

RADIACIÓN SOLAR.

Este capítulo explicará lo que es la radiación solar, algunas características generales del sol, además algunas definiciones de parámetros de medición solar. Se describen los componentes de la radiación solar, los fenómenos que los generan y los instrumentos mas comunes en la medición de cada uno de ellos.

III.1 Conceptos básicos de radiación.

III.1.1 *¿Qué es?*

Se conoce como radiación al “proceso físico por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz (300,000 km./s). No requiere de algún medio para su propagación.” [8]. La actinometría es el estudio y

medida de la intensidad de las radiaciones en general y de las radiaciones solares en particular.

La luz es una de las formas de energía radiante que nuestros sentidos pueden percibir directamente. La otra forma es la energía calórica infrarroja. Sin embargo hay diversas manifestaciones de la radiación, dependiendo de la longitud de onda de ésta. Estas diferentes manifestaciones son utilizadas por el hombre en campos tan diversos como las comunicaciones, la medicina y el área militar.

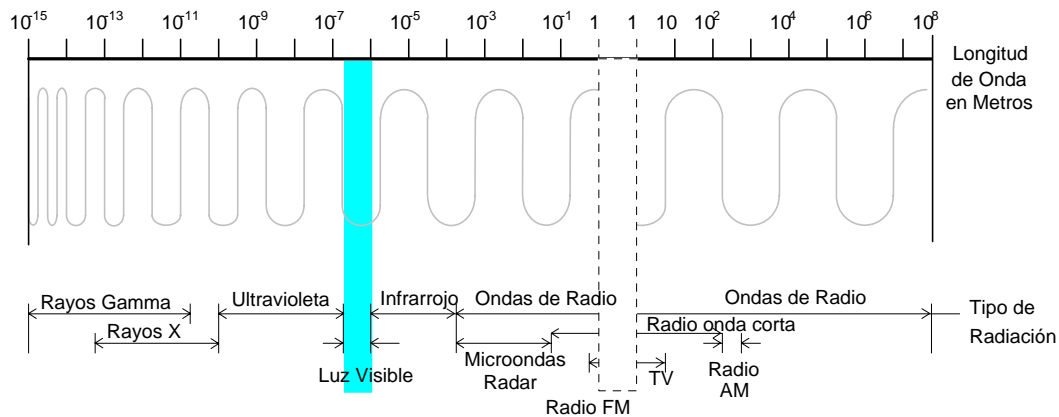


Figura 3.1. Escala representativa del espectro electromagnético.

El sol es la fuente de radiación que el hombre conoce desde que tiene uso de la razón, aunque otros fenómenos cósmicos y físicos también tienen la facultad de emitir ondas electromagnéticas, las cuales han sido estudiadas ampliamente. Se puede decir del sol que es una esfera de gases inmensamente calientes con un diámetro de 1.39×10^9 m. La temperatura en la fotosfera es de 5777 °K, calculada con el modelo radiativo del cuerpo negro; la temperatura, obviamente estimada, en la región del centro se encuentra entre 8×10^6 y 40×10^6 °K; con una densidad de alrededor 100 veces más que la del agua [6].

La excentricidad de la órbita terrestre es tal que la distancia entre el sol y la tierra varía por 1.7%. La radiación emitida por el sol y las relaciones geométricas entre el sol y la tierra dan por resultado que la cantidad de radiación que incide sobre la atmósfera terrestre sea casi constante. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar.

La constante solar, G_{sc} ($= 1353$ W/m²), es el flujo de energía proveniente del sol que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación

solar, ubicada a la distancia media de la radiación al sol, fuera de toda atmósfera. Es decir, la constante solar se refiere a una cantidad de energía que incide en un área unitaria en un instante de tiempo. En donde esta superficie hipotética es perpendicular o normal a la dirección de propagación de la luz, y además se encuentra a una distancia media de la tierra al sol, fuera de la atmósfera, para evitar que los fenómenos físicos y químicos que ocurren en ella atenuen la radiación.

