

Odón de Buen

18 ENE. 1984

MEDICION DIRECTA DE LA
RADIACION SOLAR

Odón de Buen R. *

Elaborado para

ORGANIZACION LATINOAMERICANA DE ENERGIA
(OLADE)

Proy 3131

DICIEMBRE, 1983

* Técnico Académico, Instituto de Ingeniería, UNAM

I N D I C E

	pag
1. INTRODUCCION	1
2. PRINCIPIOS BASICOS DE RADIOMETRIA SOLAR	2
3. CLASIFICACION POR EL TIPO DE RADIACION	4
4. TERMINOLOGIA DE LA RADIOMETRIA SOLAR	5
5. CLASIFICACION DE RADIOMETROS POR SU FUNCIONAMIENTO	6
6. PRIMEROS RADIOMETROS SOLARES	7
7. PIRANOMÉTROS MODERNOS	10
8. ACTINÓGRAFO METALICO DE TIPO ROBITZCH	12
9. MEDICIONES DE LA DURACION DE LA INSOLACION	19
10. NORMALIZACION DE RADIOMETROS SOLARES	20
11. MEDICION DE LA FRACCION DIFUSA DE LA RADIACION	25

1. INTRODUCCION

La forma más confiable de evaluar la magnitud de la radiación solar es medir físicamente su flujo de energía. Se hacen actualmente mediciones de esta energía, mediante instrumentos adecuados, en gran cantidad de observatorios meteorológicos en el mundo. Esos instrumentos suelen producir una señal eléctrica, proporcional a la magnitud de la irradiación, que puede registrarse cómodamente en tiras o gráficas de papel o manipularse y almacenarse digitalmente o analógicamente mediante los dispositivos electrónicos adecuados.

Muchos estudiosos de la energía solar analizan y diseñan equipos y sistemas de aprovechamiento energético con soltura; sin embargo, pocos son los que están familiarizados con los principios básicos de solarimetría y menos los que conocen la gran variedad de aparatos disponibles para hacer esas mediciones. La familiaridad con los equipos medidores parece residir más bien en los profesionales de la meteorología.

El intento de estas notas es proporcionar al ingeniero solar un conocimiento, esquemático al menos, de la instrumentación especializada para mediciones solares. Así, se presenta en las páginas siguientes un panorama global de los principios de solarimetría, unas notas sobre la evolución tecnológica de los principales instrumentos, su clasificación y algunos datos de su sensibilidad, confiabilidad y precisión.

2. PRINCIPIOS BASICOS DE RADIOMETRIA SOLAR

El término *radiación* es aplicado de manera general a todos los tipos de procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas, ya sean visibles o invisibles. Aunque todas las porciones del espectro de radiación electromagnética son de interés general para la ingeniería, el principal interés para lo relacionado a la radiometría solar está en la región de longitud de onda limitada por 0.2 y 100 μm . En este rango se tiene que el 8.73% de la energía se encuentra en el espectro ultravioleta que se ubica por abajo de 0.4 μm ; 38.15% está en la región visible entre 0.4 y 0.7 μm , con una intensidad máxima a 0.48 μm . El 53.1% restante está en la región del infrarrojo entre 0.7 y 100 μm aunque menos del 1% de la energía solar se encuentra en longitudes de onda arriba de 3.3 μm . Esta distribución varía con la altura respecto del nivel del mar y con el tipo de atmósfera particular a la localidad (fig 1).

