en la constante solar conforme se incluyen en el análisis mediciones a ángulos cenitales mayores. En su trabajo también concluyen que el error en la constante solar debido a atmósferas estructuradas es independiente de la longitud de onda e insensible a cambios en el perfil de temperaturas atmosféricas.

2.3.4 Determinación de la hora local.

Cuando el valor de los ángulos cenitales solares θ_{calc} y θ_{ap} son determinados mediante algoritmos astronómicos como se describe en §1.2, la incertidumbre en la determinación de la hora local es otro factor que puede introducir errores en la determinación de la constante solar. Sin embargo, como Thomason y coautores (1982) hacen notar, no se trata de un factor crítico. Por ejemplo, si se conoce el tiempo local con una incertidumbre de 1 segundo, pueden obtenerse mediciones con precisión de 0.1% para masas de aire $m \leq 4.5$. Para un diseño como el que aquí se presenta, en el que se busca obtener resultados con una precisión alrededor del 1% este factor no es crítico ni dominante.

2.3.5 Refracción atmosférica.

Otro factor que podría afectar el análisis de las mediciones es la determinación incorrecta del ángulo cenital solar y por tanto de la masa de aire. Este error es sólo significativo para ángulos cenitales cercanos al horizonte y su corrección sólo requiere de la aplicación de las ecuaciones (1.7) o (1.10). En la figura 2.4 se muestra la diferencia Δ_{refr} entre los ángulos cenitales reales (corregido por refracción) y aparente (sin corrección) como función del ángulo cenital real. En la figura 2.5 puede verse el comportamiento cerca del horizonte de las masas de aire calculadas con (1.9), (1.10) y la aproximación $m=\sec(\theta)$ para un día del mes de mayo en Tucson, Arizona.

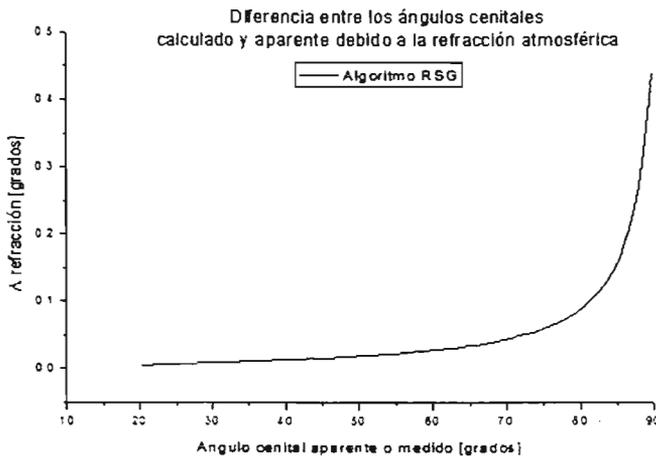


Figura 2.4

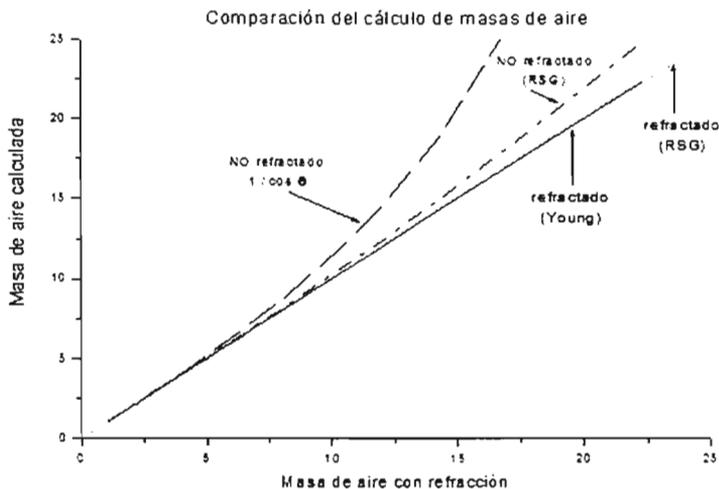


Figura 2.5

En la figura 2.6 se muestran las diferencias en masas de aire no refractadas con respecto a valores del algoritmo RSG, (§5.1), algoritmo desarrollado por el grupo de percepción remota de la Universidad de Arizona, para ángulos cenitales refractados.

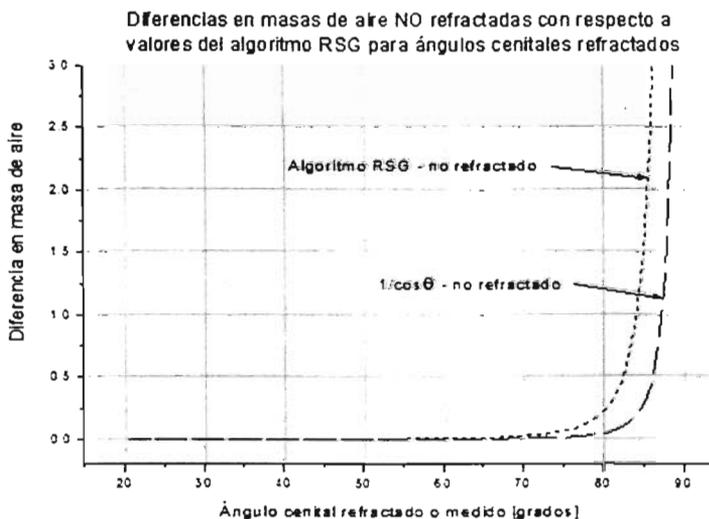


Figura 2.6

Otras referencias útiles para la determinación y evaluación de errores en los parámetros obtenidos con mediciones de radiación solar directa son los trabajos de Young (1974), Shaw (1976) y Reagan y coautores (1985). Adicionalmente, puede encontrarse entretenida la lectura de las críticas de Laulainen y Taylor (1974,1975) respecto a la precisión y exactitud de la “fotometría solar de Volz”, así como las réplicas de Rusell y Shaw (Russell, 1975) y de Volz mismo (Volz, 75) a estas críticas.

Capítulo 3

Radiómetros solares que utilizan LEDs como detectores

En este capítulo se habla sobre el surgimiento y la evolución de los radiómetros solares que utilizan LEDs como detectores y sobre algunas consideraciones importantes para el uso de éstos. También se mencionan algunas ventajas de usar LEDs como detectores en vez de usar los fotodiodos de silicio y los filtros de interferencia.

3.1 Surgimiento y evolución

El antecedente directo de los radiómetros basados en diodos emisores de luz (LEDs) fueron los fotómetros manuales de Volz. Él fue uno de los primeros en proponer, en los años sesenta, el uso de radiómetros pequeños, económicos y de operación manual para mediciones de la extinción atmosférica, la turbiedad debido a aerosoles y el agua precipitable. Los radiómetros tipo Volz utilizaban detectores de silicio y germanio en modo fotovoltaico (y en versiones anteriores fotoceldas de selenio) junto con filtros de absorción o de interferencia y estaban hechos para poder ser apuntados al Sol con una mano. La alineación se realizaba con un soporte en forma de escuadra que servía como mira, y la lectura de datos se realizaba con un amperímetro analógico integrado al instrumento.

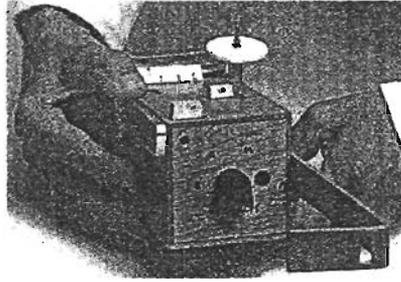


Figura 3.1 Radiómetro de tipo Volz

Los trabajos de Volz (1970, 1974) fueron el punto de partida de los radiómetros solares basados en LEDs, los que en su totalidad adoptaron el diseño y principio de funcionamiento de los radiómetros de portátiles de Volz.

Mims fue el primero en proponer el uso de diodos emisores de luz como detectores espectralmente selectivos en fotómetros de operación manual (Mims, 1990; Mims, 1992), reduciendo aún más su costo y convirtiéndolos en instrumentos económicos adecuados para el establecimiento de una red de monitoreo atmosférico. El fotómetro que Mims reporta en 1992 utilizaba a los diodos en modo fotovoltaico en un convertidor de corriente a voltaje I/V (§4.1), tenía 6 canales espectrales, medía 10 cm de largo y reportaba un campo visual $< 3^\circ$. Con este fotómetro Mims reportó obtener coeficientes de correlación mayores a 0.99 en las gráficas de Langley para cada uno de los canales. Aunque en estos trabajos ya se identificaba la importancia de características de los LEDs como el cambio en su respuesta espectral pico con la temperatura ($0.28 \text{ nm } C^{-1}$), se consideraba que un LED emitía y detectaba con el mismo patrón espectral.

En 1995 Acharya y sus colegas propusieron dos prototipos alternativos de fotómetros manuales que usaban fotodiodos (Acharya, 1995a; Acharya, 1995b), sin embargo las modificaciones fueron sólo al circuito electrónico y no al diseño del instrumento. Éste siguió consistiendo en un envase cilíndrico o rectangular con una apertura frontal cuyo diámetro, y distancia a los diodos determinaban el ángulo de visión. También el sistema de

alineación siguió siendo similar al de Volz. En el primer trabajo los autores utilizaron los LEDs como diodos de retroalimentación de un amplificador logarítmico (Acharya, 1996). Aunque dicha configuración requiere la obtención previa de las características I-V de cada canal espectral, los autores reportaron haber obtenido gráficas Langley con intercepciones más estables con este circuito (0.3%) que las obtenidas con los mismos diodos utilizados en un convertidor I/V (estables alrededor de un 4%). Además utilizaron las lecturas de cero (mediciones en condiciones de oscuridad, con la apertura del fotómetro bloqueada) como forma de monitorear y compensar el aumento en la sensibilidad de los LEDs con la temperatura. Sin embargo, se siguieron considerando las curvas de emisión espectral como las características de detección de los LEDs.

Ese mismo año Acharya y Jayaraman (1995b) propusieron la medición directa de la fotocorriente generada por un diodo (configuración de circuito abierto) como una alternativa para eliminar el circuito electrónico requerido en la configuración de convertidor I-V convencional. Usando la configuración de circuito abierto reportan haber obtenido, en un período de 3 días, constantes del instrumento estables hasta en 2%; así como profundidades ópticas que diferían en 9% con las obtenidas con los mismos detectores usados en la configuración I-V. Aunque en este trabajo se utilizaron fotodiodos y filtros de interferencia como detectores, la configuración de circuito abierto tiene, junto con los trabajos de los mismos autores sobre las características térmicas de los LEDs (Acharya: 1993, 1997a, 1997b), un gran potencial en radiometría con LEDs. Tanto en los trabajos de 1995a como 1995b se trataba de radiómetros con un campo de visión de 9°.

En los años posteriores, Mims y sus colegas construyeron otros prototipos similares al que habían propuesto inicialmente, con el objetivo de adecuar el fotómetro para su uso en la red internacional de monitoreo atmosférico GLOBE. Estas modificaciones incluyeron el uso de cajas de videocasete VHS como estuches del fotómetro y la estandarización de las componentes. El reporte del diseño final fue escrito por Brooks y Mims (2001) en marzo del 2001. En este trabajo se dio especial atención al estudio de los LEDs como detectores y a la validación formal del método de Langley para las características de los radiómetros de

LEDs. Brooks y Mims midieron las curvas de respuesta espectral de varios LEDs y notaron que diferían de sus características como emisores. También realizaron pruebas de la sensibilidad térmica del radiómetro GLOBE y encontraron que en las calibraciones Langley una misma sensibilidad térmica ($V\ C^{-1}$) causa errores porcentuales en $\tau_{\lambda, total}$ que son mayores para cielos despejados (3%) y menores para cielos con $\tau_{\lambda, total}$ mayor (1.8% para una $\tau_{\lambda, total} = 0.25$). Aunque mencionaron algunas opciones para reducir el efecto de la temperatura en el radiómetro GLOBE, los autores establecieron que este radiómetro no estaba hecho para estar expuesto de manera continua a la temperatura de exteriores ni a la luz solar directa.



Figura 3.2 Radiómetro GLOBE

En diciembre del 2001 modifiqué el radiómetro de tres canales construido por Thome y colegas (1994), sustituyendo los detectores de silicio, filtros de interferencia y la circuitería por LEDs operando en modo fotovoltaico (Ruiz Mercado, 2001). Este radiómetro, propiedad de la Universidad de Arizona, tiene un campo visual Ω de 1.8° determinado por un sistema óptico que provee iluminación uniforme sobre el área en que se encuentran los detectores, lo que permite el monitoreo simultáneo de varios canales espectrales. El radiómetro es montado en un tripié y alineado manualmente.

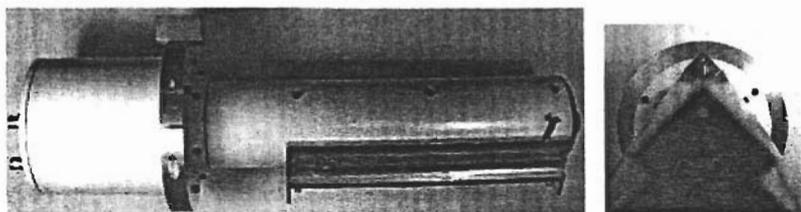


Figura 3.3 Radiómetro de tres canales

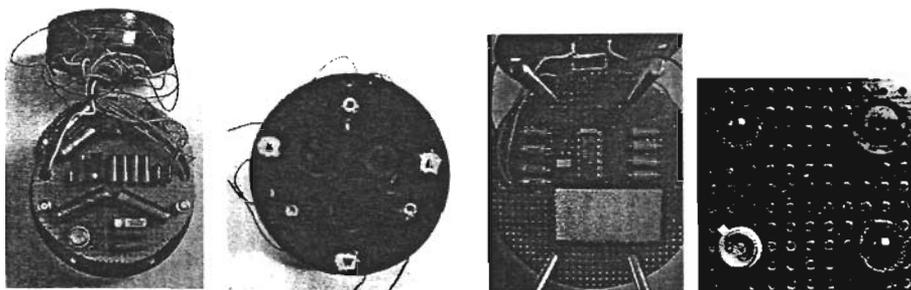


Figura 3.4 Radiómetro de tres canales modificado
Izq: sistema de fotodiodos y filtros de interferencia.
Der: sistema con diodos emisores de luz como detectores.

3.2 Radiometría solar con radiómetros de LEDs

En esta sección hablaremos sobre el uso de los LEDs como detectores ópticos, sobre las ventajas, desventajas y limitaciones al ser usados en radiómetros solares.

3.2.1 El uso de los LEDs como detectores.

La principal ventaja del uso de diodos emisores de luz como detectores son el bajo costo, larga duración y disponibilidad de estos dispositivos. El crecimiento de la industria productora de LEDs ha hecho posible que hoy puedan encontrarse en el mercado LEDs con

picos de detección prácticamente en la longitud de onda deseada o dentro de un rango de hasta 10 nm. Al momento de escribir este trabajo, por ejemplo, existen disponibles en el mercado LEDs emitiendo desde los 350 nm hasta los 1550 nm (Roithner LaserTechnik) y han sido creados para investigación LEDs en los 250 nm. Existe también una amplia variedad de tipos y tamaños de empaque, respuestas angulares y rangos de eficiencias.

Como detectores de luz espectralmente selectivos, el contener en un empaque pequeño y robusto un detector y un medio de selección espectral, los hace particularmente atractivos. Esta cualidad reduce las caracterizaciones necesarias para su aplicación y facilita el proceso de selección, ya que sólo se requerirá conocer una curva de respuesta espectral y un coeficiente de temperatura (en comparación con el uso de fotodiodos de Silicio y filtros de interferencia, en donde se requiere el conocimiento de ambas respuestas espectrales y de ambos coeficientes de temperatura para encontrar el perfil buscado, ver figura 3.4).

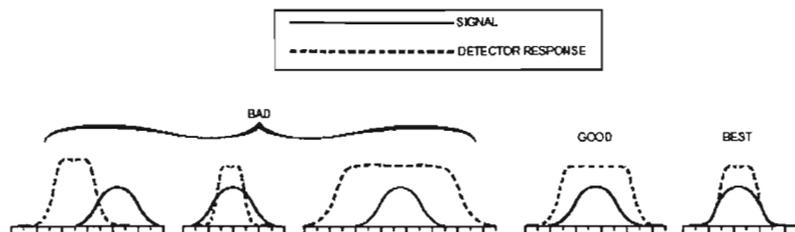


Figura 3.4

La otra parte de la historia de los LEDs como detectores es que, como su propósito original es servir como fuentes de luz, sólo se cuenta con la hoja de parámetros electro-ópticos proporcionada por el fabricante. Por lo que es responsabilidad del usuario realizar las caracterizaciones necesarias para verificar que estos diodos pueden funcionar como detectores para su aplicación. Así como evaluar si a pesar de esto, las ventajas de los LEDs como detectores superan las ventajas de un sistema de foto-detección convencional.

A partir de la creciente demanda de estos diodos como fuentes de luz alternativas para aplicaciones específicas, las empresas fabricantes de LEDs proporcionan con sus productos

hojas de especificaciones cada vez más detalladas, lo que puede ayudar a inferir algunas de sus características como detectores. También la industria de la instrumentación óptica ha respondido a esta demanda desarrollando, particularmente en los últimos 5 años, unidades de medición diseñadas específicamente para la caracterización de los LEDs como emisores.