Es conveniente recalcar la diferencia que existe entre la energía que emite el sol (radiación de onda corta) y la radiación que emite un cuerpo terrestre o atmosférico (radiación de onda larga). La radiación solar está comprendida entre las longitudes de onda de 0.3 a 3.0 μm , de ahí su nombre de radiación de onda corta. Se presenta durante el día y tiene una gran importancia para el sostenimiento de la vida. Dentro de esta clasificación también se encuentra la radiación reflejada o refractada por cuerpos terrestres o atmosféricos que proviene del sol. Por otra parte, la radiación terrestre está comprendida entre longitudes de onda de 4.0 a 100 μm y es la emitida por los cuerpos terrestres (sólidos, líquidos y gases) y atmosféricos. Esta radiación se presenta constantemente.

III.1.2 *Distribución espectral de la radiación extraterrestre.*

La suma de la energía total en el espectro solar es conocida como la distribución espectral de radiación extraterrestre. La figura 3.2 muestra la distribución de la radiación solar, donde se observa una clara tendencia en el intervalo del visible y los intervalos cercanos al visible, aunque el sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio; sin embargo para los fines del aprovechamiento de su energía sólo es importante la llamada radiación térmica, que incluye el visible, el ultravioleta y el infrarrojo. La fotosfera se encuentra a unos 6000 °K, por lo que emite un cierto flujo de energía correspondiente a esa temperatura.

III.1.3 *Tipos de radiación.*

La radiación extraterrestre que llega a la superficie terrestre está sujeta a las condiciones físicas del sol y a las variaciones geométricas. Lo primero es por la variación de la radiación emitida por el sol y lo segundo por que la órbita que describe la tierra alrededor del sol no es circular, sino cuasi-elíptica. El 4 de enero la tierra se encuentra en la

mínima distancia al sol (perihelio) y es entonces cuando recibe la máxima radiación extraterrestre; alrededor del 1° de julio se encuentra en la máxima distancia al sol (afelio) y entonces la radiación extraterrestre es mínima.

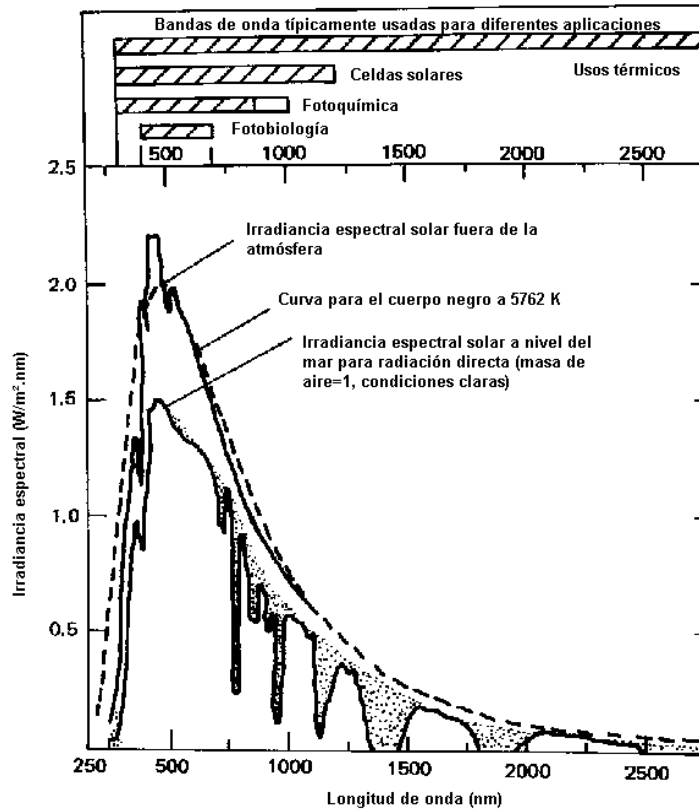


Figura 3.2. Distribución del espectro solar.