Una parte de la radiación que es repartida y difundida en la atmósfera llega a la tierra en forma de radiación celeste o *difusa* la cual

tiene su intensidad pico a $0.45 \mu\text{m}$ en la porción azul del espectro visible. La irradiación solar total, $I_{t\theta}$, que llega a la superficie terrestre desde el disco solar y el cielo es

$$I_{t\theta} = I_{DN} \cos \theta + I_d \text{ (Btuh}^{-1} \text{ ft}^{-2} \text{ ó W/m}^{-2}\text{)}$$

donde

$$I_{DN} = \text{Irradiación directa, Btuh}^{-1} \text{ ft}^{-2} \text{ ó W/m}^2$$

$$\theta = \text{ángulo de incidencia entre el rayo solar directo y una línea normal a la superficie}$$

$$I_d = \text{radiación difusa del cielo, Btuh}^{-1} \text{ ft}^{-2} \text{ ó W/m}^2$$

Cuando la superficie es horizontal, el ángulo de incidencia es

$$\theta = 90^\circ - \beta$$

donde

$$\beta = \text{altitud solar}$$

La irradiación total horizontal es

$$I_{tH} = I_{DN} \sin \beta + I_{dH}$$

Cuando la irradiación horizontal total y la fracción difusa son conocidas de mediciones hechas con piranómetros sombreados y no sombreados, la intensidad del rayo directo puede ser encontrada de

$$I_{DN} = (I_{tH} - I_{dH}) / \sin \beta$$

Para todo propósito práctico la masa de aire (m) es $m = 1/\sin \beta$. Más allá de la atmósfera terrestre $m = 0$.

3. CLASIFICACION POR EL TIPO DE RADIACION

Las mediciones de la radiación solar que llega a la superficie terrestre suelen agruparse en siete clases principales:

1. Radiación directa del sol medida perpendicularmente a la dirección del rayo solar
2. Radiación total recibida sobre una superficie horizontal
3. Radiación celeste (también llamada difusa)
4. Radiación solar reflejada desde el piso y otras superficies (también llamada albedo)
5. Radiación directa, total o difusa en porciones restringidas del espectro solar
6. Radiación que llega a una superficie esférica
7. Radiación sobre planos fijos o móviles distintos al plano horizontal.

4. TERMINOLOGIA DE LA RADIOMETRIA SOLAR

Para eliminar confusiones en la terminología de la radiometría solar, la Conferencia Internacional en Radiación, reunida en Davos, Suiza en 1956, acordó las siguientes definiciones:

1. *Pirheliómetro*: es el instrumento usado para la medición de la intensidad de la radiación solar directa con incidencia normal
2. *Piranómetro*: es el instrumento usado para la medición de la radiación solar recibida de todo el hemisferio celeste (incluyendo insolación directa y difusa)
3. *Pirgeómetro*: es el instrumento usado para la medición de la radiación atmosférica neta medida en una superficie negra horizontal con la cara hacia arriba a temperatura ambiente
4. *Pirradiómetro*: es el instrumento usado para medir radiación solar y terrestre
5. *Pirradiómetro neto*: es el instrumento usado para medir el flujo neto de la radiación proveniente del suelo y del cielo (solar, terrestre y atmosférica) a través de una superficie horizontal.

No incluidos en las definiciones anteriores pero siendo términos de uso común, se tienen

6. *Difusómetro*: es el instrumento usado para medir la fracción difusa de la radiación solar y se compone de un piranómetro y de un sistema de sombreado que evita que la radiación directa sea percibida por el elemento sensor

7. *Albedómetro*: es el instrumento usado para medir el albedo o radiación terrestre. Es un caso particular de pirradiómetro.

5. CLASIFICACION DE RADIOMETROS POR SU FUNCIONAMIENTO

1. *Térmicos*: detectan incrementos de temperaturas que son proporcionales a la irradiación

a. *Calorímetros*: el incremento de temperatura se establece a partir de la presión en un gas contenido en un recipiente

b. *Termopares y termopilas*: el incremento de temperatura induce una fuerza electromotriz

c. *Bolómetros*: el incremento de temperatura induce un cambio de resistencia. El elemento puede estar hecho de metal, conductor o semiconductor.

2. *Piroeléctricos*: la radiación da lugar a cambios en la polarización, eléctrica de cristales piroeléctricos

3. *Fotodetectores*: son activados por eventos discretos de fotones que golpean el material. Pueden ser de tres tipos:

- a. *Fotovoltaicos*: los fotones dan lugar a una caída de potencia eléctrica
- b. *Fotoconductivos*: varía la conductividad eléctrica
- c. *Fotoemisivos*: los electrones son desalojados del material y recolectados por un ánodo.