3.2.2. Consideraciones para el uso de LEDs en radiometría solar

En el caso de la medición de radiación solar con alguno de los métodos descritos en el capítulo 1, los requisitos de la ley de Beer (§1.2) son los criterios que determinarán si un LED es un detector adecuado para esta aplicación, además de los requisitos de operación específicos del diseño. Hay dos aspectos que merecen particular interés: la respuesta espectral ancha de los LEDs (generalmente $100 \text{ nm} \leq \Delta\lambda \leq 25 \text{ nm}$) y su dependencia térmica.

En el trabajo de Brooks y Mims (2001) se muestra que la longitud de onda característica en este tipo de mediciones con LEDs será la *longitud de onda efectiva* (λ_{eff}) y no la longitud de onda pico λ_p ni la longitud de onda dominante λ_d , como podría pensarse. Dichos autores definen λ_{eff} como el promedio ponderado de la respuesta espectral normalizada del LED R_λ y la constante solar $I_{0,\lambda}$ a lo largo del ancho de respuesta espectral del LED $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ (FWHM):

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{\lambda_i} I_{0,\lambda} \lambda_i \Delta\lambda}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda_i} I_{0,\lambda} \Delta\lambda} \quad (3.1)$$

También en este trabajo se muestra que para el caso de los LEDs la expresión (1.11) debe describirse en términos de las longitudes de onda efectivas λ_{eff} :

$$\bar{V}_\lambda = \left(\frac{R_m}{R} \right)^2 \bar{V}_{0,\lambda} e^{\left[m \tau_{\text{atm},\lambda} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{+m \tau_{\text{atm},\lambda}} \right]} + \bar{V}_{\lambda,\text{dif}} \quad (3.2)$$

En donde las barras sobre los voltajes indican mediciones de banda ancha, y las profundidades ópticas efectivas $\tau_{\lambda_{\text{eff}}}$ representan el promedio ponderado de las profundidades ópticas τ_{λ} a lo largo del ancho de la respuesta espectral del detector $\Delta\lambda$:

$$\tau_{\lambda_{\text{eff}}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} I_{0,\lambda} \tau_{R,\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} I_{0,\lambda} d\lambda} \quad (3.3)$$

La diferencia entre los parámetros obtenidos con radiómetros convencionales ($\Delta\lambda \approx 10$ nm) y aquellos derivados con radiómetros de LEDs será mayor en la medida en que las respuestas espectrales de los LEDs utilizados sean más anchas y asimétricas. Estas expresiones deben mantenerse en mente durante el análisis de mediciones realizadas con radiómetros de LEDs. Alternativamente pueden utilizarse los resultados de Thomason y coautores mencionados en §2.3.1 para estimar algunas de las incertidumbres.

La dependencia térmica de los diodos emisores de luz es una fuente de error que puede llegar a afectar de manera importante las mediciones y que no debe ser despreciada sin un análisis previo de las características térmicas de los diodos.

Esta dependencia tiene dos efectos en las señales de salida de los LEDs que son operados como detectores: el incremento en la amplitud de la señal al aumentar la temperatura, y el desplazamiento de la longitud de onda pico (ver §4.3 y §4.4). En este sentido la banda espectral ancha de los LEDs como detectores tiene un efecto “positivo”, ya que permite que el desplazamiento y crecimiento de la respuesta espectral sea visto en forma menos drástica por el intervalo $\Delta\lambda$.

Capítulo 4

Caracterización de los LEDs como detectores

La caracterización de los LEDs como detectores ópticos es una parte fundamental del diseño y la construcción de cualquier instrumento que utilice dichos fotodiodos. Dado que las propiedades de los LEDs como detectores difieren de las que éstos poseen como fuentes luminosas, la información proporcionada por el fabricante (cuando se tiene disponible) se vuelve insuficiente para determinar con precisión el comportamiento de un LED específico dentro del diseño instrumental.

Las características de los LEDs que son relevantes para el diseño del fotómetro autónomo que aquí se presenta están dadas principalmente por los requisitos del método de Langley (linealidad, respuesta espectral) y el principio de operación que le da autonomía al dispositivo (respuesta angular, caracterización térmica). Adicionalmente, al utilizar un arreglo de diodos es importante conocer la repetitividad de los parámetros caracterizados dentro de los diodos escogidos para el arreglo. Si se pretende la construcción de varios dispositivos que utilicen arreglos de LEDs como detectores, es también adecuado realizar un estudio de la repetitividad de los parámetros dentro de un lote de dichos diodos. Para la aplicación aquí descrita la caracterización del tiempo de respuesta de los LEDs en modo de detectores no es relevante, sin embargo, un estudio detallado del tema puede encontrarse en Velasco-Segura (2005).

A continuación se presentan los resultados de las caracterizaciones de la linealidad, respuesta angular, respuesta espectral y respuesta térmica del LED utilizado en el fotómetro solar propuesto. La designación “SMF-SRD-509” se refiere al modelo SSL-LX5093SRD/X de la marca Lumex.

4.1 Pruebas de linealidad para diodos emisores de luz como detectores ópticos.

Los estudios de linealidad para LEDs fueron realizados por el estudiante de física Roberto Velasco Segura y la Dra. Martha Rosete Aguilar en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM. La descripción completa de los trabajos realizados puede encontrarse en Velasco-Segura (2003). En esta sección y en la siguiente hacemos referencia a la metodología y a los resultados obtenidos en el trabajo citado, profundizando sólo en los aspectos que son importantes para el diseño del fotómetro que se propone.

El circuito electrónico utilizado para la caracterización se muestra en la figura 4.1. El diseño 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.

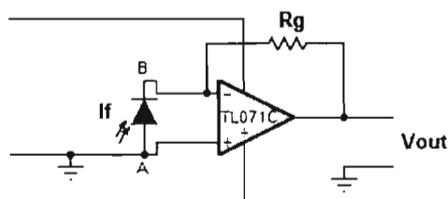


Figura 4.1. Circuito convertidor de fotocorriente a voltaje

La fotocorriente generada en la unión semiconductor del LED (I_f) es amplificada mediante un circuito convertido 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 la resistencia de ganancia R_g :

$$V_{out} = -R_g I_f \quad (4.1)$$

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 sistema completo: circuito amplificador + fotodiodo, al que en este capítulo referiremos como radiómetro. Se utilizó un amplificador operacional convencional (Texas Instruments, TL071) y como resistencias de ganancia se utilizaron resistencias comerciales de $10 \text{ M}\Omega$ (5%). La alimentación dual de +6V y -6V para el amplificador se proveyó mediante un seguidor de voltaje construido con otro TL071 (ver figura 4.2). Para establecer el voltaje de referencia $V+$ se utilizó un resistor variable de $5 \text{ M}\Omega$ (Bourns, 3266-LTC, 10%, 50ppm/C).

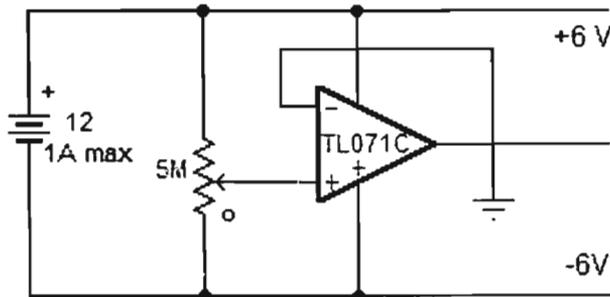


Figura 4.2 Circuito de alimentación.

4.1.1 Arreglo experimental para la medición de linealidad del fotómetro de LEDs

En Velasco-Segura (2003) se estudia la linealidad del fotómetro descrito en el rango de intensidades de hasta 1 década (0.1 a 1 Watt) utilizando el método de atenuación.

El arreglo experimental se muestra en la figura 4.3. 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. El diámetro del haz incidente cubre un área un poco mayor al diámetro del LED.

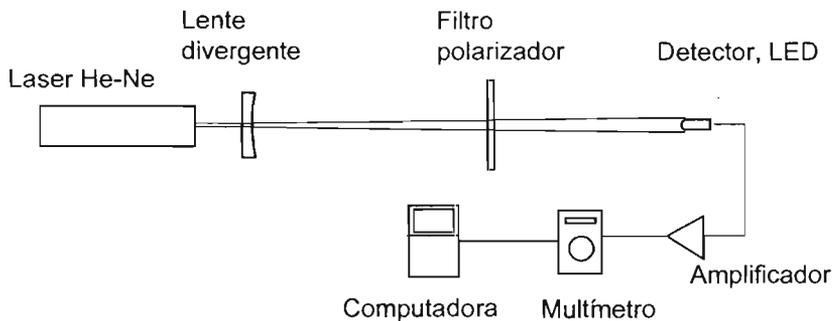


Figura 4.3. Arreglo experimental para la medición de no-linealidad de LEDs iluminándolos uniformemente (Velasco-Segura, 2003).

Las desviaciones del comportamiento lineal en los diodos estudiados son pequeñas, por lo que se cuantifica la no-linealidad (NL) de los LEDs, definida como:

$$NL = \frac{V(\theta) - I_a(\theta)}{I_a(\theta)} \quad (4.2)$$

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

4.1.2 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 la figura 4.4 se muestra la respuesta del SMF-SRD-509 a distintas intensidades de iluminación. En la figura 4.5 se muestra el análisis de no-linealidad para el mismo diodo, junto con el análisis para un fotodiodo comercial de Silicio.

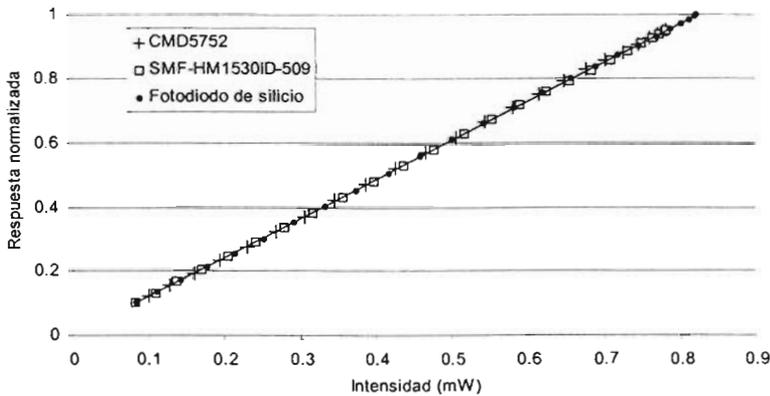


Figura 4.4 Mediciones de voltaje de respuesta para el LED SMF-SRD-509, para el LED transparente CMD-5752 (Chicago Miniature) y para un fotodiodo de silicio, iluminados con un haz de 3mm.

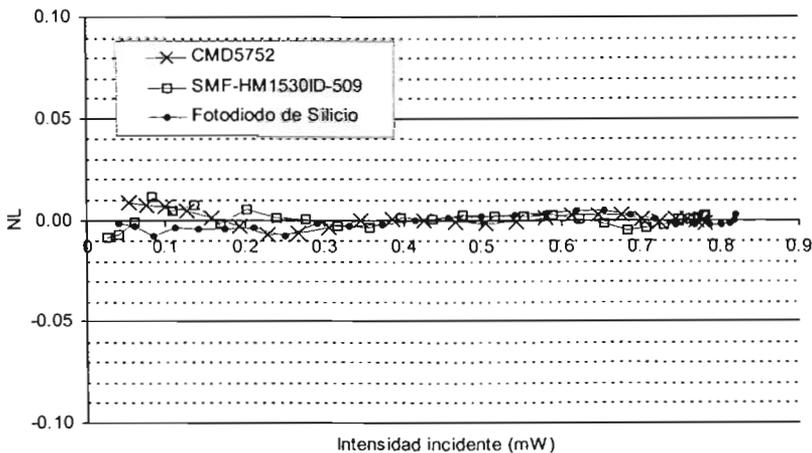


Figura 4.5 Mediciones de NL para el LED SMF-SRD-509, para el LED CMD-5752 y para un fotodiodo de silicio iluminados uniformemente con un haz de 3mm. (Velasco-Segura, 2003).

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 el uso de los diodos emisores de luz como detectores de luz lineales, al menos dentro de este rango de intensidades. Actualmente se trabaja en la caracterización a intensidades de luz mayores y sobre un rango más amplio, sin embargo el desempeño de los radiómetros de LEDs mencionados en el capítulo 3 pronostican valores de NL menores al 1%.

4.1.3 Linealidad bajo condiciones de iluminación continua.

Es importante mencionar que la linealidad de los LEDs ha sido estudiada aquí bajo condiciones de iluminación continua. Reid y colegas (1997) han encontrado que un mismo LED de AlGaAs tiene una respuesta cuadrática a lo largo de dos órdenes de magnitud cuando es iluminado con pulsos ultracortos (80 fs, 1ps), y una respuesta lineal dentro de este mismo rango cuando es iluminado en forma continua. El efecto parece ser una combinación de dos fenómenos: la absorción directa de 2 fotones en el diodo, y la generación de un segundo armónico en el cristal de AlGaAs.

4.2 Caracterización de la respuesta angular de diodos emisores de luz como detectores ópticos.

El patrón de respuesta angular de un LED, al igual que su patrón de iluminación, depende directamente de su geometría, por lo que se espera que los patrones de emisión y detección

sean muy similares. A continuación se presenta una breve revisión de las geometrías típicas de un LED y del proceso de extracción de luz en el mismo. Una descripción más detallada de estos procesos, así como una programa de simulación de la respuesta angular de un LED pueden encontrarse en Rozada (2003) y Ruiz Mercado (2003a).

4.2.1 Geometría de los LEDs y los procesos de extracción de luz y de detección.

En las figuras 4.6 y 4.7 podemos observar una de las geometrías más comunes de LEDs. Nos concentraremos en la descripción y los procesos referentes a ésta, ya que es la utilizada en el radiómetro descrito. Existen otras como las de los empaques T0-46.

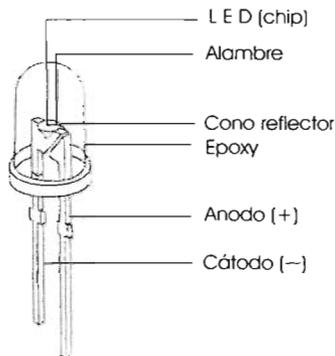


Figura 4.6 Geometría de un LED común de 5mm en empaque T 1-3/4

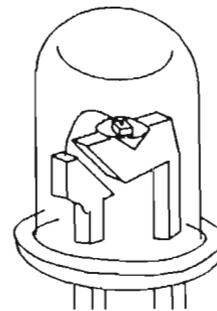


Figura 4.7 Detalle del empaque T 1-3/4

En el caso de la emisión, el patrón de radiación está definido por tres parámetros (Bass, 1995): las posiciones relativas del chip y el 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 el patrón de emisión. En los LEDs difusos, las características del difusor predominan sobre los otros factores.

El chip del LED tiene un área típica de $250 \times 250 \mu\text{m}$. Su parte inferior se encuentra pegada con epoxy conductor a una cavidad cónica reflectora que es parte del cátodo, y la parte superior del chip está conectada al ánodo (ver figura 4.7) mediante un alambrito de oro de

25 μm de largo. Ambas terminales, el chip y el alambre de oro están encapsuladas en epoxy, cuya función además de proteger y mantener unido el arreglo, es incrementar la extracción de luz del chip, determinar la distribución espacial de luz y funcionar como un filtro óptico (en el caso de plásticos epóxicos coloreados).

La luz se genera de manera isotrópica (Bass, 1995) en la unión semiconductor de materiales tipo-n y tipo-p del chip. La luz generada escapa de la unión mediante reflexiones sucesivas dentro del sustrato, y al llegar al 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.

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 y emisión serán los mismos si la caracterización angular se realiza con luz colimada, que cubra toda el área del LED y de la misma longitud de onda y ancho espectral que la luz de emisión. El centro de giro en las mediciones goniométricas deberá ser el chip del LED.

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 los patrones sean muy sensibles a que el eje de giro sea el mismo en ambos casos. En el caso de los LEDs con epoxy transparente, la presencia del alambrito de oro es muchas veces reconocible en los patrones de emisión y detección (ver figura 4.8). La expansión o contracción térmica de este alambre cuando el LED es sometido a temperaturas extremadamente altas (Agilent) o la deformación del epoxy de encapsulamiento podrían ocasionar cambios en la respuesta angular del LED, sin embargo estos serían muy pequeños.

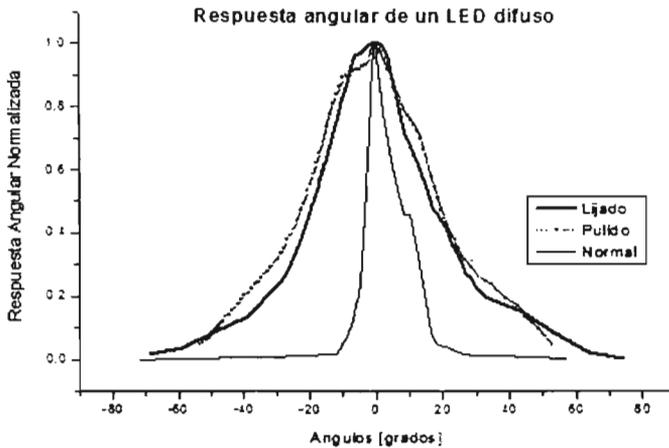


Figura 4.8 Respuesta angular del LED difuso CMD5752
En su forma original, pulido y lijado.