La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal en la radiación solar extraterrestre a lo largo del año es:

$$G_{on} = (1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365})$$

donde G_{on} es el flujo de radiación extraterrestre medida en un plano normal a la radiación y n es el número del día del año, o bien, el día juliano (ver Tabla 3.1.).

III.1.4 Algunas definiciones importantes.

Masa de aire: es el radio de la masa de la atmósfera a través de la cual el haz de radiación pasa a la masa, esta pasaría totalmente si estuviera en el cenit por lo tanto en el nivel del

mar $m = 1$ cuando el sol está en el cenit y $m = 2$ para el ángulo de cenit de θ_z de 60° . Para ángulos de cenit de 0° a 70° en el nivel del mar a una buena aproximación es:

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

Para ángulos más altos el efecto de la curvatura de la tierra llega a ser significativo y debe ser tomado en cuenta para una discusión más completa.¹

Tabla 3.1. Tabla para calcular “n” (día juliano).

Mes	“n” para el i-ésimo día del mes (sumar 1 a los días no sombreados en años bisiestos).
Enero	i
Febrero	31 + i
Marzo	59 + i
Abril	90 + i
Mayo	120 + i
Junio	151 + i
Julio	181 + i
Agosto	212 + i
Septiembre	243 + i
Octubre	273 + i
Noviembre	304 + i
Diciembre	334 + i

Irradiancia: es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Para expresarla se utiliza la letra G junto con los subíndices adecuados: G_o , G_b , G_d , para la irradiancia extraterrestre, directa y difusa. Las unidades comunes para este término son de W/m^2 . Note que la irradiancia indica claramente que la radiación es un fenómeno que transcurre en el tiempo, en un instante dado.

Irradiación: la cantidad de energía que incide sobre la unidad de área en un período de tiempo dado; es decir es la integral de la irradiancia durante tal período. Se usa la letra I

¹ ver Robinson (1966), Kondatyev (1969), o Garg (1982).

para indicar la insolación horaria, y H para la insolación que incide en un día. Las unidades correspondientes más comunes son J/m².

Tiempo solar: es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol en el cielo; el mediodía solar ocurre cuando el sol atraviesa el meridiano del observador.

El tiempo solar es el tiempo usado en todas las relaciones de sol y ángulos. El tiempo local no coincide con el solar. Para convertir el tiempo estándar a tiempo solar se realizan dos correlaciones. La primera es corrigiendo por la diferencia de longitudes entre la que se encuentra el observador y en la que está basado el tiempo. El sol tarda 4 minutos en desplazarse 1° de longitud. La segunda corrección es de la ecuación del tiempo considera las perturbaciones en el tiempo de rotación de la tierra el cual afecta el tiempo en que el sol cruza el meridiano del observador. La diferencia en minutos entre el tiempo solar y el estándar es:

$$\text{Tiempo solar} - \text{Tiempo local} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

donde L_{st} es el meridiano estándar para el cual está basado el tiempo local y L_{loc} es la longitud del lugar en cuestión (en grados) y E es una ecuación del tiempo en minutos, que a continuación se muestra.

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \cdot \text{sen } B - 0.014615 \cdot \cos 2B - 0.04089 \cdot \text{sen } 2B)$$

donde: $B = (n - 1) \frac{360}{365}$

y n es el día del año (Tabla 3.1.).

III.2 La atmósfera y como influye en la radiación solar.

Se conoce como atmósfera a la delgada capa de gases que rodean a la tierra, compuesta principalmente por O₂, N₂, CO₂, agua y pequeñas partículas de polvo y sólidos

suspendidos. Cuando la radiación solar directa alcanza la atmósfera, una parte de ella es absorbida y otra es dispersada. El grado en que la radiación es dispersada depende de la transmisividad de los gases y sólidos que conforman la capa gaseosa.