6. PRIMEROS RADIOMETROS SOLARES

- a. El pirheliómetro Ångström (fig 2)

El primer instrumento verdaderamente preciso para la medición de la irradiación solar normal directa fue el pirheliómetro de compensación eléctrica inventado en 1893 por K.J. Ångström. Este pirheliómetro usaba dos tiras de manganín ennegrecidas, delgadas y angostas, acomodadas lado a lado en el fondo de un tubo colimado. Las tiras estaban conectadas eléctricamente de manera que - podía conducirse corriente directa, cuidadosamente medida a través de una de las tiras, mientras la otra era irradiada por la radiación solar directa en su cara anterior. Las tiras tenían - termopares aislados fijos a la cara posterior. Estas termopilas estaban conectadas en oposición a través de un galvanómetro sensible, el cual, en su posición cero, indicaba que las dos tiras habían llegado a igualar sus temperaturas. La intensidad de la radiación directa se encontraba entonces de la relación

$$I_{DN} = R \cdot (\text{corriente})^2$$

donde

R = constante del instrumento, determinado por medidas de la resistencia y por calibración.

- b. Los pirheliómetros Abbot de flujo de agua y de disco de plata (fig 3)

El pirheliómetro Abbot de flujo de agua, diseñado en 1903 por Charles G. Abbot, usaba el flujo de una cantidad de agua destilada, medida precisamente, que se llevaba el calor absorbido por un cono ennegrecido y aislado localizado al fondo de un tubo colimante largo. El incremento de temperatura del agua era medido por un termómetro diferencial de resistencia de platino. Un hilo eléctrico de calentamiento se embobinaba alrededor del absorbedor de radiación y la tasa instantánea de radiación era determinada cortando el flujo de radiación y midiendo la corriente necesaria para producir la misma elevación de temperatura.

El radiómetro solar estándar portátil del Dr Abbot fue el pirheliómetro de disco de plata diseñado en 1906, que usaba el principio de Pouillet (Pouillet usó termómetros de mercurio en vidrio para medir la tasa de aumento de temperatura de masas de metal ennegrecido cuando son llevadas a temperaturas de equilibrio y súbitamente expuestas a los rayos solares directos). El instrumento del Dr Abbot medía la tasa de incremento de temperatura en un ob-

jeto ennegrecido. Este usaba un disco de plata de aproximadamente 0.2 pulgadas de espesor, ennegrecido con una cubierta permanente y provisto con una perforación radial en donde se colocaba a presión un dedal de acero delgado. Un termómetro de mercurio en vidrio con su bulbo doblado a 90° en dirección a su punta iba insertado en el dedal añadiendo una pequeña cantidad de mercurio para asegurar un buen contacto térmico entre el bulbo del termómetro y el disco de plata. El tubo del termómetro iba a lo largo del tubo colimado lo que restringía la apertura a 5.7 grados. Al final del tubo el termómetro presentaba un blanco demasiado pequeño para ser afectado por el Sol. Un obturador hecho de tres hojas de metal pulido iba instalado en la parte superior del tubo y el instrumento tenía un montaje de altazumith con el cual podían ser ajustadas de manera precisa la altitud y el azumith para "ver" directamente al Sol. El instrumento era accionado por un operador entrenado quien leía la temperatura cuidadosamente con una lupa cuando las hojas estaban cerradas, excluyendo completamente a los rayos del Sol. Entonces el operador abría el obturador y leía la temperatura exactamente 100 segundos después, cerraba el obturador, esperaba otros 100 segundos y registraba la temperatura. Las tasas de incremento de elevación y caída de la temperatura eran entonces usadas junto con el coeficiente particular del instrumento para determinar la intensidad de la radiación.