4.2.2 Arreglo experimental para la caracterización de la respuesta angular de LEDs

El arreglo experimental se muestra en la figura 4.9. Tiene la intención de ser el más sencillo posible. Consiste en una lámpara de tungsteno y halógeno (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. Alrededor del LED se colocó una caja negra de cinco caras de unicel (no mostrada en la figura) que tenía la función de obstruir el paso de luz indeseada y de evitar el calentamiento del diodo. 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 LED a caracterizar se colocó en una montura giratoria (Edmund Scientific, NT55-028). El eje mecánico del diodo se alineó con el eje óptico del sistema y el chip del LED se hizo coincidir hasta donde fue posible con el eje de giro de la montura. Las pantallas utilizadas para definir el ancho del haz y el resto de las monturas, fueron construidas en el Taller del

CCADET. El circuito utilizado es el mismo descrito en §4.1 y la adquisición de datos se realizó con el mismo multímetro digital, cuya resolución es de 0.001 mV.

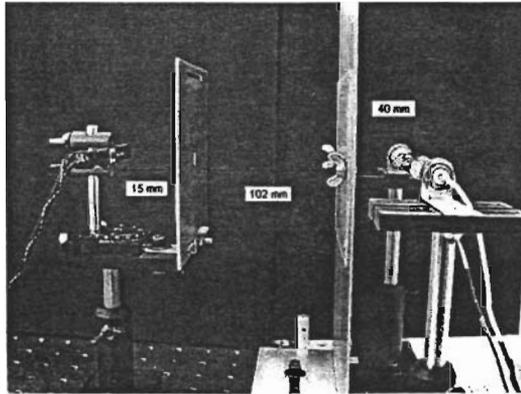


Figura 4.9 Arreglo experimental para la caracterización angular.

La precisión de la mesa giratoria es de 0.01 grados, sin embargo se registraron fluctuaciones debido a ruido en el cable que conecta al diodo con el circuito amplificador (0.05% para ángulos de incidencia cero). La precisión en las mediciones y su repetibilidad están limitadas por la precisión con que el chip del LED puede hacerse coincidir con el centro de rotación de la montura giratoria y por la repetibilidad en la alineación del diodo. En las siguientes figuras se muestra el efecto de ambos factores.

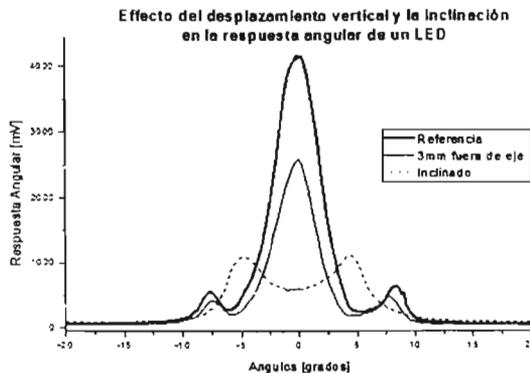


Figura 4.10 Efecto del desplazamiento e inclinación.
LED HPLM-C208-S0000

4.2.3 Caracterización angular para el LED de la marca Lumex modelo

SMF-SRD-509

Las mediciones se realizaron barriendo los ángulos en un solo sentido en intervalos de 5 y 1 grados. Los resultados experimentales obtenidos con el arreglo descrito arriba se muestran en la figura 4.11. El error en la medición de los ángulos es de 0.01 grados.

Uno de los principales objetivos de la caracterización es obtener una expresión analítica de la respuesta angular de los diodos. Esto con el objetivo de que dadas las coordenadas de la fuente de luz (el Sol) respecto a la posición del LED, los cambios en la señal puedan ser separados de su dependencia angular. En la figura 4.11 se muestra también el ajuste de una lorenziana a los datos experimentales. El coeficiente de correlación obtenido para este ajuste es 0.99943 y la lorenziana es de la forma:

$$y = y_0 + \frac{2 \cdot A}{\pi} \cdot \frac{w}{4(x - x_0)^2 + w^2} \quad (4.3)$$

Con:

- $y_0 = -0.07964 \pm 0.00446$ - Offset de la línea base
- $A = 68.59708 \pm 0.63732$ - Area total bajo la curva desde la línea base
- $x_0 = 0.31842 \pm 0.0347$ - Pico central
- $w = 40.39778 \pm 0.25593$ - Ancho total del pico a la altura media (FWHM)
- $R^2 = 0.99943$ Coeficiente de Correlación

El ajuste utiliza sólo los datos en el rango de -50 a +50 grados.

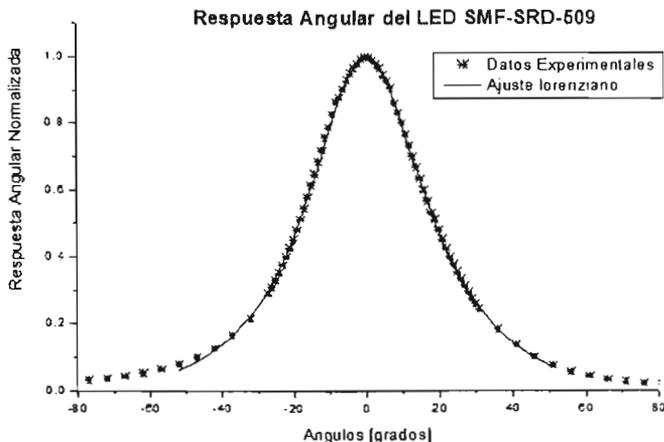


Figura 4.11 Ajuste lorentziano de la respuesta angular del LED SMF-SRD-509.

Para este LED se realizaron también mediciones con un arreglo similar que utilizaba un láser de He-Ne colimado y diafragmas en lugar de las pantallas. Sin embargo los resultados obtenidos con el primer arreglo fueron menos sensibles a la alineación del diodo.

4.3 Caracterización espectral de diodos emisores de luz como detectores.

La respuesta espectral de un diodo emisor de luz 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.

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 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 $I_{\text{patron}}(\lambda)$ generada por un detector patrón expuesto a las mismas condiciones de luz y cuya responsividad espectral $s_{\text{patron}}(\lambda)$ es conocida. El LED y el detector patrón son expuestos en forma alternada. Como el perfil espectral generado por el monocromador puede cambiar cada vez que se realiza un barrido debido a desplazamientos de las piezas ópticas, es necesario colocar un segundo detector de referencia (fijo) cuya señal de salida $M(\lambda)$ es utilizada para compensar la no repetitividad de las mediciones.

Bajo estas condiciones, la responsividad espectral del LED a una temperatura dada (§4.4) estará dada por (Arroyo, 2004):

$$s_{\text{LED}}(\lambda) = \frac{I_{\text{LED}}(\lambda)}{I_{\text{patron}}(\lambda)} \cdot \frac{M_{\text{patron}}(\lambda)}{M_{\text{LED}}(\lambda)} \cdot s_{\text{patron}}(\lambda) \quad (4.4)$$

Aunque existen algunas referencias sobre la fotoconductividad observada en algunas uniones semiconductoras, las primeras caracterizaciones de la respuesta espectral de un LED como detector de la que se tiene conocimiento son las estimaciones hechas por Dasgupta (1993). Posteriormente, se encuentra la excelente caracterización presentada por Eiichi (1998). Los estudios de la respuesta espectral de los LEDs con el objetivo de usarlos para el radiómetro solar propuesto fueron iniciados en el Centro de Ciencias Ópticas (OSC, Optical Sciences Center) de la Universidad de Arizona y continuadas en el CCADET de la UNAM y posteriormente en el Centro Nacional de Metrología (CENAM). Los resultados de las mediciones realizadas en los dos primeros sitios pueden encontrarse en Rosete-Aguilar (2003) y Ruiz Mercado (2003b) respectivamente. En el primer trabajo se utilizó

iluminación directa de un monocromador propiedad del Laboratorio de Óptica Aplicada del CCADET y en el segundo trabajo se utilizó un monocromador OL750 (Optronics Lab, propiedad del Grupo de Percepción Remota del OSC) con una esfera integradora a la salida. El LED utilizado en el prototipo construido fue caracterizado espectralmente en el CENAM por el estudiante de física Matías L. Arroyo y el Dr. Wolfgang A. Schmid en el CENAM (Arroyo, 2004), a cuyo trabajo aquí haré referencia.

4.3.1 Arreglo experimental para la caracterización de la respuesta espectral de LEDs.

El sistema de medición para luz directa se muestra en la figura 4.12. Consta de una fuente sintonizable de luz (lámpara incandescente + monocromador doble, configuración Czerny-Turner) y componentes auxiliares para generar una iluminación directa o difusa de los detectores, componentes para la alineación de los detectores y para la medición de las señales (Arroyo, 2004). El circuito amplificador de los diodos es el descrito en §4.1.

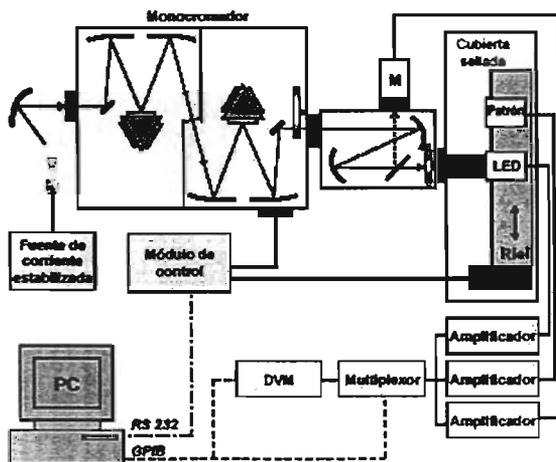


Figura 4.12 Arreglo experimental para la medición de la responsividad espectral. (Arroyo, 2004)

El LED y el detector patrón se exponen en forma a lterna a una iluminación completa y homogénea. De acuerdo a Arroyo y coautores (2004), la incertidumbre de las mediciones

de la responsividad espectral está en el orden del 1% ($k=2$), pero se incrementa en el extremo “rojo” del espectro debido al alto coeficiente de temperatura de los LEDs.

Es posible realizar mediciones con iluminación difusa colocando una esfera integradora a la salida del monocromador, sin embargo es necesario conocer la responsividad espectral del detector patrón de silicio $s_{\text{patron}}(\lambda)$ bajo iluminación uniforme.

4.3.2 Caracterización espectral para el LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.

De acuerdo a las especificaciones del fabricante, este LED de AlGaAs (doble heterounión) tiene un pico de emisión $\lambda_{\text{pico}} = 660$ nm. En la figura 4.13 se muestran los patrones espectrales de emisión y detección obtenidos. Se encontró un pico de detección de 642 nm ($\Delta\lambda=62$ nm) en dos LEDs y de 644 nm ($\Delta\lambda=60$ nm) en otro. La variación en la magnitud de la sensibilidad espectral observada fue de hasta 15% en un grupo de tres LEDs como se muestra en la figura 4.14.

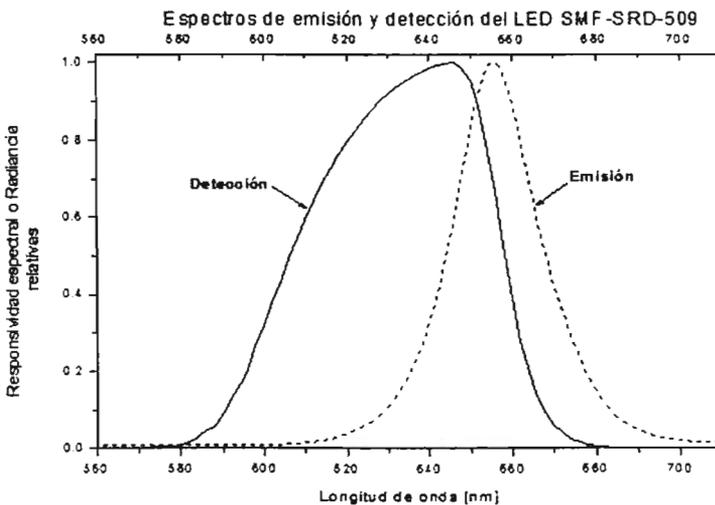


Figura 4.13 Comparación de la responsividad espectral $s(\lambda)$ y la radiancia $M(\lambda)$ relativas del LED SMF-SRD-509 (datos de Arroyo, 2004).

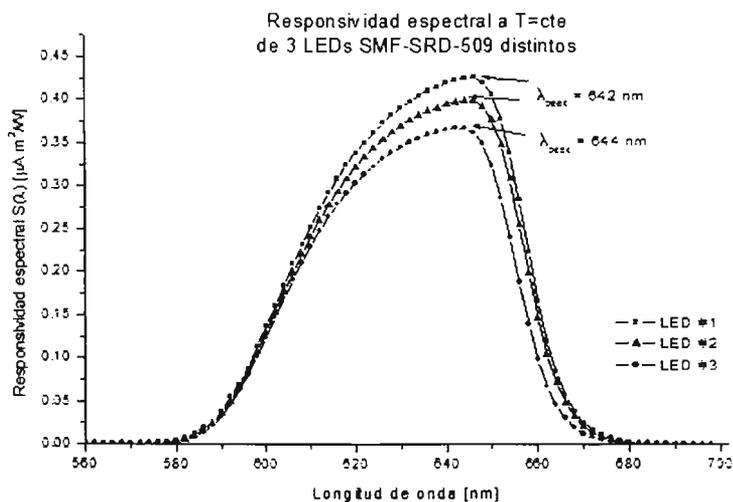


Figura 4.14 Variación de la respuesta espectral de tres LEDs distintos del LED SMF-SRD-509 (datos de Arroyo, 2004).

4.4 Caracterización de la respuesta térmica de diodos emisores de luz como detectores ópticos.

Al estar compuestos por materiales semiconductores, cuya movilidad y concentración intrínseca de cargas son función de la temperatura, los diodos emisores de luz exhiben características opto-electrónicas que dependen de la temperatura de operación. En el caso de los LEDs como detectores, el efecto térmico causa una responsividad mayor, un desplazamiento de la longitud de onda pico hacia longitudes de onda más grandes y un ensanchamiento del ancho de banda espectral. Estas características fueron reportadas en Ruiz Mercado (2003b) y estudiadas a detalle por Arroyo y coautores (Arroyo, 2004), a cuyo trabajo nos referiremos en esta sección.

Al utilizar los LEDs para mediciones de radiometría solar, es fundamental conocer la dependencia térmica de $S(\lambda)$, λ_{pico} , y $\Delta\lambda$, principalmente la de los dos primeros términos. Aunque el amplio ancho de banda espectral de los LEDs como detectores ($\sim 60 \text{ nm}$) hace que $S(\lambda)$ tenga una respuesta térmica menor a la observada en detectores con anchos de

banda espectral mas estrechos (§3.2), el desconocimiento o no corrección de este efecto puede traducirse en el registro de profundidades ópticas menores a las reales. Es importante también conocer los cambios que λ_{pico} y $\Delta\lambda$ (y por tanto de λ_{eff} , ver § 3.2.2) pudieran tener con la temperatura, para poder calcular $\tau_{\lambda,R}$ correctamente y para poder evitar las bandas de absorción de gases (§1.2).

En el caso del diseño de radiómetro autónomo presentado, el estudio de las características térmicas de los diodos es en particular importante si el dispositivo pretende operar continuamente en el exterior. Menciones aisladas a algunos aspectos del comportamiento térmico de los LEDs como detectores pueden encontrarse en Mims (1992) y en Brooks (2001), aunque no son de ninguna forma estudios completos como el de Arroyo (2004). Adicionalmente los trabajos de Acharya (1993, 1996b, 1997) pueden resultar útiles.

4.4.1 Arreglo experimental para la caracterización de la respuesta térmica de LEDs

El circuito amplificador utilizado es el mismo descrito en §4.1 y el arreglo experimental para medir la respuesta térmica de los LEDs es el que se describió en §4.3.1 y que se muestra en la figura 4.12, utilizando luz directa. El método para controlar y medir la temperatura del LED es el inicialmente descrito por Reygadas (2002) con el controlador de corriente modificado por Schmid y colegas (Arroyo, 2004), permitiendo una estabilidad de $\pm 1^\circ\text{C}$ en el rango de 20°C - 120°C .

El detector de temperatura está compuesto por otro LED al que se le ha hecho una perforación muy pequeña por la parte trasera hasta llegar a la posición del cono reflector. A través del orificio se colocó en forma ajustada un termopar calibrado. Como se muestra en la figura 4.15, la resistencia metálica es enredada en el cilindro de aluminio, el cual tiene dos orificios para que se coloquen el LED bajo prueba y el LED-termómetro.

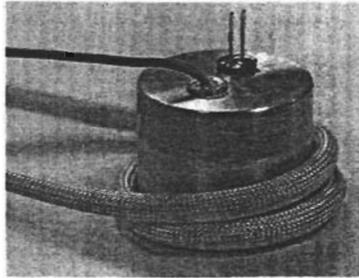


Figura 4.15 Sistema para controla y medir la temperatura de los diodos emisores de luz estudiados.