La dispersión de la radiación solar cuando pasa a través de la atmósfera es causada por la interacción de los rayos con las moléculas de aire, el agua (en forma de vapor y pequeñas gotas) y el polvo. El grado con el cual se produce la dispersión es una función del número de partículas a través de las que debe pasar la radiación y del tamaño de las partículas relativo a la longitud de onda (λ). La distancia que debe recorrer la luz del sol a través de las moléculas de aire esta descrita por la masa de aire (m). Las partículas de agua y polvo encontradas por la radiación dependen de la masa de aire y de las cantidades de polvo y humedad -dependientes del tiempo y la localización- presentes en la atmósfera.

Los efectos de la atmósfera en la dispersión y la absorción de la radiación son variables con respecto al tiempo, así como con las condiciones atmosféricas y los cambios de la masa gaseosa. Es útil definir entonces un cielo “claro” común. Hottel (1976) presentó un método para estimar la radiación directa transmitida a través de atmósferas claras, el cual toma en cuenta el cenit del ángulo y la altitud para una atmósfera normal y para cuatro tipos climatológicos [5].

III.3 Componentes de la radiación solar.

Para entender el significado de los diferentes datos de radiación solar que se utilizan comúnmente en trabajos e investigaciones solares, es necesario comprender a que se refieren dichos datos. Aquí se tratará de explicar las diferentes componentes de interés de la radiación solar y los instrumentos más comunes para su medición.

Radiación directa.

Se conoce como radiación directa, o rayo, a la radiación recibida del sol que no ha sido absorbida ni dispersada. La radiación solar que se mide fuera de la atmósfera es en su totalidad radiación directa, ya que no hay presencia de cuerpos o fenómenos que modifiquen su trayectoria. Sin embargo, cuando los rayos del sol cruzan la atmósfera, una

parte de ellos son absorbidos o dispersados y el resto logra tocar la superficie terrestre en forma directa.

Existen varias maneras de describir la cantidad de radiación directa que llega a la tierra, dependiendo de la orientación en que se ubica el plano sensor. Se conoce como dirección de la radiación directa a las relaciones geométricas entre un plano y cualquier orientación particular relativa a la tierra en cualquier momento (ya sea que el plano esté fijo o móvil relativo a la tierra) y la radiación solar directa incidente. Esto es, la posición del sol relativa a ese plano, y puede ser descrita en términos de algunos ángulos. Estos son:

- ϕ Latitud: la localización angular al norte o sur del ecuador, norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
- δ Declinación: la posición angular del sol en el mediodía solar (Cuando está en el meridiano local) con respecto al plano del ecuador, norte positivo; $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.
- β Inclinación: el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; $0 \leq \beta \leq 180^\circ$.
- γ Ángulo acimut de superficie: la desviación de la proyección sobre un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local, con cero al sur, negativo al este, positivo al oeste; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.
- ω Angulo horario: el desplazamiento angular del sol este a oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por hora; negativo en la mañana, positivo por la tarde.
- θ Angulo de incidencia: el ángulo entre el rayo directo sobre una superficie y la normal a esa superficie.

Para propósitos de diseño de procesos solares y cálculos de comportamiento, es necesario calcular la radiación horaria sobre una superficie inclinada de un colector a partir de mediciones o estimaciones de radiación solar sobre una superficie horizontal. Los datos más disponibles son la radiación total por horas o día sobre una superficie horizontal, mientras que la necesidad es para radiación directa o difusa en el plano de un colector.

El instrumento de medición más comúnmente utilizado para medir la radiación directa es el **pirheliómetro**. Este instrumento emplea un detector colimado para medir la radiación solar que proviene directamente del sol y de una pequeña porción del cielo alrededor del sol con una incidencia normal.