Se han realizado mejoras a este último instrumento como el añadir medición termoelectrica de temperatura y operación eléctrica del

mecanismo del obturador. Este instrumento está clasificado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) como un "estándar de referencia" y en 1953, 23 de los 50 pirheliómetros estándar en uso en el mundo eran Abbot de disco de plata, mientras los restantes 27 eran instrumentos Ångström de compensación eléctrica.

7. PIRANOMETROS MODERNOS

1. Piranómetro Eppley (fig 4)

También es conocido como el "pirheliómetro Eppley de 180°". Diseñado en 1923, su superficie receptora consiste en dos anillos concéntricos de plata; el más cercano al centro del círculo tiene una cubierta negra (laca negra óptica de Parson). La diferencia de temperatura entre los dos anillos es medida con una termopila cuyas uniones tienen buen contacto con las superficies inferiores del anillo, pero que están aisladas eléctricamente de ellas. Todo el ensamble es sellado herméticamente dentro de un bulbo hemisférico especialmente soplado que va lleno con aire seco.

2. Piranómetro Moll-Gorczynski (fig 5)

Este piranómetro, también conocido como solarímetro Kipp, es un instrumento de termopila en el cual la superficie receptora va cubierta con dos domos hemisféricos de vidrio pulido con espesor de 2 mm. El domo exterior es removible y puede ser intercambiado por filtros en forma de domo. En los modelos más recientes se han realizado los ajustes necesarios para facilitar la limpieza y

el mantenimiento . Como la superficie de la termopila es rectangular es necesario sumo cuidado en cuanto a la orientación.

3. Piranómetro Eppley moderno (fig 6)

Aparecido en el mercado en 1975, este piranómetro tiene varias mejoras respecto a la primera versión. Se instaló un circuito eléctrico compensado con la señal de un termistor lo que redujo los errores resultantes de la dependencia con respecto a la temperatura a $\pm 1\%$ entre -20°C y 40°C . La respuesta cosenoidal es de $\pm 1\%$ para ángulos de incidencia entre 0 y 70° y de $\pm 3\%$ entre 70 y 80° . Otras innovaciones consistieron en el reemplazo de los dos detectores de anillos concéntricos por uno de construcción radial de alambre enrollado, el uso de una cubierta negra fabricada en material sintético y el uso de sulfato de bario como agente blanqueador.

4. Piranómetro termoeléctrico Yanishevsky (fig 7)

Este piranómetro usa termouniones (3×3 cm en dimensiones totales) pintadas con negro de humo y magnesio, siendo las uniones impares negras y las pares blancas. El conjunto de termouniones va cubierto con un hemisferio de vidrio y es mantenido seco con gel de sílice. La parte inferior del vidrio va protegida con una co - raza negra para eliminar distorsiones por el albedo. La sensibilidad del instrumento está entre 7 y $7.5 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

5. Piranómetro Dirmhirn-Sauberer o piranómetro de estrella (fig 8)

El piranómetro Dirmhirn-Sauberer usa segmentos blancos y negros montados formando una estrella. La medición se logra de una manera similar a la de un piranómetro Eppley moderno. Logra el 98% de la respuesta a un cambio repentino en 30 segundos.

6. Piranómetros fotovoltaicos (fig 9)

Su respuesta espectral es limitada (fig 10). Sin embargo, tienen ciertas ventajas sobre los piranómetros fototérmicos: respuesta instantánea, robustez, insensibilidad a la orientación, señal de salida alta y es posible usarlos en mediciones sin necesidad de fuentes externas de poder. Todo esto los hace muy útiles cuando no es esencial tener mediciones muy exactas.

8. ACTINOGRÁFO METÁLICO DE TIPO ROBITZCH (fig 11)

En este instrumento existe una liga mecánica que se usa para registrar la diferencia de temperaturas entre una tira bimetálica ennegrecida expuesta a la radiación solar y dos tiras bimetálicas similares que van pintadas de blanco o bien aisladas de la radiación solar. El tiempo de respuesta del instrumento es grande (10 a 15 minutos para el 98% de la respuesta) y el instrumento es apropiado solamente para propósitos de medición de totales diarios.