Una de las dificultades encontradas durante la caracterización por este método es el largo periodo de tiempo necesario para alcanzar el equilibrio térmico y lograr mediciones estables. Por otro lado, como reportó Reygadas (2003), es importante que durante la caracterización no se exceda la temperatura de operación recomendada por el fabricante ya que se modifican las características térmicas de los LEDs.

4.4.2 Caracterización térmica del LED de la marca Lumex modelo SMF-SRD-509.

Las caracterizaciones térmicas del LED utilizado en el prototipo fueron realizadas en el CENAM (Arroyo, 2004). En la figura 4.16 se muestran los resultados para el LED #1.

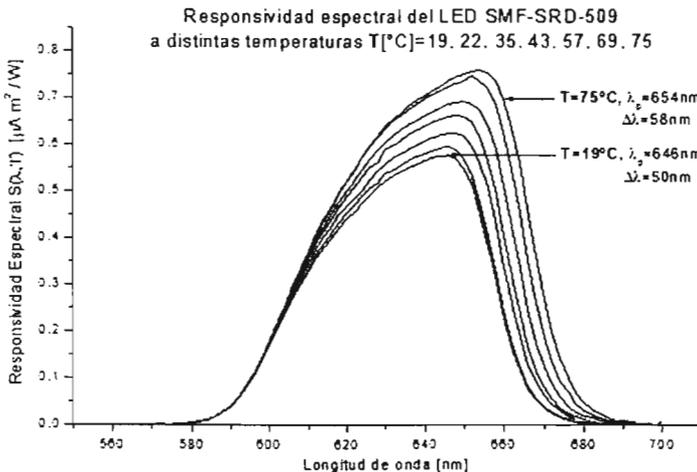


Figura 4.16 Respuesta térmica del LED#1 SMF-SRD-509

Se encontró que la fotocorriente generada en el LED varía linealmente con la temperatura de operación. En el caso del espectro solar, el coeficiente térmico calculado para el LED#1 es $C_T = 31 \text{ nA}/^\circ\text{C}$ (Arroyo, 2004). Adicionalmente, la longitud de onda pico mostró una dependencia exponencial con la temperatura.

Capítulo 5

Diseño y principio de funcionamiento.

El diseño utiliza un arreglo de LEDs (SSL-LX509SRD, Lumex) como detectores colocados a ángulos cenitales fijos. Cada LED tiene un campo visual rectangular alargado en la dirección azimutal y estrecho en la dirección cenital, lo que permite el registro diario de radiación solar en forma autónoma por periodos de tres meses. Si la apertura rectangular es lo suficientemente estrecha en la dirección azimutal para comprender únicamente al disco solar, la captación de luz aureolar difusa obtenida con este campo visual puede ser menor a la de otros fotómetros de LEDs de operación manual.

El objetivo principal del fotómetro es la obtención de profundidades ópticas instantáneas $\tau_{\lambda, \text{total}}(t)$ con el método de intercepción conocida y su calibración puede realizarse con cualquiera de los tres métodos descritos en §1.2. La unidad está compuesta por la apertura de entrada, el arreglo de LEDs, el circuito de conversión de señal, el sistema de monitoreo de temperatura, el sistema multiplexor de canales, el sistema de adquisición y almacenamiento de datos y la batería de alimentación. En las siguientes secciones se exponen los conceptos necesarios para entender el principio de operación del instrumento.

5.1 Geometría de las trayectorias solares.

Para un observador fijo en la superficie de la Tierra, el Sol describe diariamente trayectorias curvas que inician en el Este y terminan en el Oeste. En este sistema cuyo origen es el punto de observación, el *ángulo de elevación solar* mide la altura angular del Sol a partir del horizonte, siendo positivo arriba del horizonte, negativo debajo de él y 90° arriba del observador. Su complemento es el *ángulo cenital solar*, que es cero justo arriba del observador (el cenit) y 90° en el horizonte. Por otro lado, el *ángulo azimutal solar* mide la posición angular del Sol alrededor del horizonte, siendo el Norte geográfico 0° , el Este 90° , el Sur 180° y el Oeste 270° .

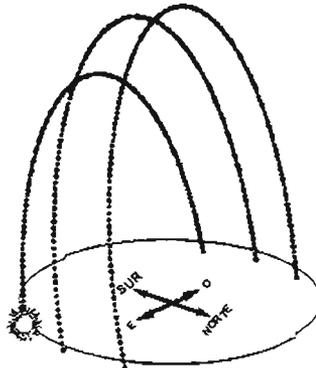


Figura 5.1 Trayectorias solares

Los ángulos solares azimutales y cenitales pueden calcularse a partir de las coordenadas geográficas y temporales del observador con algoritmos astronómicos como los desarrollados por Meeus (Meeus,1998). El cálculo preciso de los ángulos solares no es una tarea trivial, ya que deben tomarse en cuenta detalles como los segundos bisiestos, la declinación solar y la refracción atmosférica. En este trabajo utilizamos el código desarrollado en el Grupo de Percepción Remota (RSG) del Centro de Ciencias Ópticas (OSC) de la Universidad de Arizona. Alternativamente, pueden encontrarse en internet varios programas para calcular los ángulos y/o trazar las trayectorias del Sol, como los

proporcionados en los sitios electrónicos de NREL, de la NOAA o el Laboratorio de Monitoreo de Radiación Solar (SRML) de la Universidad de Oregón.

Las trayectorias solares pueden presentarse gráficamente en proyecciones estereográficas y cilíndricas entre otras. Las proyecciones cilíndricas son gráficas en coordenadas rectangulares del ángulo de elevación solar como función del ángulo azimutal.

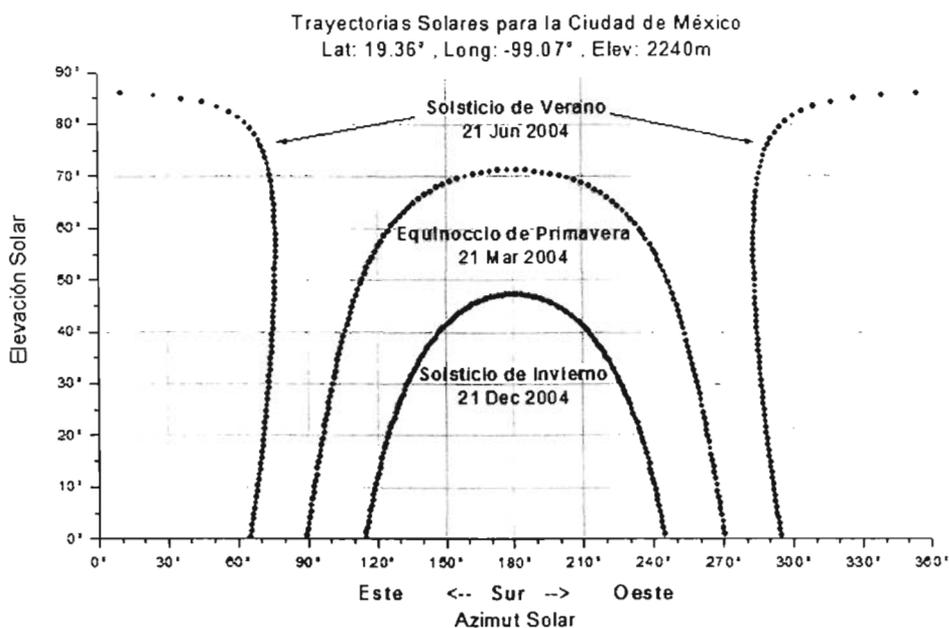


Figura 5.2 Proyección cilíndrica de las trayectorias solares para la Ciudad de México.

Las proyecciones estereográficas son gráficas en coordenadas polares del ángulo cenital como función del ángulo azimutal, y puede ser pensada (más o menos) como una fotografía del cielo tomada con un lente “ojo de pez” de 180° que apunta directamente al cenit.

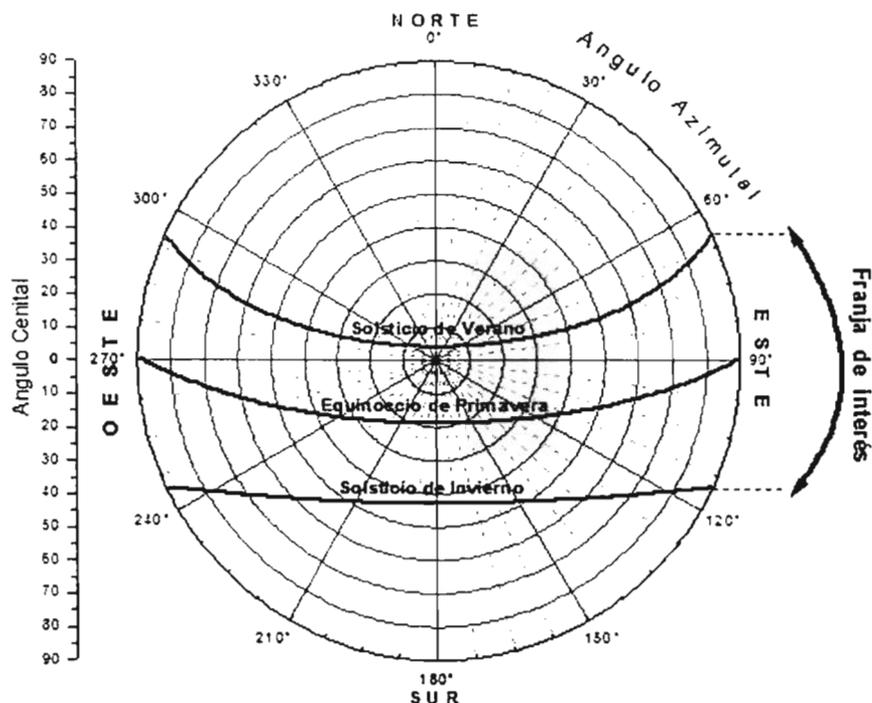


Figura 5.3 Proyección estereográfica de las trayectorias solares para la Ciudad de México. La flecha negra muestra la franja de interés.

En una proyección estereográfica los círculos concéntricos son líneas de elevación constante y los radios son líneas de azimut constante, el cual es medido en el sentido de las manecillas del reloj. En ambas proyecciones se indica el Norte geográfico (o Norte verdadero), que diferirá del Norte medido con una brújula (Norte magnético) por una cantidad denominada *declinación magnética*. La NOAA tiene una herramienta disponible en su página electrónica que permite calcular este parámetro (<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/struts/calcDeclination>).

En las figuras 5.2 y 5.3 se han graficado los ángulos cenitales y azimutales obtenidos con el código del RSG para los solsticios de verano (21 de junio), invierno (21 de diciembre) y

para el equinoccio de primavera (21 de marzo) del 2004 para las coordenadas geográficas de la Ciudad de México. La figura 5.1 muestra las mismas trayectorias.

En la figura 5.3 puede verse que al rastrear el recorrido solar anual el área de interés (aquella franja comprendida entre los equinoccios de invierno y verano), no es todo el hemisferio celeste, sino aproximadamente un tercio de éste.

5.2 Distribución de luz aureolar difusa alrededor del Sol.

La cantidad de luz difusa que llega al detector depende del campo visual de los detectores y de la distribución de dispersores en la atmósfera. La radiación circunsolar es principalmente ocasionada por la dispersión sencilla de aerosoles, cuya función de fase en el modelo de dispersión de Mie predice la dispersión predominantemente en la dirección de la luz incidente. Esto mismo explica el rápido desvanecimiento de la radiación circunsolar conforme nos alejamos del Sol.

La distribución de radiación circunsolar está controlada esencialmente por la profundidad óptica del aerosol $\tau_{\lambda,a}$. Su contabilización es importante en el diseño de instrumentos que miden o utilizan luz solar directa, por lo que su observación y medición ha llamado la atención de varios autores (Green, 1971; Thomalla, 1983; Vittitoe, 1981; Grether, 1978). En la figura 5.4 se muestran algunos patrones de radiación circunsolar medidos a partir del centro del disco solar, el cual subtende un ángulo total de 0.5° aproximadamente (0.25° en la gráfica). En la figura también puede observarse la magnitud de la parte más intensa alrededor del disco, denominada *aureola*, para dos días con profundidades ópticas distintas.

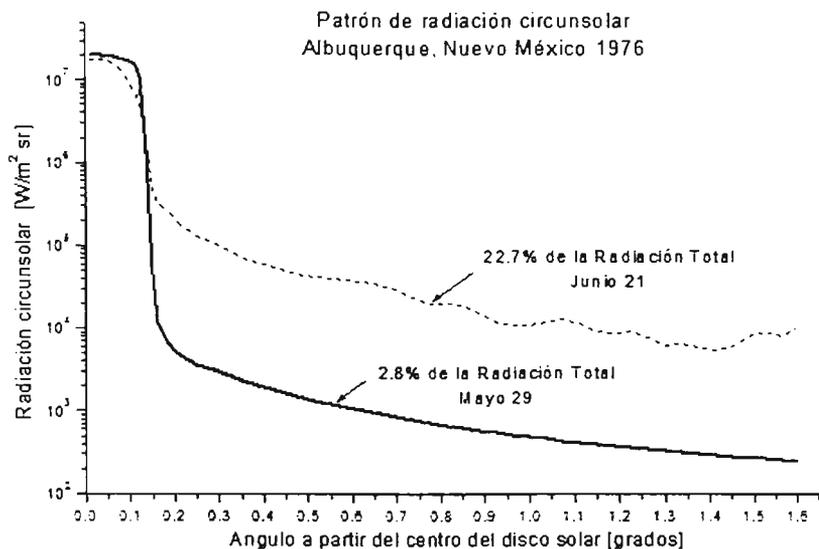


Figura 5.4 Radiación solar circunsolar.
(Datos de la base de datos reducida de LBL)

Aunque la radiación circunsolar detectable puede extenderse hasta un diámetro angular de 40° , la zona aureolar está generalmente comprendida en un rango más pequeño y decae en forma rápida, lo que permite la consideración de un campo de visión como el propuesto por Reygadas (2002): alargado en la dirección azimutal pero casi tan estrecho como el disco solar en la dirección cenital. De manera que, aunque en la dirección azimutal se colectaría más luz que con una apertura convencional, en la dirección cenital podría colectarse menos que con un campo visual circular más ancho que el disco solar.

Para analizar la cantidad de radiación circunsolar que captaría un detector con tal apertura y compararla con la cantidad de luz difusa detectada con una apertura circular convencional, puede realizarse el siguiente cálculo: encontrar la expresión analítica de la curva de radiación circunsolar (como la de la figura 5.4) y obtener el volumen del sólido de revolución integrando sobre un dominio rectangular (apertura propuesta) y sobre un dominio circular (apertura tradicional). La expresión analítica puede obtenerse de los modelos propuestos por Thomalia y coautores (1983) para distintos modelos de aerosol

atmosférico, de los ajustes hechos por Vittitoe (1981) o realizando ajustes (suma de gaussianas o por tramos) a los datos. Los datos pueden ser tomados de la base de datos reducida del NREL (Laboratorio de Energía Renovable, http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/circumsolar) o bien de mediciones realizadas directamente en el sitio de interés. Algunas de las integrales pueden simplificarse utilizando el Teorema de Pappus para sólidos de revolución o la “fórmula de los tres niveles” para encontrar volúmenes (Ize, 2000).

5.3 Geometría del arreglo de LEDs y principio de funcionamiento.

En §2.3 se discute la preferencia a realizar mediciones con ángulos visuales reducidos para evitar la detección de luz difusa. Sin embargo, como Reygadas (2002) hizo notar, con un arreglo de detectores con ángulos de visión pequeños sería casi impracticable cubrir toda el área de interés para obtener un monitoreo casi continuo de la radiación solar. En un hemisferio de superficie unitaria por ejemplo, un cono angular de 3° concéntrico al hemisferio encierra un área sobre el mismo de aproximadamente de 3.4×10^{-4} unidades. Lo que requeriría de casi 1000 detectores para cubrir un tercio de la semiesfera.

Aún cuando se espaciaran los detectores para reducir su número y se realizaran únicamente mediciones diurnas o nocturnas para llegar, por ejemplo, a 100 detectores, este número continua siendo impráctico para los fines y el marco en que se propone el diseño de este radiómetro. En cualquier caso, la cobertura azimutal mínima necesaria para que el arreglo de LEDs logre un monitoreo autónomo es la franja mostrada en la figura 5.3.

El número de diodos necesarios para cubrir en forma autónoma un área de interés dada puede reducirse de dos formas:

- (1) reduciendo el número de mediciones diarias, y/o
- (2) ampliando el rango angular de detección de cada diodo.

En el estudio de los aerosoles son pocas las aplicaciones que requieren de un monitoreo segundo a segundo de la radiación solar (Thome, Muhlia, comunicación personal), lo que permite realizar lo primero. Lo segundo puede lograrse si la forma de la respuesta angular de los diodos es conocida, lo que permite la detección y futura corrección de mediciones en un rango angular más amplio (ver figura 5.5).