El primer instrumento estándar para la medición de radiación solar fue el pirheliómetro de flujo de agua, diseñado por Abbot en 1905. Este instrumento usa una cavidad cilíndrica de cuerpo negro para absorber la radiación que es admitida a través de un tubo colimado. El agua fluye alrededor y sobre la cavidad de absorción y la medición de su temperatura y velocidad de flujo provee los medios para determinar la energía absorbida. El diseño fue modificado por Abbot en 1932 para incluir el uso de dos cámaras térmicas idénticas, dividiendo el agua de enfriamiento entre ellas y calentando eléctricamente una de ellas mientras la otra es calentada por la radiación solar. Cuando el instrumento es ajustado para hacer que el calor producido sea igual en las dos cámaras, la entrada de electricidad es una medida de la energía solar absorbida.

Los pirheliómetros estándares no son fáciles de usar, por lo que se han establecido instrumentos estándar secundarios para calibrar los instrumentos de campo. Los instrumentos operacionales o de campo están calibrados contra estándares secundarios y son la fuente de la mayoría de los datos sobre los cuales deben estar basados los diseños de ingeniería de procesos solares. Aquí se describen brevemente dos de ellos, el pirheliómetro Eppley de incidencia normal (NIP) y el actinómetro Kipp & Zonen. El NIP Eppley es el más común en EUA, mientras que el de mayor uso en Europa es el Kipp & Zonen.

El detector del NIP Eppley está al final del tubo colimado, el cual contiene varios diafragmas y está ennegrecido en su interior. En la figura 3.3 se puede ver un corte transversal de un NIP Eppley. El detector es una termopila de uniones múltiples cubierto con negro óptico Parsons; está provisto con compensación de temperatura para minimizar su sensibilidad a las variaciones en la temperatura ambiente. El ángulo de apertura del instrumento es de 5.7° ; así el detector recibe la radiación del sol y de un área de cielo circunsolar de dos ordenes de magnitud mayor que la del sol.

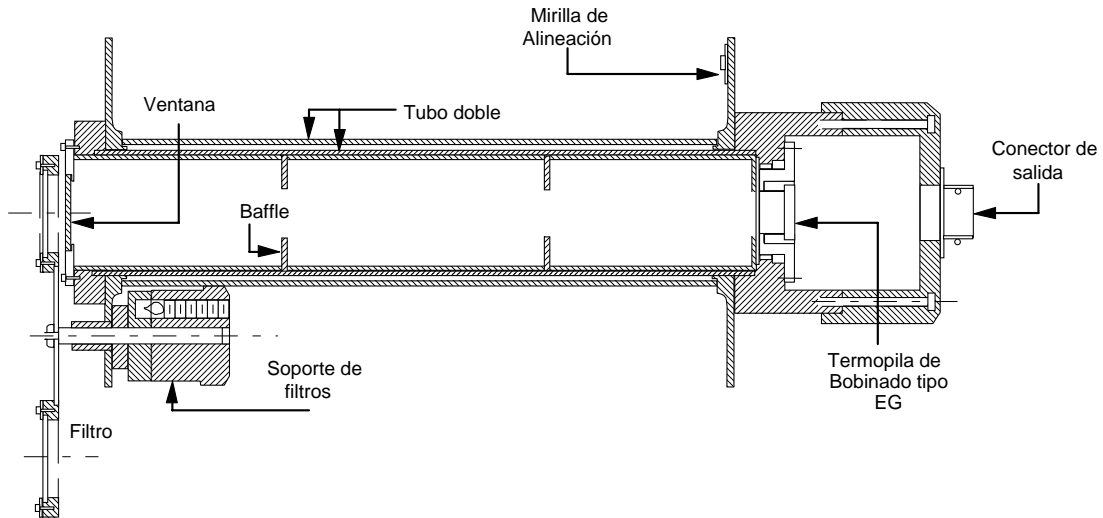


Figura 3.3. Sección transversal del Pirheliómetro de Incidencia Normal.