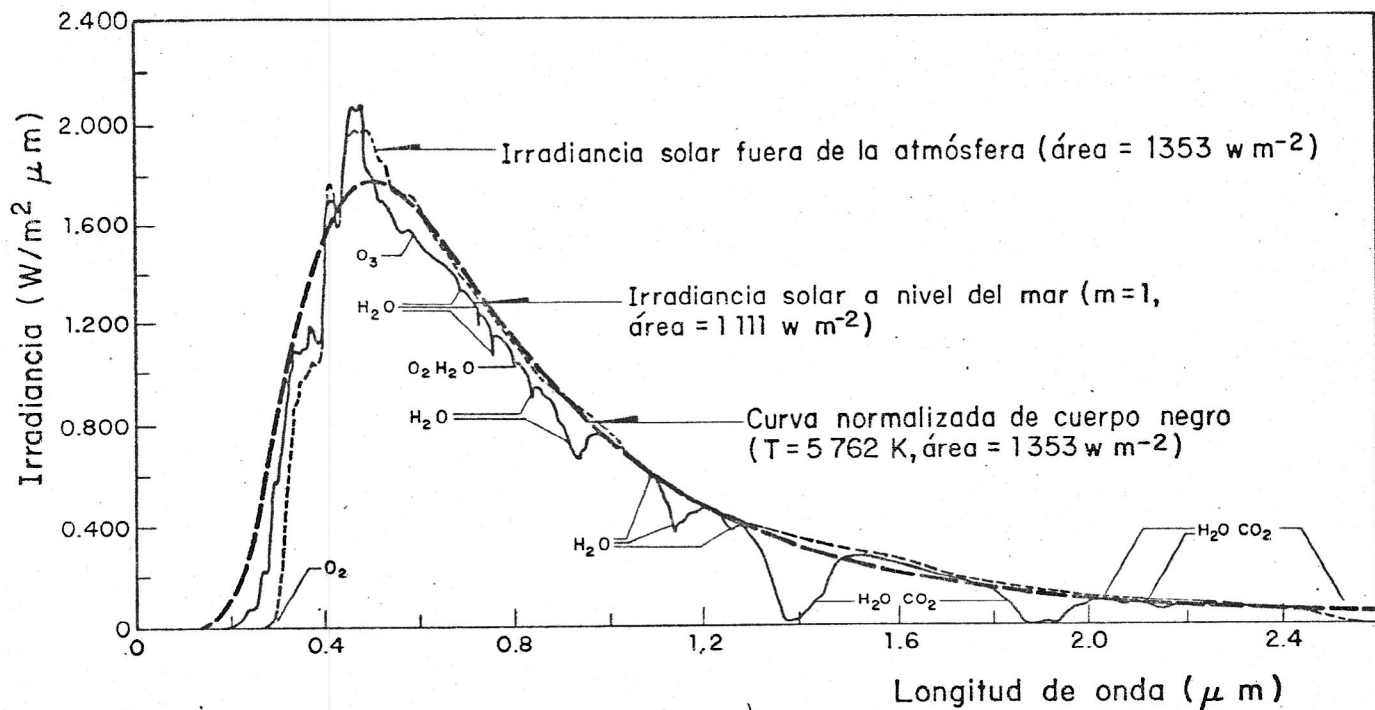
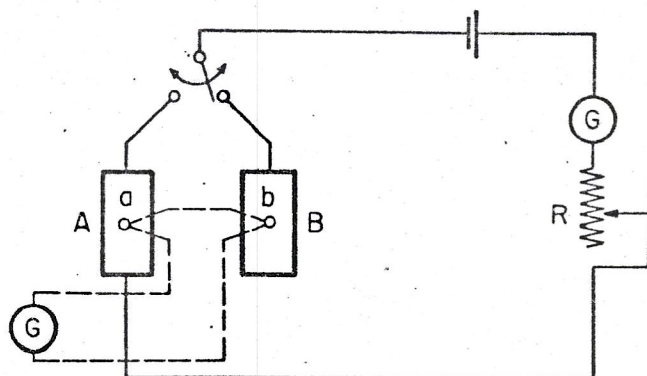