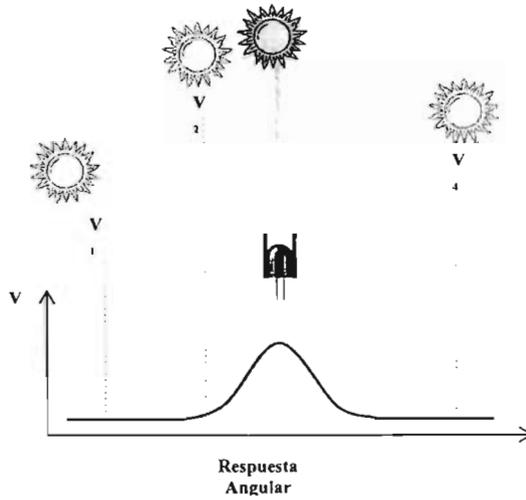


Figura 5.5 Uso de la respuesta angular de un LED para ampliar el rango de detección.

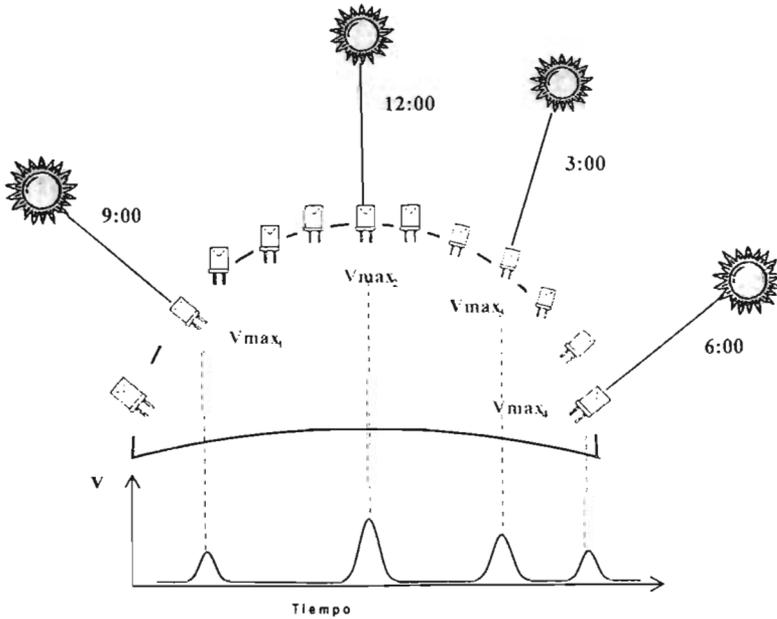


Figura 5.5 Posible configuración del arreglo de LEDs como detectores para el radiómetro solar.

Una geometría posible consiste en la colocación de diodos en posiciones fijas conocidas sobre una estructura hemisférica o una cinta curva. Los LEDs (sus ejes ópticos) pueden estar apuntando en direcciones cenitales fijas, de manera que la posición azimutal solar puede ser determinada con la respuesta angular del LED, como en la figura 5.6.

La mayoría de los diodos difusos tienen una respuesta angular (FWHM, §2.2) de aproximadamente 30° . Una apertura de tal dimensión permitiría en principio realizar mediciones diurnas con sólo tres o cuatro diodos por coordenada cenital como se muestra en la figura 5.6, sin embargo entraría una gran cantidad de luz difusa al detector.

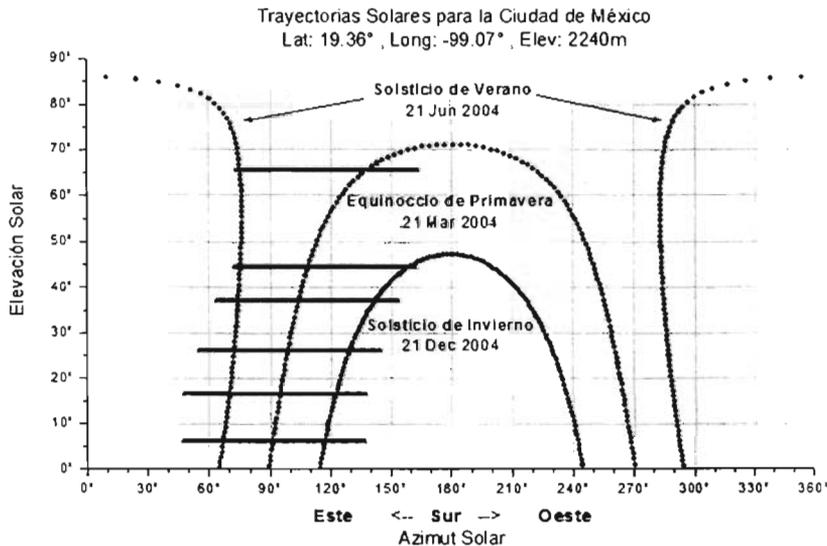


Figura 5.6 Mediciones diurnas con 4 diodos, cada uno con un campo visual de 30° . Las líneas grises indican la cobertura azimutal de los diodos a distintas elevaciones.

Dado que el rango de 30° es sólo aprovechado en la dirección azimutal, una forma de minimizar la captación de luz difusa debida a una apertura circular de tal dimensión es la utilización de una apertura como la propuesta por Reygadas (2002), alargada en la dirección azimutal pero lo más estrecha posible en la dirección cenital.

La construcción de una estructura que proporcione dicha apertura (figura 5.9) no es sencilla. Una alternativa a la estructura en forma de abanico es la utilización de una pantalla que proporcione la misma apertura. Una estructura cilíndrica por ejemplo, en la que el LED se encuentra colocado en el eje y a la misma altura de la rendija, será equivalente al baffle retrorreflector en forma de abanico.

El arreglo construido consta de 7 LEDs colocados a ángulos cenitales fijos (figura 5.7). Los 5 LEDs con ángulos cenitales más grandes (17° a 36°) permiten la medición a masas de aire entre 1.7 y 3.3 igualmente. Los otros 2 LEDs (12° y 6°) realizan mediciones cercanas al horizonte. El número de LEDs en este primer prototipo estuvo determinado por el número de canales del sistema de adquisición de datos.

El objetivo de utilizar esta distribución en el prototipo es poder tener un grupo de mediciones a masas de aire pequeñas que sea menos sensible a las fuentes de error (§2.3) del sistema. Los dos valores de masas de aire grandes se incluyeron para ver la estabilidad de las mediciones cerca del horizonte y para analizar la posibilidad de realizar calibraciones de Langley con la serie de datos completa.

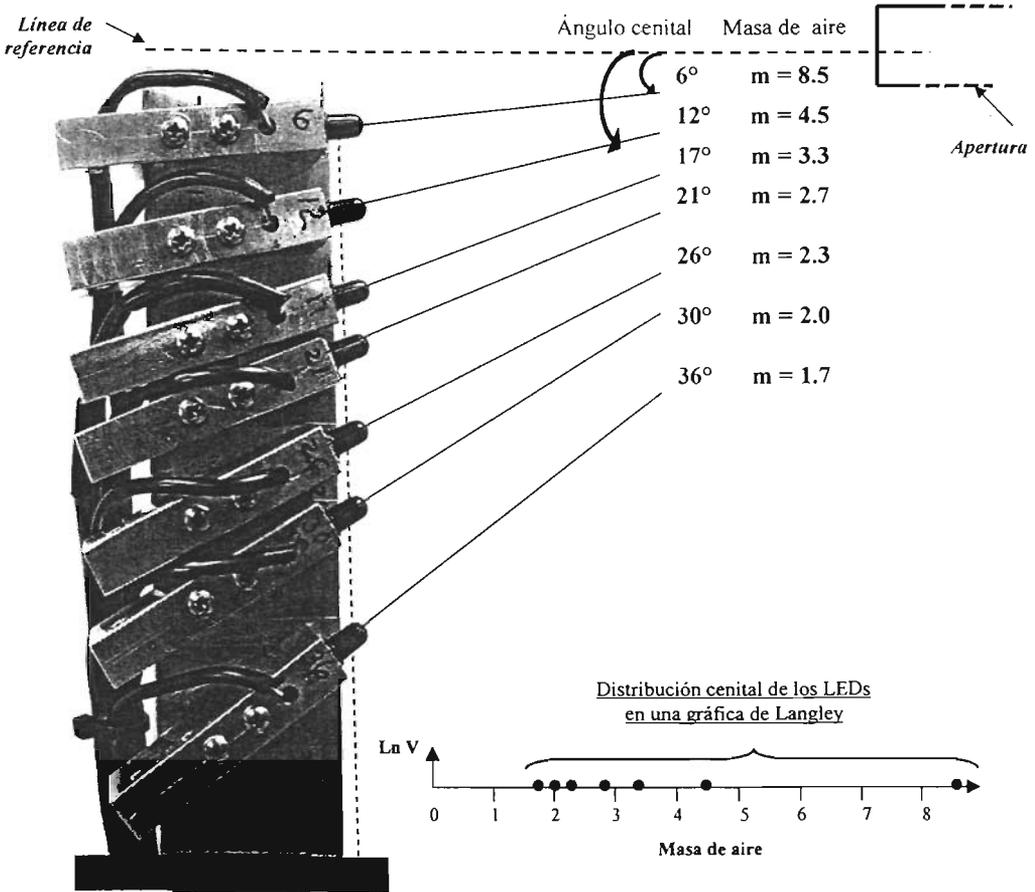


Figura 5.7 Geometría del arreglo de LEDs utilizado en el prototipo.

Además de tener distintos ángulos de inclinación, los diodos deben estar alineados de manera que el punto de giro del ángulo visual de cada LED (el cono reflector que contiene al chip, ver §4.2.1) se encuentre sobre un mismo eje vertical (línea roja punteada en la figura 5.7) perpendicular a la base. Este eje es a su vez el eje de la estructura cilíndrica que contiene al instrumento y que define el ángulo visual de los detectores.

5.4 Campo visual rectangular

El campo visual geométrico del sistema está determinado por las dimensiones de la apertura rectangular, el radio de la estructura cilíndrica (r), el diámetro del área de detección de los LEDs, sus respuestas angulares y sus ángulos de inclinación. El ancho de la apertura es de 5.5 ± 0.25 mm, ligeramente mayor que el diámetro de los LEDs utilizados (5.0 mm).

El campo visual azimutal geométrico (cono de aceptación de luz Ω) de los LEDs utilizados es un poco menor a 180° (§4.2.1), siendo el reflector interno del LED el ángulo de giro (ver figura 5.8). Por simplificación, representaremos la zona de detección de los diodos por un área circular de diámetro 5 mm colocada a la altura del reflector del LED. De manera que los campos visuales geométricos del sistema están determinados por una especie de “abanicos tubulares” o tubos aplastados y alargados en la dirección azimutal que van de la zona de detección del LED al contorno de la apertura rectangular. En la figura 5.9 se muestra un la geometría del campo visual descrito.

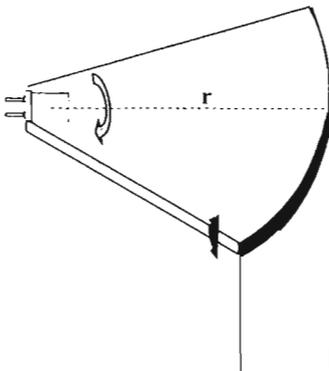


Figura 5.8 Ángulo visual propuesto: alargado azimutalmente, estrecho en dirección cenital.

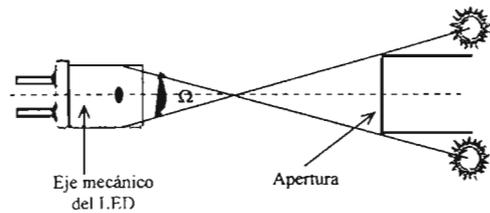


Figura 5.9 Determinación del cono de aceptación de luz cenital Ω .

El Sol es una fuente luminosa puntual lo suficientemente alejada, por lo que sus rayos pueden considerarse paralelos. Los rayos que pasan a través de la apertura proyectan un

área rectangular de iluminación que vista en el plano de la zona de detección de cada LED, decrece como $1/\cos^2\theta$ ($1/\cos\theta$ en cada lado).

El campo visual azimutal de los LEDs en el arreglo esta determinado por el radio r y el largo de la apertura. Es el mismo para cada LED cuyo eje de giro esté alineado con el centro de la estructura cilíndrica. La determinación exacta del campo visual cenital es un poco más compleja. El cono de luz aceptado en esta dirección por el LED puede determinarse con suficiente precisión con la aproximación $\theta = 2*\tan^{-1}(d/r)$ donde d es el diámetro del LED. Sin embargo, para que el ángulo visual pueda determinarse como en la figura 5.7, el ancho de la franja luminosa debe cubrir totalmente el área de detección de cada LED. El LED a $\theta=26^\circ$, mostrado en la figura 5.4, es el último que cumple con esta condición ($5.5 \text{ mm} \times \cos 26^\circ = 4.94 \text{ mm}$), por lo que los campos visuales de los LEDs a 30° y 36° no podrán ser comparados con el resto de los diodos.

Capítulo 6

Construcción del primer prototipo.

6.1 Descripción del instrumento.

El prototipo construido se muestra en la figura 6.1. Consta de la estructura cilíndrica que aloja en su interior el arreglo de LEDs, la electrónica para acondicionar la señal y el sistema de adquisición de datos. La estructura cilíndrica (McMaster-Carr, 3150T8) mide aproximadamente 50 cm de altura y tiene un radio de 157 cm. Está originalmente hecha de cartón, con tapa y base de acero galvanizado. La apertura rectangular mide aproximadamente 83×5.5 mm. El interior de la estructura se pintó de negro para evitar reflexiones internas de la luz que entra por la apertura, y el exterior se pintó de blanco para aislar térmicamente el interior. En ambos casos se utilizó pintura y resina para fibra de vidrio a modo de proporcionar resistencia al agua.

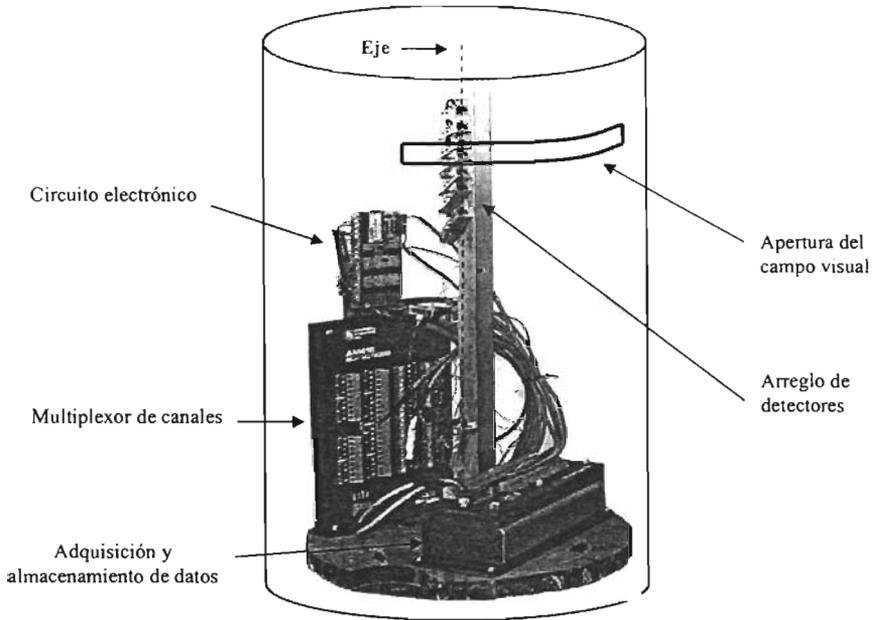


Figura 6.1 Prototipo construido.

Los LEDs se encuentran montados por su base en estructuras de aluminio que rodean las terminales de los diodos, proporcionando un blindaje electrostático a los mismos. El monitoreo de la temperatura de cada uno de los LEDs se realiza con un termopar (tipo T, cobre y estaño) colocado en el ánodo (patita larga del LED). El termopar fue pegado con epoxy sin hacer contacto eléctrico con la terminal del LED. Los cables del termopar pueden verse en la figura 6.2.

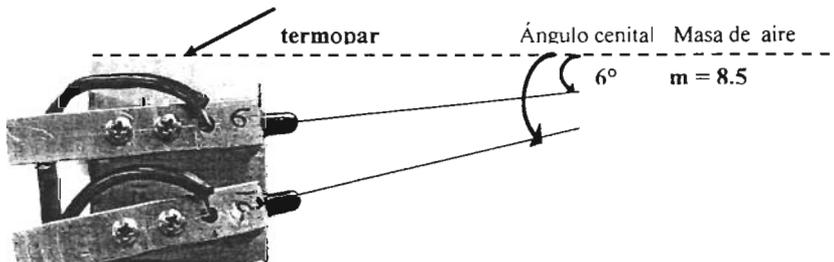


Figura 6.2 La temperatura de cada LED fue monitoreada con termopares.

La temperatura que desea monitorearse es la del chip del LED, por lo que es preferible colocar el termopar en la terminal que contiene al cono reflector ya que es mínima la cantidad de calor que fluirá a través del alambrito de oro hacia la otra terminal (Agilent, 2001). En la mayoría de los LEDs la terminal unida al chip es el cátodo (extremo corto, §4.2.1), sin embargo para los diodos de AlGaAs, el chip está unido al ánodo o terminal positiva.