El Actinómetro Kipp & Zonen esta basado en el diseño de Linke-Feussner y utiliza una termopila de constantán-manganina de 40 uniones, con las uniones calientes calentadas por la radiación y las uniones frías en buen contacto térmico con el cuerpo del instrumento. En estos equipos el ensamble de diafragmas y cuerpo de cobre tienen una capacidad térmica muy grande, de órdenes de magnitud mayores que las uniones calientes. Con la exposición a la radiación solar, las uniones calientes alcanzan rápidamente temperaturas mayores que las uniones frías; la diferencia en las temperaturas provee una medición de la radiación.

Radiación difusa.

Es la radiación solar recibida en la superficie terrestre después que su dirección ha sido cambiada por la dispersión en la atmósfera.

La radiación que incide sobre una superficie también consiste de radiación solar dispersa proveniente del cielo y posiblemente la radiación solar reflejada por la tierra. Dado que la radiación difusa se presenta cuando los rayos solares penetran la atmósfera, es aquí donde se presentan los dos fenómenos relacionados con la magnitud de la radiación difusa:

Dispersión. Como se mencionó anteriormente, la interacción de los rayos solares con las moléculas de aire y partículas de polvo provocan la dispersión de tales rayos; esta

manifestación es dependiente del tamaño y cantidad de cuerpos y moléculas. Las moléculas de aire son muy pequeñas con relación a la longitud de onda de la radiación solar y la dispersión se produce de acuerdo con la teoría de Rayleigh (el coeficiente de dispersión varía con λ^{-4}). La dispersión de Rayleigh es significativa solo a longitudes de onda cortas; con $\lambda=0.6 \mu\text{m}$ tiene poco efecto en la transmitancia atmosférica. El polvo y el agua en la atmósfera tienden a formar partículas mas grandes debido a la agregación de moléculas de agua sobre partículas de polvo de diversos tamaños. Estos efectos son mas difíciles de tratar que los efectos de Rayleigh, ya que la naturaleza y cantidad de polvo y partículas de humedad en la atmósfera son altamente variables con la localización y el tiempo.

Absorción. La absorción de la radiación en la atmósfera en el espectro de energía solar es debida mayormente al ozono (O_3) en la región ultravioleta, y al vapor de agua y al bióxido de carbono (CO_2) por bandas en la región infrarroja. Hay una absorción casi completa de la radiación de onda corta por el ozono en la atmósfera superior a λ por debajo de $0.29 \mu\text{m}$. La absorción por el ozono disminuye cuando λ está por encima de $0.29 \mu\text{m}$; hasta $0.35 \mu\text{m}$ no hay absorción, pero hay una banda débil de absorción por el ozono cercana a $\lambda=0.6 \mu\text{m}$. Por otro lado, el vapor de agua absorbe fuertemente en bandas en la parte infrarroja del espectro solar, centradas a $1.0, 1.4$ y $1.8 \mu\text{m}$. Mas allá de $2.5 \mu\text{m}$, la transmisión de la atmósfera es muy baja debido a la absorción del agua y el CO_2 [7].

Para un amplio rango de aplicaciones en colectores solares, el ángulo equivalente - un ángulo que proporciona la misma transmitancia en radiación difusa con respecto a la radiación directa- es esencialmente de 60° . En otras palabras, la radiación directa incidente en un ángulo de 60° tiene la misma transmitancia que la radiación difusa isotópica (radiación independiente del ángulo).

Se puede considerar que la radiación difusa circunsolar tiene el mismo ángulo de incidencia que la radiación directa. La radiación difusa proveniente del horizonte es, comúnmente, una pequeña contribución del total de radiación.

Las mediciones de radiación difusa pueden ser hechas con piranómetros comunes sombreándolos de la radiación directa. Esto es usualmente hecho por medio de un anillo sombreador, que permite el registro constante de radiación difusa sin la necesidad de

posicionamiento continuo (ver Figura 3.4b). Se necesita hacer ajustes por la declinación y éstos se hacen cada cierto tiempo.

Radiación global.