Sobre la base de la estructura cilíndrica descansa una placa circular de acrílico a la que se fijaron el datalogger, multiplexor y la estructura que contiene el arreglo de LEDs. A través de ambas bases se colocaron tres tornillos y un nivel de burbúja para proporcionar el sistema de alineación. Toda la electrónica, sistema de almacenamiento de datos y cables necesarios están contenidos en el cilindro, del cual solo sale el cable que va a la batería de 12 V, cuya tierra se deja flotada para evitar ruido debido a un “ground loop”.

6.2 Circuito electrónico y adquisición de datos.

El diagrama del convertidor de corriente a voltaje (§4.1) utilizado se muestra a continuación en la figura 6.3.

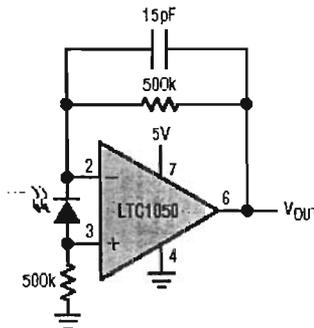


Figura 6.3 Convertidor de corriente a voltaje.

Se utilizó un convertidor DC/DC (Calex, 24D12.250HW) para acondicionar y estabilizar el voltaje de alimentación de la batería (12 V, plomo-ácido). Los filtros mostrados en la

figura 6.4 se usaron en la entrada y salida del convertidor para obtener niveles de bajo ruido a la salida de la fuente de alimentación.

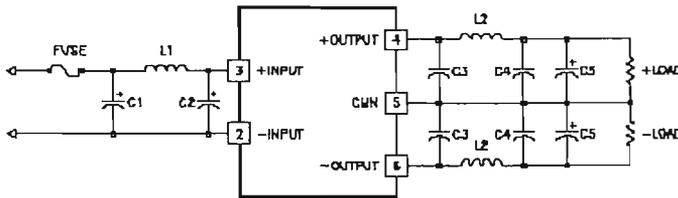


Figure 6.4 Filtros a la entrada y salida del convertidor DC/DC.

Como el instrumento propuesto debe ser diseñado para operar de manera autónoma en exteriores, la selección de partes está basada en la estabilidad y bajo coeficiente térmico de las componentes electrónicas. Se utilizaron resistencias de alta precisión de película metálica (Vishay, PTF-65, 5 ppm/°C) como resistencias de ganancia, así como capacitores e inductores de precisión para el filtro del convertidor (LPC4045L-TED2R2M, Koa Speer). El amplificador operacional “chopper-estabilizado” LTC1050 de Linear Technologies fue escogido para convertidor de corriente a voltaje por las referencias que se tenían de su buen desempeño. El “commutating-auto-zero” de este amplificador reduce las variaciones en el voltaje de compensación (offset voltaje) así como la corriente de oscuridad (Harrison, 1994). En el apéndice A se muestra la lista de parte usadas.

El circuito se construyó en un tarjeta de circuito impreso (9.5 × 6.5 cm) de 2 capas, diseñada específicamente para este propósito. El circuito está compuesto por 8 convertidores de corriente a voltaje, un convertidor DC/DC y los respectivos capacitores de desacoplamiento. La imagen de la tarjeta se muestra en la figura 6.4. El dibujo de las pistas de las dos capas del circuito así como la capa que indica la disposición de los elementos del circuito se muestran en las figuras 6.5 (a,b,c) como referencia. La capa superior contiene las conexiones entre componentes y la capa inferior las conexiones a tierra. Ambos trazos son perpendiculares y las líneas a tierra son más anchas que las uniones entre componentes.

Los voltajes de salida de la tarjeta son conectados al sistema de adquisición de datos (o datalogger) mediante cable aislado, cuya tierra es conectada a la tierra del datalogger.

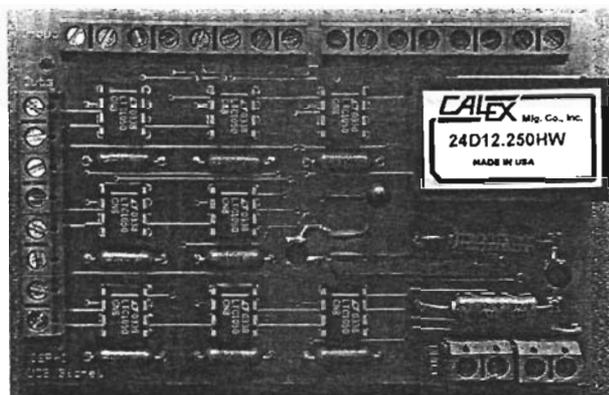


Figura 6.4 Imagen de la tarjeta de circuito impreso con componentes y diagrama mostrando las tres capas de trazos.

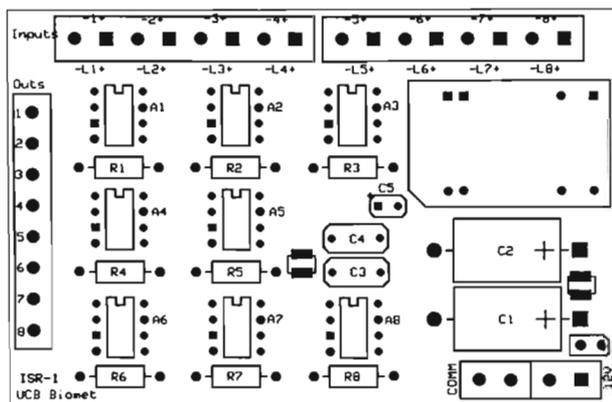


Figura 6.5(a) Recubrimiento.

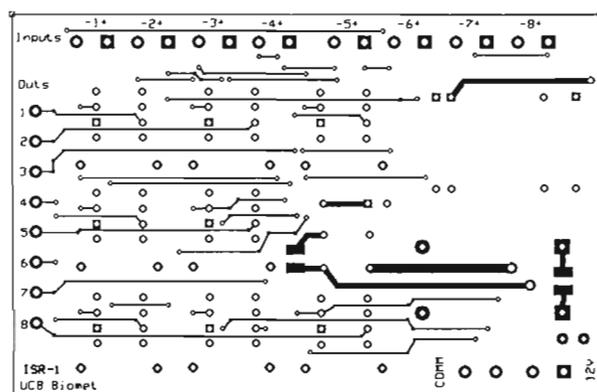


Figura 6.5(b) Capa superior: interconexiones.

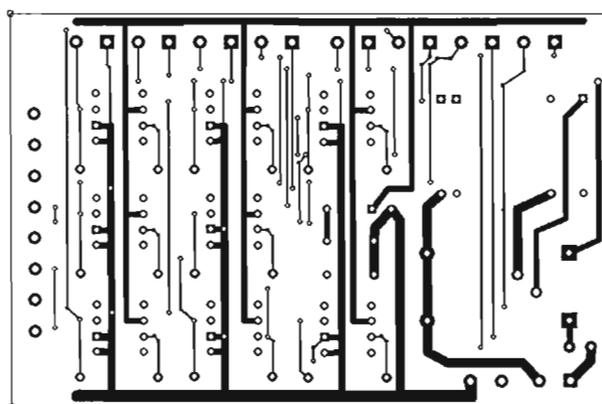


Figura 6.5(c) Capa inferior: conexiones a tierra.

La adquisición de datos se realizó con un sistema CR10X de Campbell Scientific. Conectando uno de los puertos del CR10X a un multiplexor (AM32MX, Campbell Scientific). Los cables de termopar fueron también conectados al multiplexor, en forma de mediciones de una sola terminal. Debido a que los cables del plomo y estaño forman respectivamente una unión de materiales disímiles en la entrada del multiplexor, es necesario utilizar un termoresistor de referencia (CR10X-TCR, Campbell Scientific) para medir la temperatura de esta unión y corregir la medición. Los voltajes de cada LED y sus

respectivas temperaturas fueron monitoreadas en ciclos de 5 mediciones por minuto, utilizando una escala completa de ± 2500 mV y un filtro para bloquear el ruido de 60 Hz. Los datos fueron almacenados en la memoria del CR10X y posteriormente transferidos a una computadora mediante un cable RS32.

Capítulo 7

Análisis y discusión de los resultados de las pruebas de campo. Recomendaciones para futuros diseños.

En este capítulo se muestran y se discuten los resultados de las mediciones hechas con el prototipo construido en Tucson, Arizona durante los días 27 y 28 de mayo de 2004. En forma simultánea a la toma de datos con el prototipo, se obtuvieron gráficas de Langley con un radiómetro solar automatizado (ASR) propiedad del Grupo de Percepción Remota del OSC de la Universidad de Arizona. La naturaleza de los resultados se explica en función del diseño y construcción del prototipo. Del análisis se derivan las recomendaciones necesarias para mejorar futuros prototipos y se propone un nuevo diseño.

7.1 Mediciones con el prototipo construido.

El dispositivo requiere ser alineado sólo al inicio de las mediciones. Para este propósito se colocó un hilo de extremo a extremo de la estructura cilíndrica alineándolo con el eje óptico de la estructura que mantiene a los LEDs con el propósito de servir como una guía para la alineación. La alineación en el plano horizontal se realiza con el sistema de nivelación de la base. La alineación azimutal es necesaria para garantizar que la apertura permitirá realizar mediciones sobre el rango de ángulos deseado. La dirección en que la apertura

debe orientarse se determina con la ayuda de una brújula y una gráfica como la de la figura 5.6 para las coordenadas geográficas del punto de observación.

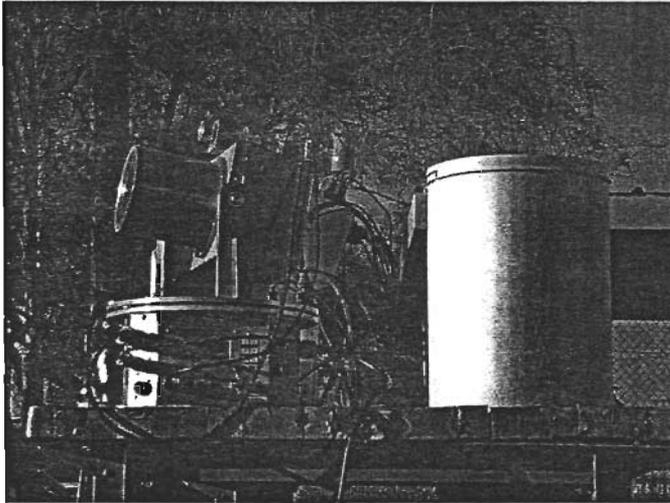


Figura 7.1 Mediciones lado a lado con el prototipo construido y los radiómetros solares automatizados.

7.2 Resultados de las mediciones.

En esta sección nos referiremos sólo a las mediciones realizadas en Tucson, Arizona. A continuación se muestran las mediciones registradas durante el 27 de mayo de 2004. En la figura 7.3 se muestran las mismas mediciones de la figura 7.2 pero con la corrección angular y la corrección por las diferencias en responsividad de cada LED del arreglo.

El reloj del sistema de adquisición de datos fue sincronizado con el reloj de un sistema de posicionamiento global (GPS) y las coordenadas solares de cada medición se obtuvieron con el código RSG (§5.1) a partir de la hora. Las correcciones angulares para cada medición se derivaron de la orientación de la estructura cilíndrica, la expresión analítica de la respuesta angular de los LEDs (§4.2.3) y de las posiciones solares obtenidas con el código RSG.

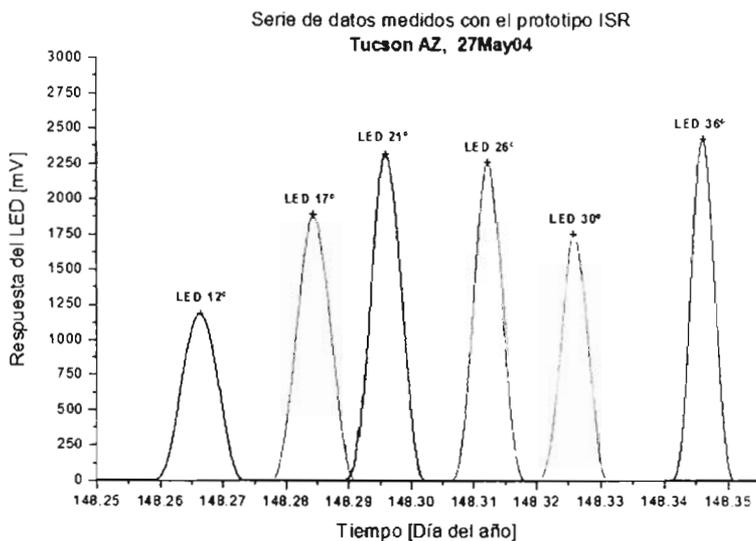


Figura 7.2 Mediciones registradas con el prototipo construido.

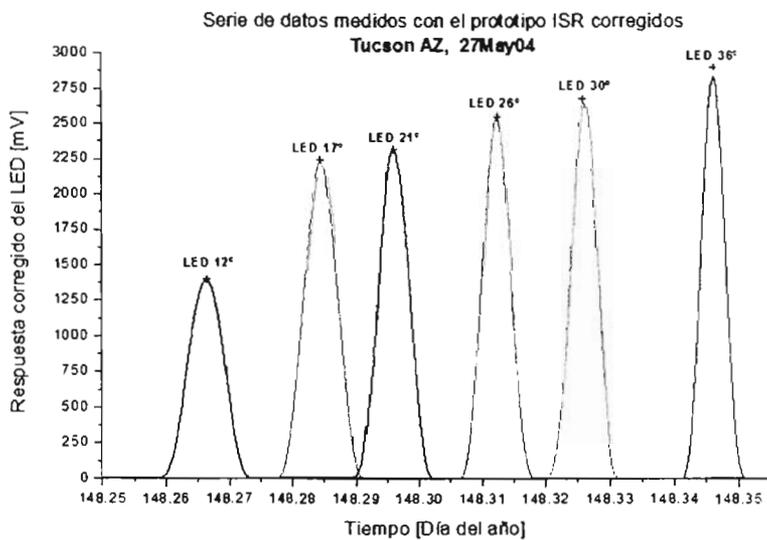


Figura 7.3 Mediciones con correcciones de ángulo y responsividad (27 de mayo, 2004).

Las responsabilidades relativas de los LEDs del arreglo fueron obtenidas mediante mediciones solares directas. Estas calibraciones fueron realizadas durante un día despejado (28 de mayo de 2004) y bajo condiciones atmosféricas estables (Tucson, Arizona) apuntando consecutivamente los diodos del arreglo al Sol y encontrando el máximo de sus respuestas. Cada juego de mediciones fue realizado en el menor tiempo posible (algunos minutos) para poder asumir que la atenuación atmosférica no cambiaba demasiado durante las mediciones. Se realizaron 6 secuencias de este tipo de calibraciones y para cada LED se tomó la medición con el valor más grande dentro de la secuencia. Este tipo de calibración no es el óptimo, sin embargo no fue posible realizar calibraciones de laboratorio.

El registro de temperaturas para cada LED se muestra en la gráfica 7.4. La temperatura de los diodos aumenta gradualmente hasta en 5 grados durante las mediciones y sólo se incrementa significativamente cuando son iluminados directamente por el sol.

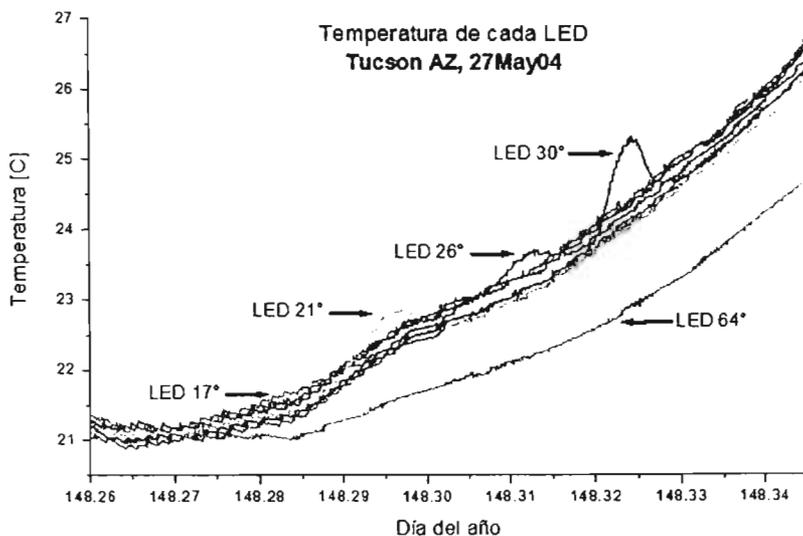


Figura 7.4 Respuesta térmica del arreglo de LEDs durante las mediciones

7.3 Gráficas de Langley obtenidas.

Los datos mostrados están corregidos angularmente y por las diferencias en la responsividad de los LEDs. Cada punto experimental se obtuvo del máximo de la curva de respuesta de cada LED (señalados con una cruz en la figura 7.3).

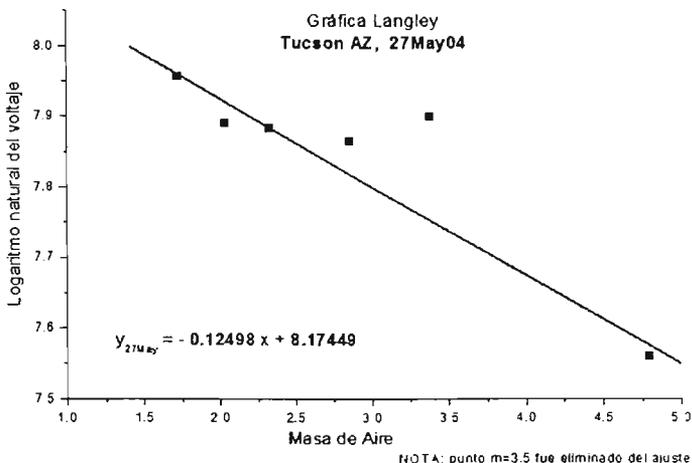


Figura 7.5 Gráfica de Langley obtenida con las mediciones del prototipo construido (27 de mayo, 2004).

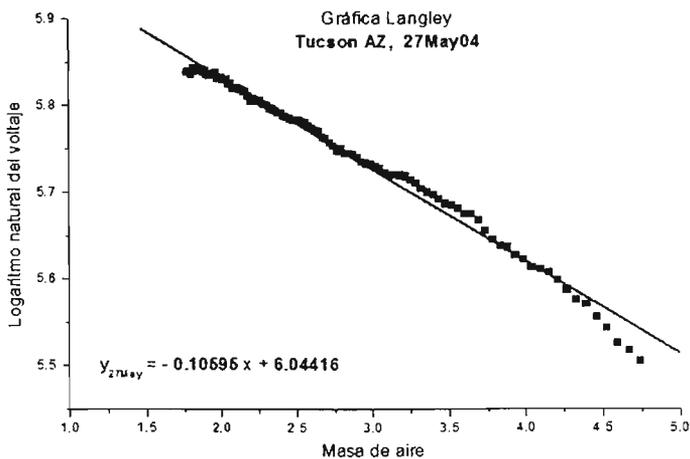
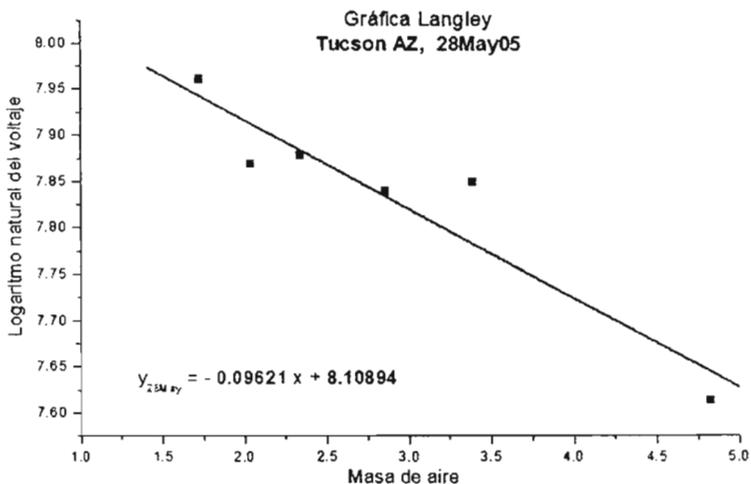


Figura 7.6 Mediciones registradas con el radiómetro solar automatizado* (ASR) (27 de mayo, 2004)



NOTA: punto m=3.5 fue eliminado del ajuste

Figura 7.7 Gráfica de Langley obtenida con las mediciones del prototipo construido (28 de mayo, 2004).

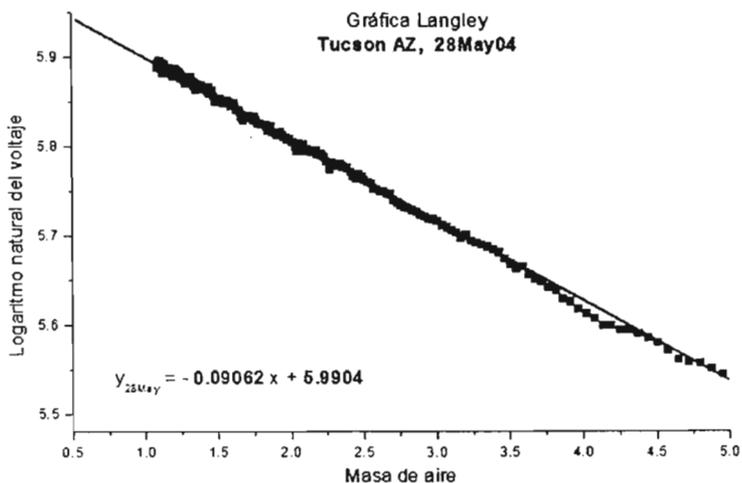


Figura 7.8 Mediciones registradas con el radiómetro solar automatizado* (ASR) (28 de mayo, 2004).

*=Las mediciones del radiómetro solar automatizado mostradas ya incluyen la corrección por dispersión de Rayleigh (§1.1, §2.3) y fueron proporcionados por el Dr. Kurt Thome.

7.4 Discusión de los resultados

Las gráficas 7.5 y 7.7 muestran las gráficas de Langley obtenidas con las mediciones ya corregidas del prototipo. Las correcciones de temperatura no se realizaron debido a que no se conocen con precisión los coeficientes térmicos de cada LED del arreglo, y se consideró que el error introducido por asumir el mismo coeficiente térmico para todos los LEDs podría ser mayor que el error debido a no realizar la corrección.

No es posible realizar una transferencia de calibración utilizando los resultados del radiómetro automatizado, ya que debido a las condiciones climáticas al momento de las mediciones en Tucson, Arizona sólo pudieron realizarse mediciones en dos días. Esto impide que puedan analizarse los datos con el método de intercepción conocida. Adicionalmente, los ajustes de Langley realizados a las series de datos son poco confiables debido a que cada una contiene un número muy pequeño de puntos experimentales y a la sensibilidad de los datos a la corrección angular.

Aunque de los resultados no pueden derivarse valores atmosféricos, del análisis de las mediciones lado a lado pueden destacarse los siguientes puntos:

7.4.1. Estabilidad atmosférica

Debido a las condiciones atmosféricas del día 27 de mayo de 2004 no fueron estables, se espera mayor dispersión en esta gráfica de Langley (figura 7.5) que en la del día 28. El efecto de las inestabilidades atmosféricas puede verse en las mediciones con el radiómetro automatizado en la figura 7.6 y podría pensarse que son las responsables de la desviación de los puntos experimentales de la gráfica 7.5 alrededor de las masas de aire de $m=3.4$ y $m=4.7$. Sin embargo, la desviación del valor para $m=3.4$ también se observa en la gráfica de Langley del día 28, lo que lleva a pensar que las desviaciones se deben a otro factor como el diseño del arreglo o las diferencias de las características de los LEDs.

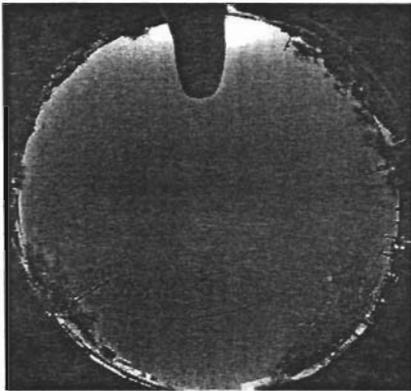


Figura 7.9 Condiciones atmosféricas
Durante el 28 de mayo de 2004

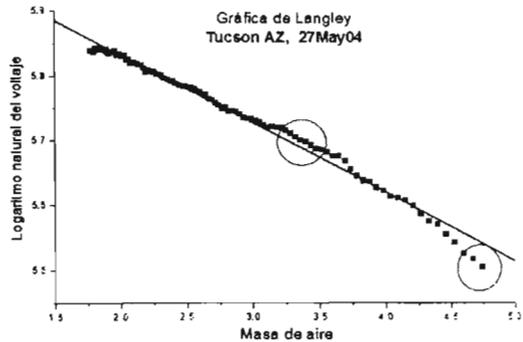


Figura 7.10 Influencia de las condiciones
atmosféricas en las mediciones

7.4.2. Precisión de la posición y orientación de los LEDs en el arreglo y dentro de la estructura cilíndrica.

La incertidumbre en la posición de los LEDs en el arreglo y en la orientación de la estructura cilíndrica son quizás una de las mayores fuentes de error en las mediciones obtenidas. A pesar de que en el diseño todos los diodos del arreglo deberían estar apuntando hacia el centro de la rendija, en la práctica los diodos están desalineados hasta por 3 grados en la dirección azimutal o desplazados fuera del centro de la estructura cilíndrica. En la figura 7.11 puede verse la mala alineación de los diodos.

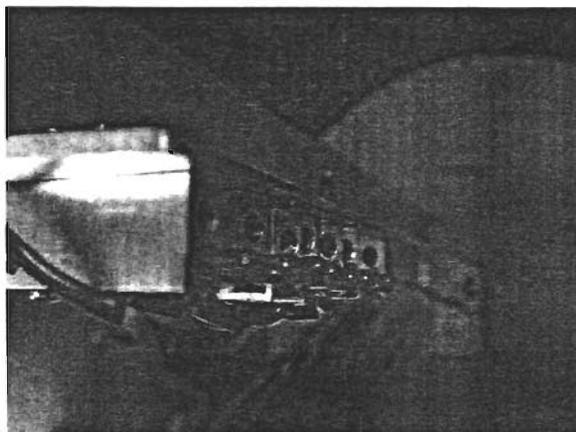


Figura 7.11 Falta de alineación de los LEDs del arreglo

La principal consecuencia de la desalineación es que no todos los LEDs serán corregidos angularmente en forma adecuada. Adicionalmente, en la orientación de la estructura al inicio de las mediciones se tiene una incertidumbre estimada de 2 grados debido a que la flexibilidad de la estructura cilíndrica hizo difícil definir con exactitud la posición correcta del hilo que pasa por el centro y divide la sección transversal en dos. Esta dirección es la que fija el “cero” de la función analítica que es aplicada a los LEDs como corrección angular. Esta última fuente de error ocasiona que se aplique una corrección angular “desplazada” a la serie de datos.

7.4.3. Campos visuales de los detectores.

Un último aspecto del diseño que afectó las mediciones son las diferencias en campos visuales de cada LED. Los ángulos visuales cenitales son distintos debido a que la distancia del centro del LED a la rejilla es distinta para cada diodo (ver figura 5.7). Este factor produce que los diodos apuntando a ángulos pequeños (12°) tengan ángulos cenitales más anchos en comparación con los diodos colocados a ángulos mayores (36°) como se observa en las figuras 7.2 y 7.3. La reducción del campo angular descrita puede resultar en la medición de voltajes aparentemente mayores, ya que la luz de la apertura es concentrada

en la parte central del LED, cuya sensibilidad es mayor, en lugar de estar repartida a lo largo de todo el diámetro del diodo.

Aunque los campos visuales en la dirección azimutal son los mismos para cada LED del arreglo, el recorrido azimutal del sol produce que cada diodo capte una cantidad distinta de radiación circunsolar. Este efecto es favorecedor cuando se tienen atmósferas estables y valores pequeños de la profundidad óptica ya que se reduce la cantidad de luz dispersada recibida. Sin embargo su efecto en las mediciones no estables debe ser evaluado.

7.5 Nuevo diseño propuesto y recomendaciones para futuros diseños

Es importante señalar que las fuentes de error de las mediciones obtenidas con el prototipo tienen su origen en la construcción del diseño propuesto y no en el funcionamiento de los LEDs como detectores. El desarrollo exitoso de un instrumento como el radiómetro solar propuesto requiere tener un conocimiento completo de las características de los LEDs como detectores y de los parámetros que desean medirse de forma autónoma, de manera que los esfuerzos se enfoquen en el desarrollo de diseños que sean menos sensibles a los errores o limitaciones en la fabricación.

El material desarrollado en esta tesis respecto al desempeño de los LEDs como detectores y al principio de funcionamiento de un radiómetro solar autónomo son una excelente base para lo anterior. Las recomendaciones para futuros diseños en cuanto a la estructura del instrumento y del arreglo de LEDs se recopilan en la siguiente propuesta.

El nuevo diseño para la estructura y el arreglo de LEDs del radiómetro solar funciona con el mismo principio explicado en el capítulo 5, proporcionando el mismo ángulo visual a todos los diodos del arreglo. El diseño pretende ser más sencillo que el diseño presentado en el capítulo 6 y también es tal que facilita su fabricación en forma precisa.

El diseño está formado por juegos de obleas semicirculares cada una de las cuales contiene a los LEDs que medirán al ángulo cenital que apunta la placa. El diseño tiene tantas obleas como mediciones diarias se desean y cada oblea tiene los LEDs necesarios para cubrir el área de interés.

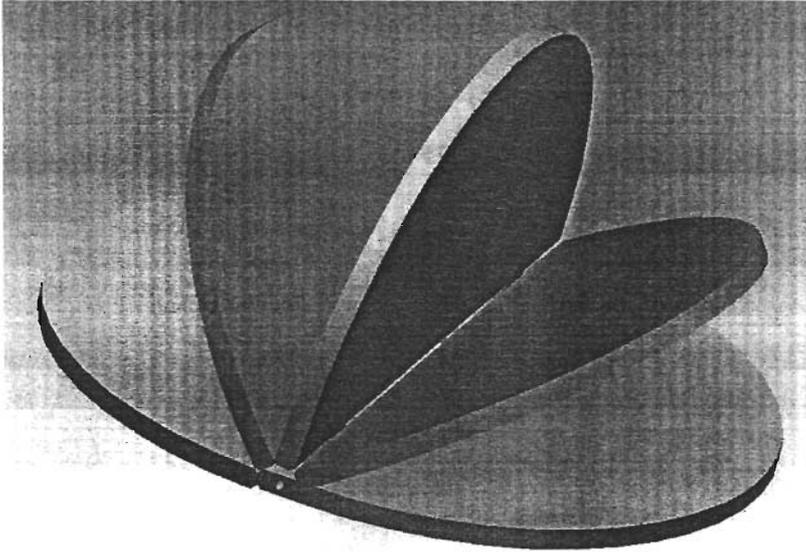


Figura 7.12 Diseño mejorado de la estructura que sostiene al arreglo de LEDs que funcionan como detectores en el radiómetro solar propuesto

Cada oblea está compuesta por dos placas semicirculares montadas una sobre otra. Una de las placas tiene ranuras o guías en dirección radial, que se utilizan para alinear los sockets que detienen a los LEDs, como se muestra en la figura 7.13. Estos sockets (mostrados como rectángulos grises), son parte fundamental del diseño ya que deben permitir que los LEDs después de removerse, puedan colocarse siempre en la misma posición. Los sockets se colocan en la parte media de la placa, de manera que el mismo juego de placas sirve como la estructura que define el campo visual cenital de los diodos.

La distancia L y la separación entre las dos placas de la oblea determinan el campo visual cenital de cada LED.

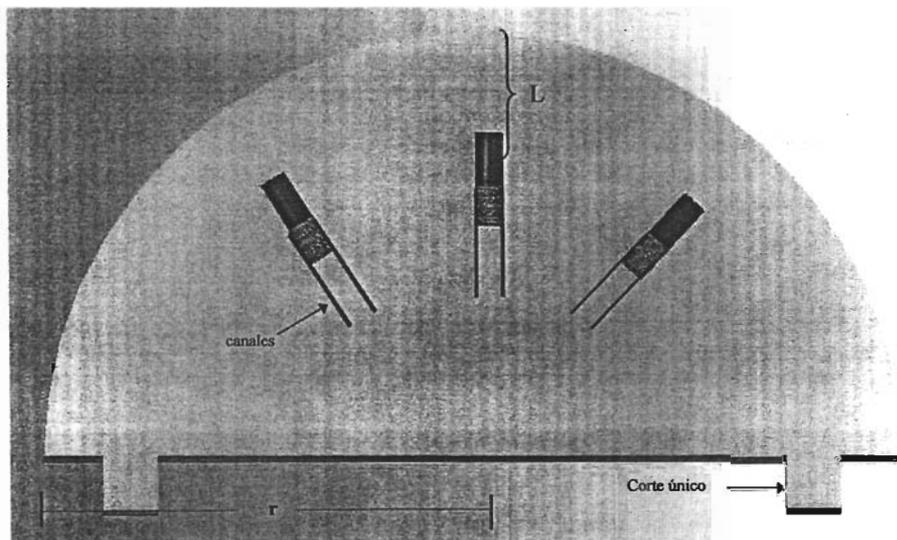


Figura 7.13 Diseño de una de las dos placas que componen una oblea.
Los canales sirven para alinear los LEDs y los cortes únicos para ensamblar las obleas.

La base inferior de cada oblea tiene un corte único que define dos secciones de apoyo. Estas secciones de apoyo se encuentran en distintas posiciones en cada oblea, de manera que las obleas pueden colocarse a distintos ángulos cenitales, y compartir el mismo centro como se muestra en la figura 7.14. En las secciones de apoyo se coloca una pieza sólida entre las dos placas, de manera que puedan perforarse estas piezas sólidas y colocar un eje de giro que agrupe a las obleas concéntricas.