La radiación global o total es la suma de las radiaciones directa y difusa sobre una superficie. Es la medición mas común de la radiación solar (radiación total sobre una superficie horizontal).

Los instrumentos para medir la radiación global se conocen como **piranómetros** y es de estos instrumentos de donde proviene la mayoría de los datos de radiación disponible. Los detectores para estos instrumentos deben tener una respuesta independiente de la longitud de onda sobre el espectro de energía solar. Además, deben tener una respuesta independiente del ángulo de incidencia de la radiación solar. Los detectores de casi todos los piranómetros estan cubiertos con una o dos cubiertas semiesféricas de vidrio para protegerlos del viento u otros factores externos; las protecciones deben ser muy uniformes en su grosor para no provocar distribuciones irregulares de radiación sobre los detectores.

Los piranómetros usados más comúnmente en EUA son el Eppley y el de Spectrolab Instruments; en Europa el Moll-Gorczinski, en Rusia el Yanishevskiy y en Australia el piranómetro de Trickett-Norris (Groiss).

El piranómetro de Eppley de 180° fue el instrumento mas común en los Estados Unidos. Utilizaba un detector consistente de dos anillos concéntricos de plata; el exterior estaba cubierto con óxido de magnesio, el cual tiene una alta reflectancia para la radiación en el espectro solar, mientras que el anillo interior estaba cubierto con negro de Parsons, con una gran absorbancia. La diferencia de temperatura entre ambos anillos era detectada por una termopila y era una medición de de la radiación solar absorbida. La simetría circular del detector minimizaba los efectos del angulo acimut de superficie sobre el instrumento. El detector era puesto dentro de un bulbo de vidrio casi esférico, el cual tenía una transmitancia mayor de 0.90 sobre casi todo el espectro solar. Este tipo de piranómetro ya no se construye y ha sido reemplazado por otros instrumentos.

El piranómetro Eppley blanco y negro utiliza termopilas con uniones calientes y frías cubiertas con negro de Parsons y sulfato de bario respectivamente y tiene mayor respuesta angular (coseno). Tiene una cubierta de vidrio óptico y una compensación por temperatura para mantener la calibración dentro de $\pm 1.5\%$ sobre un rango de temperatura de -20 a 40°C .

El piranómetro Eppley de precisión espectral (PSP) es el instrumento quizás más utilizado en América para medir la radiación global (o bien la radiación difusa). Se muestra una fotografía en la Figura 3.4a. Este sensor utiliza una termopila como detector, dos cubiertas ópticas hemisféricas y una compensación por temperatura que resulta en una dependencia en temperatura de 0.5% en el rango de -20 a 40°C . [6] Además, debido a su sensibilidad en un amplio rango del espectro, pueden efectuarse mediciones de irradiancia en bandas espectrales con el uso de filtros especiales fijos a las cubiertas de cristal.

El piranómetro de Moll-Gorczyński emplea una termopila de Moll para medir la diferencia de temperaturas entre la superficie negra del detector y el cuerpo del instrumento. El arreglo de termopila está cubierto con dos domos semiesféricos concéntricos de cristal para protegerlo del clima; su característica particular está en la disposición de su arreglo de termopila, que es rectangular en su configuración, con los termopares dispuestos en línea recta (lo cual resulta en algo de sensibilidad al ángulo acimut de la radiación).

Un piranómetro (o pirheliómetro) produce un voltaje proveniente de los detectores termopares que es función de la radiación incidente. Se utiliza un potenciómetro para detectar y registrar esta salida. Los datos de radiación usualmente deben ser integrados sobre algún período de tiempo.