Las figuras 7.12 y 7.14 muestran por simplicidad las obleas como estructuras sólidas. Sin embargo, como se describió, éstas son dos láminas delgadas que contienen los sockets y los LEDs. Ambas figuras, junto con las 7.13, 7.15 y 7.16 fueron realizadas por Eugenio Urquiza Fernández.

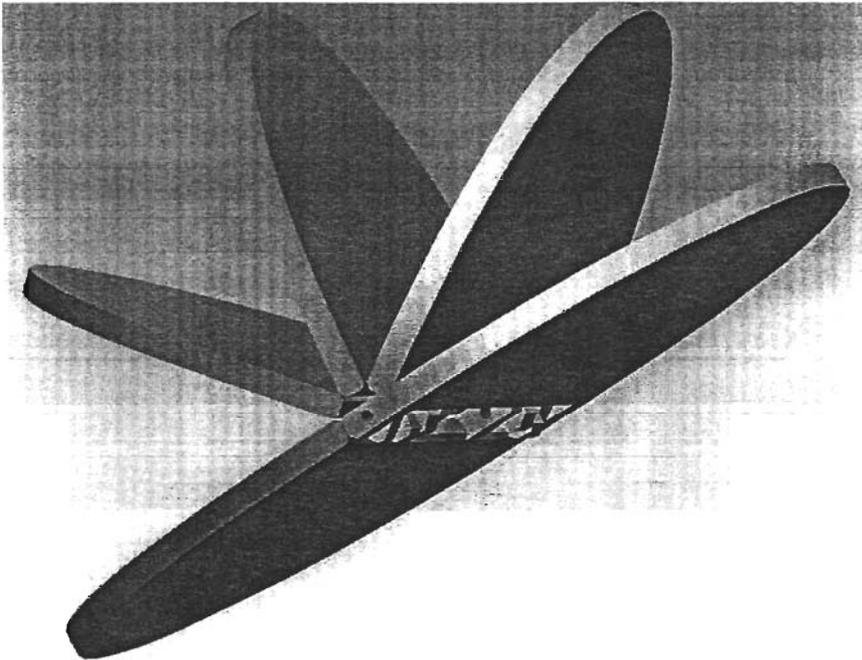


Figura 7.14 Diseño de obleas que simplifica la estructura del arreglo de LEDs del radiómetro

La principal ventaja del nuevo diseño es que facilita el maquinado de las piezas. La fabricación precisa de los canales que alinean a los sockets de los LEDs es mucho más sencilla que el proceso para perforar en dirección radial una estructura hemisférica (una de las posibles configuraciones del arreglo).

Tanto en el diseño hemisférico (figura 7.15) como en el construido en este trabajo y en el de obleas aquí propuesto, el diseño de los sockets que mantiene a los LEDs es esencial para lograr la correcta alineación de los diodos. Esta es la pieza más crítica de la estructura.

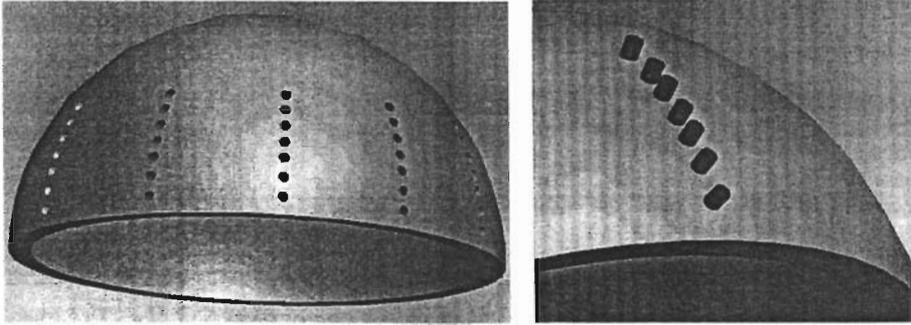


Figura 7.15 Arreglo de LEDs en estructura hemisférica

En cuanto al monitoreo de la temperatura y compensación de la respuesta térmica de los LEDs, es importante mencionar las siguientes recomendaciones:

Alternativamente al uso de termopares en contacto con las terminales del LED, la temperatura puede monitorearse midiendo la temperatura ambiente o la de la estructura externa que sostiene al LED, siempre y cuando las variaciones térmicas fluctúen lo suficientemente lento para permitir el equilibrio térmico del LED con su entorno. La temperatura también puede registrarse usando un LED-termómetro como en §4.4.

La dependencia térmica de los diodos emisores de luz es una fuente de error que puede llegar a afectar de manera importante las mediciones y que no debe ser despreciada sin un análisis previo de las características térmicas de los diodos y de la exposición a luz directa que estos recibirán de acuerdo al diseño de la estructura. Como se observó en el capítulo 4, esta dependencia afecta tanto la amplitud de la señal de salida de los LEDs como la longitud de onda pico λ_p y el ancho de banda espectral $\Delta\lambda$ de los LEDs.

Existen al menos cuatro alternativas para lidiar con el problema de la temperatura:

- (1) Implementar un circuito que compense en forma dinámica la fotocorriente extra debido al efecto térmico.
- (2) Mantener los LEDs a una temperatura mayor o inferior a la ambiente.
- (3) Monitorear sus temperaturas y realizar una corrección térmica posterior de la señal.
- (4) Colocar el sistema en un empaque aislante que minimice los efectos de la temperatura a un nivel en el que puedan ser despreciados.

Los trabajos que Acharya y coautores han desarrollado en materia de circuitos compensadores del efecto térmico de los LEDs (Acharya: 1993, 1997a, 1997b) podrían resultar muy útiles para la implementación del primer método, sin embargo este sólo compensaría la fotocorriente térmica y no cambiaría el efecto en la longitud de onda pico. El uso de sistemas activos para la estabilización de la temperatura es el método más común para resolver el problema de la dependencia térmica, sin embargo la implementación se vuelve complicada en el caso de arreglos de LEDs y en general no es una alternativa económica. Cuando es posible realizar un estudio previo de las características térmicas de los LEDs la estrategia más sencilla puede ser la tercera, ya que sólo se requiere del registro de cambios relativos en la temperatura (termo-resistor, termopar), aunque debe recordarse que a menos de que se use un sistema de switcheo, por cada detector de temperatura se requerirá de un canal más en el sistema de adquisición de datos.

Referencias

- Acharya, Y.B., Tikekar, S.G. (1993). Low-current temperature compensated bipolar logarithmic amplifier. *Rev. Sci. Instrum.* 64(6), 1652-1643.
- Acharya, Y.B., Jayaraman, A., Ramachandran, S., Subbaraya, B.H.(1995a). Compact light-emitting-diode sun photometer for atmospheric optical depth measurements. *Appl. Opt.* 34(7), 1209-1214.
- Acharya, Y.B., Jayaraman, A. (1995b). Sun photometry using photodiode open circuit voltage measurements. *Rev. Sci. Instrum.* 66(8), 4087-4090.
- Acharya, Y.B., Aggarwal, A.K. (1996a). Logarithmic current electrometer using light emitting diodes. *Meas. Sci. Technol.* 7, 151-156.
- Acharya, Y.B., Aggarwal, A.K. (1996b). Analytical correction of temperature in logarithmic electrometer using light-emitting diodes. *Rev. Sci. Instrum.* 67(5), 2014-2016.
- Acharya, Y.B., Vyavahare, P.D. (1997). Study on the temperature sensing capability of a light-emitting diode. *Rev. Sci. Instrum.* 68(12), 4465-4467.
- Agilent Technologies, Inc. (2001). "LED lamp thermal properties". Application Brief A04. January 26, 2001.
- 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.
- Arroyo, C.M.L. (2005). "Caracterización espectral de diodos emisores de luz". Tesis de Licenciatura de la Carrera de Física. Facultad de Ciencias, UNAM. En proceso
- 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. Spectrosc.* 51, 1521.
- Bodhaine, B.A., Wood, N.B., Dutton, E.G., Slusser, J.R. (1999). On Rayleigh Optical Depth Calculations. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 16, 1854-1861.

- Box, M.A., Deepak, A. (1979). Atmospheric scattering corrections to solar radiometry. *Appl. Opt.* 18(12), 1941-1949.
- 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.
- Dasgupta, P.K., Bellamy, H.S., Jiu, H., Lopez, J.L., Loree, E.L., Morris, K., Petersen, K., Mir, K.A. (1993). Light emitting diode based flow-through optical absorption detectors. *Talanta*. Vol. 40, No. 1, 53-74.
- DeCusatis, C. (editor), Handbook of applied photometry. American Institute of Physics Press. 1997.
- Dutton, E.G., Reddy, P., Ryan, S., DeLuisi, J.J. (1994). Features and effects of aerosol optical depth observed at Mauna Loa, Hawaii: 1982-1992, *J. Geophys. Res.*, 99(D4), 8295-8306.
- Fortney, L.R. (1987), Principles of Electronics, Analogue and Digital., Oxford University Press., Chapter 8.
- Galindo, I.G., Muhlia, A. (1970). Contribution to the turbidity problem in Mexico City. *Arch. Met. Geoph. Biokl.* B, 18, 169-186.
- Galindo, I., Muhlia, A., Leyva, A. (1975). Atmospheric turbidity and sky radiation at maritime environments: Gulf of Mexico and Tropical Atlantic. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 48. Band, 168-184.
- Galindo, I., Bravo, J.L. (1975). On the presence of a volcanic stratospheric dust stratum over a pollute atmosphere: Mexico City. *Geofísica Internacional*. 15(2), 157-167.
- Gorczyński, L. Radiación solar en Tacubaya, según las mediciones pirheliométricas desde 1911. Folletos Serv. Met. Mexicano SAG. 1-4 y núm. Especial (1926, 1928, 1929, 1932).
- Green, A.E.S., Deepak, A., Lopofsky, B.J. (1971). Interpretation of the sun's aureole based on atmospheric aerosol models. *Appl. Opt.* 10(6). 1263-1279.
- Grether, D., Hunt, A. Description of the LBL reduced data base and standard profiles, Lawrence Berkeley Laboratory, 9Aug. 1977.

- Grotbeck, C.L., Santer, R.P. (1993a). Solar aureole instrumentation and inversion techniques for aerosol studies: Part 2, data acquisition and inversion. *Proc. SPIE*. Vol 1968, 566-577. Atmospheric Propagation and Remote Sensing II.
- Grotbeck, C.L., Santer, R.P., Biggar, S.T. (1993b). Solar aureole instrumentation and inversion techniques for aerosol studies: Part 1, system design and calibration. *Proc. SPIE*. Vol 1968, 556-565. Atmospheric Propagation and Remote Sensing II.
- Harrison, L., Michalsky, J., Berndt, J. (1994). Automated multi-filter rotation shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements. *Appl. Opt.* 33(22), 5118.
- Hassen, J. El, and Travis, L. D. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. *Space Sci. Rev.* 16, 527-610.
- Herman, B.M., Browning, S.R., Curran, R.J. (1971). The effect of atmospheric aerosols on scattered sunlight. *J. Atmos. Sci.*, 28, 419-428.
- Ize, J. (2000). Curso de cálculo diferencial e integral IV. Facultad de Ciencias, UNAM. Notas de clase.
- Jáuregui, E., Luyando, E. (1999). Global radiation attenuation by air pollution and its effects on the thermal climate in Mexico City. *Int. J. Climatol.* 19, 683-694.
- Junge, C. (1955). The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data on the atmosphere. *J. Meteor.* 12, 13-25.
- Laulainen, N.S., Taylor, B.J. (1974). The precision and accuracy of volz sunphotometry. *J. Appl. Meteor.* 12, 298-302.
- Laulainen, N.S., Taylor, B.J. (1975). The precision and accuracy of volz sunphotometry. II. Causes of systematic error. *J. Appl. Meteor.* 14, 1214-1217.
- López, M., Ramos, G., Schmid, W. (2001). Determinación de no-linealidad en detectores fotovoltaicos de Silicio, Simposio de Metrología, Mayo 2001.
- Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms*, 2nd ed., Willmann-Bell, Richmond, VA.
- Mims, F.M., III. (1990). How to monitor ultraviolet radiation from the sun, *Sci. Am.* 263, 106-109.
- Mims, F.M., III (1992). Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors. *Appl. Opt.* 31(33), 6965-6967.

- Molina (2002).
- Montrose, M.I., (1996). Printed circuit board design techniques for EMC compliance. IEEE Press. New York.
- O'Neill, N.T., Miller, J.R. (1984). Combined solar aureole and solar beam extinction measurements. 2: studies of the inferred aerosol size distributions. *Appl. Opt.* 23(20). 3697-3704.
- Pendorf, R. (1957). Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μm and their application to atmospheric optics. *J. Opt. Soc. Amer.* 47, 176-182.
- Reagan, J.A., Gao, G., Herman, B., Caudill, T. Flittner, D. (1992). Aureole corrections to optical depths determined by solar photometry under turbid volcanic conditions. Paper presented at Chapman Conference on Climate, Volcanism, and Global Change, Hilo, Hawaii, AGU, Washington, D.C., 23-27 March.
- Reagan, J.A., Scott-Fleming, I.C., Herman, B.M. (1986a). Effects of temporal variations in optical depth on the determination of the optical depth and solar constant from solar photometry. Atmospheric radiation progress and prospects. En *Proceedings of the Beijing International Radiation Symposium*. Beijing, China, August 26-30, 1986. 571-577.
- Reagan, J.A., Thomason, L.W., Herman, B.M., Palmer, J.M. (1986b). Assessment of atmospheric limitations on the determination of the solar spectral constant from ground-based spectroradiometer measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-24(6), 258-265.
- Reygadas, R.F. (2002). "Radiómetro solar autónomo". Informe de trabajo del curso de Temas Selectos de Instrumentación Electrónica impartida por la Dra. Martha Rosete Aguilar. Facultad de Ciencias, UNAM.
- 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.
- Robertson, C.T., (2004). Printed circuit board's designer reference: basics. Prentice Hall Professional Technical, Upper Saddle River, N.J.

- 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.
- Rozada, D.I. (2003). "Generación de un algoritmo par analizar el proceso de detección de un LED". Reporte de actividades del servicio social de la carrera de Física. Centro de Instrumentos, UNAM.
- 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. (2003b). "Caracterización espectral y angular de LEDs como detectores ópticos". Reporte de actividades del servicio social de la carrera de Física. Centro de Instrumentos, UNAM.
- Russell, P.B., Shaw, G.E. (1975). Comments on "The precision and accuracy of Volz sunphotometry". *J. Appl. Meteor.* 14, 1206-1209.
- Schmid, B., Wehrli, C. (1995). Comparison of Sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp. *Appl. Opt.* 34(21), 4500-4512.
- Schotland, R.M., Lea, T.K. (1986). Bias in a solar constant determination by the Langley method due to structured atmospheric aerosol. *Appl. Opt.* 25(15), 2486-2491.
- Shaw, G.E. (1976). Error analysis of multi-wavelength sunphotometry. *Pageoph.* 114, 1-14.
- Tanaka, M., Teruyuki, N., Masataka, S. (1986). Calibration of a sunphotometer by simultaneous measurements of direct-solar and circumsolar radiations. *Appl. Opt.* 25(7), 1170-1176.
- Teillet, P.M. (1990). Rayleigh optical depth comparisons from various sources. *Appl. Opt.* 29(13), 1897-1900.

- Thomason, L.W., Herman, B.M., Schotland, R.M. and Reagan, J.A. (1982). Extraterrestrial solar flux measurement limitations due to a Beer's law assumption and uncertainty in local time. *Appl. Opt.* 21(7), 1191-1195.
- Thomason, L.W., Herman, B.M., Reagan, J.A. (1983). The effect of atmospheric attenuators with structured vertical distributions on air mass determinations and Langley plot analysis, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1851-54.
- Thome, K.J., Smith, M.W., Palmer, J.M., Reagan, J.A. (1994). Three-channel solar radiometer for the determination of atmospheric columnar water vapor. *Appl. Opt.* 33(24), 5811.
- Tomalia, E., Köpke, P., Müller, H., Quenzel, H. (1983). Circumsolar radiation calculated for various atmospheric conditions. *Solar Energy.* 30(6), 575-587.
- 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.
- Velasco-Segura, R. (2005). "Mediciones de no-linealidad y tiempos de respuesta de diodos emisores de luz". Tesis de Licenciatura de la Carrera de Física. Facultad de Ciencias, UNAM. En proceso.
- 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.
- Vittitoe, C.N., Biggs, F. (1981). Six-gaussian representation of the angular-brightness distribution for solar radiation. *Solar Energy.* 27(6), 469-490.
- Volz, F.E. (1970). Spectral sky light and solar radiance measurements in the Caribbean: maritime aerosols and Sahara dust. *J. Atmos. Sci.* 27, 1041-1047.
- 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.
- Volz, F.E., (1975). Precision and accuracy of sunphotometry –A response. *J. Appl. Meteor.* 14, 1209-1213.

- Young, A.T. (1974). Observational technique and data reduction. En "Optical and Infrared Methods of Experimental Physics", Vol. 12: Astrophysics, Part A, N. Carleton, Academic Press, 123-192.
- Young, A.T. (1994). Air mass and refraction. *Appl. Opt.* 33(6), 1108-1110, 1994.