Otra clase de piranómetros, originalmente diseñado por Robitzsch, utiliza detectores que son elementos bimetálicos calentados por la radiación solar; el movimiento mecánico del elemento es transferido por un arreglo a un registrador de pluma. Estos instrumentos tienen la ventaja de ser enteramente movidos por resortes y por lo tanto no requieren electricidad. Algunas variaciones del diseño básico son fabricadas por algunas firmas europeas (Fuess, Casella y SIAP). Son ampliamente utilizadas en estaciones aisladas y son

la fuente principal de datos de radiación solar disponibles en regiones fuera de Europa, Australia, Japón y Norteamérica. Los datos de estos instrumentos generalmente no son tan precisos como los de un piranómetro de termopila.

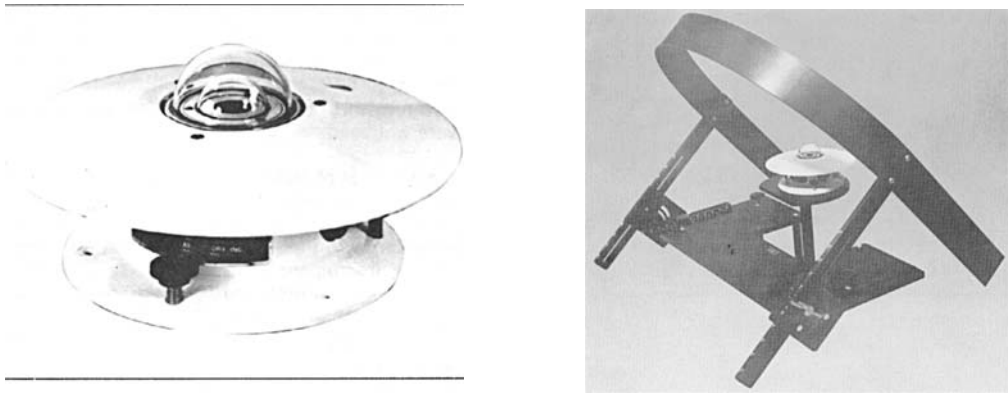


Figura 3.4. Piranómetro Eppley de Precisión Espectral, a) para medir radiación global y, b) con la banda sombreadora, para medir radiación difusa.

Otro tipo de piranómetro está basado en detectores fotovoltaicos (celdas solares). Ejemplos de este tipo son el piranómetro Li-COR LI-200S (Figura 3.5.) y el solarímetro Yellott. Estos instrumentos son menos precisos que los de termopila y tienen algunas limitaciones en su uso. También son más baratos y son fáciles de usar. La principal desventaja de los detectores fotovoltaicos es su respuesta espectralmente selectiva. LI-COR estima que el error introducido debido a la respuesta espectral es de $\pm 5\%$ máximo bajo la mayoría de las condiciones de luz natural y de $\pm 3\%$ bajo condiciones típicas [20].

Los detectores fotovoltaicos tienen características adicionales de interés. Su respuesta a niveles variables de radiación es esencialmente instantánea y es lineal con la radiación. La dependencia con la temperatura es $\pm 0.15\%/^{\circ}\text{C}$ máximo [17]. El instrumento LI-COR tiene acoplado un difusor acrílico, el cual sustancialmente elimina la dependencia de respuesta sobre el ángulo de incidencia de la radiación. La respuesta de los detectores es independiente de su orientación, pero la radiación reflejada de la tierra y alrededores en general tendrá una distribución espectral diferente que la radiación horizontal y las mediciones que se realizan sobre superficies que reciben cantidades significantes de radiación reflejada estará sujeta a errores adicionales.



Figure 1. "SZ" type sensors have no connector and are terminated with only the bare wire leads of the coaxial cable.

Figura 3.5. Piranómetro Li-COR 200S.

El piranómetro esférico Bellani de destilación esta basado sobre un principio diferente. Utiliza un contenedor esférico de alcohol el cual absorbe la radiación solar. La esfera esta conectada a un tubo receptor condensador calibrado. La cantidad de alcohol condensado es una medición de la energía solar integrada sobre el receptor esférico. Los datos sobre la energía total recibida por un cuerpo, como la representada por la esfera, son de utilidad en algunos procesos biológicos.