Fig 1. Irradiancia espectral solar fuera de la atmósfera terrestre, con masa de aire igual a cero, y a nivel del mar, con masa de aire = 1.0, comparadas con la irradiancia de un cuerpo negro a 5,762 K



A y B son tiras oscurecidas de manganín a las cuales van unidas las termopilas a y b. R es ajustado de manera que la tira irradiada está a la misma temperatura que la tira calentada eléctricamente

Fig 2. Diagrama de circuito del pirheliómetro Ångström compensado

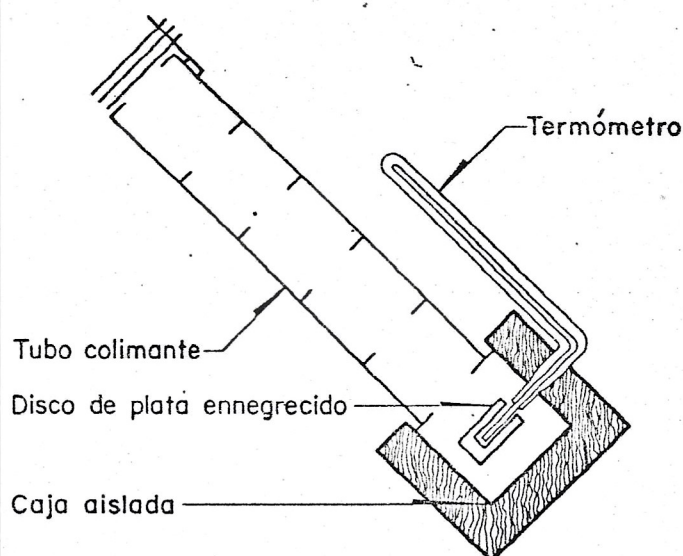


Fig 3. Sección esquemática del pirheliómetro Abbot de disco de plata

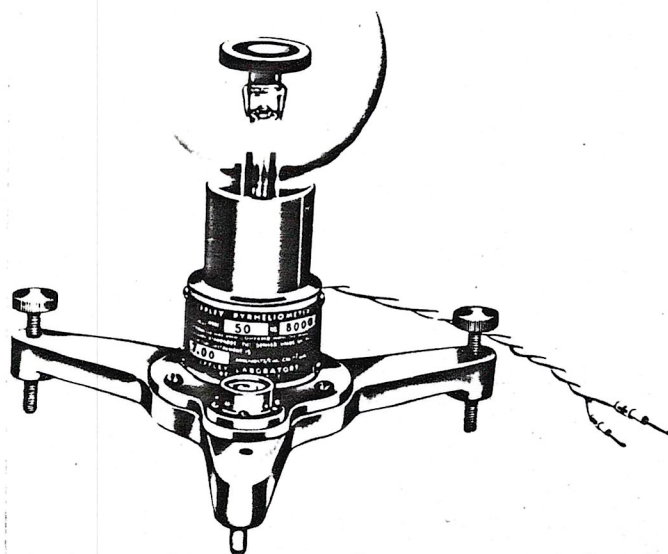


Fig 4. Piranómetro Eppley

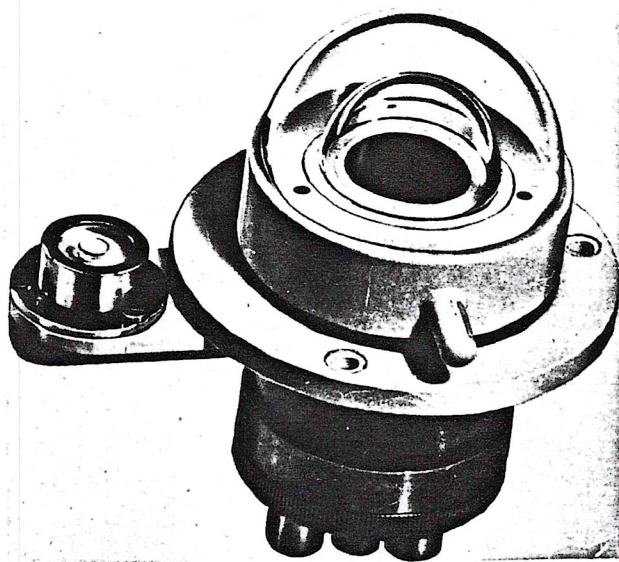


Fig 5. Piranómetro Moll-Gorczynski

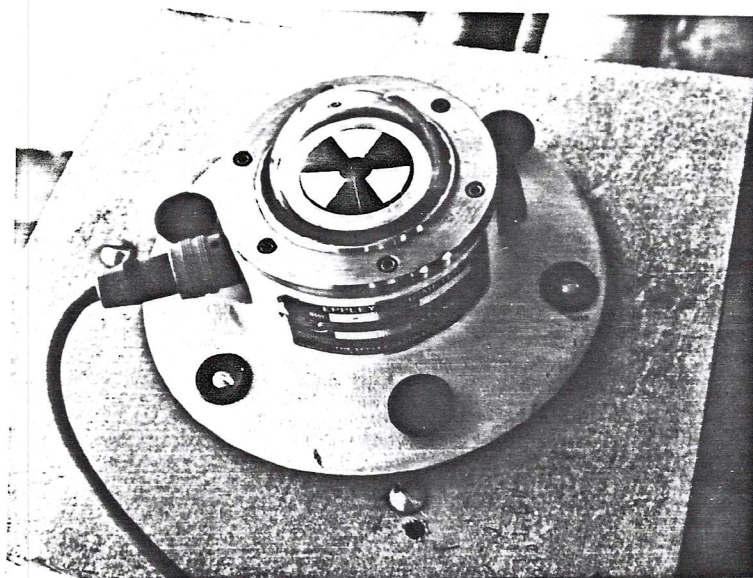


Fig 6. Piranómetro Eppley moderno de construcción radial.

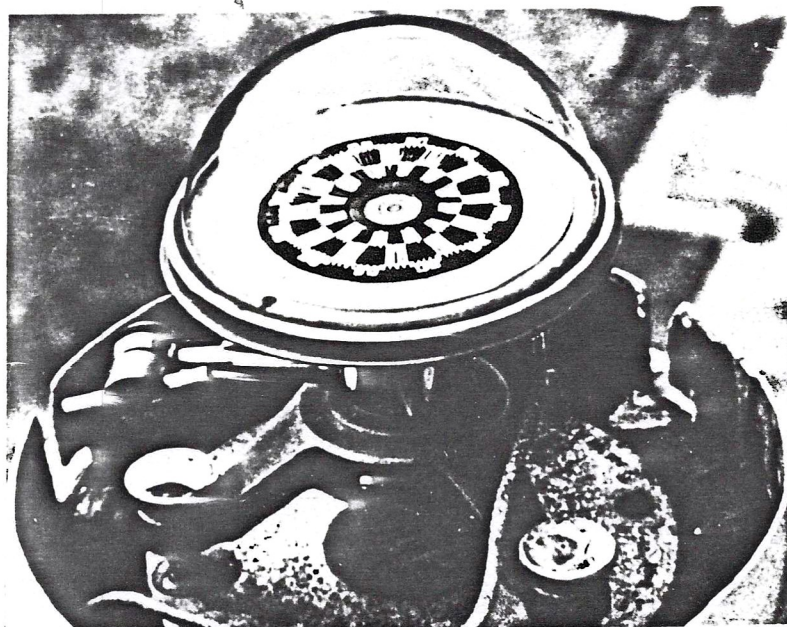


Fig 7. Piranómetro Yanishevsky

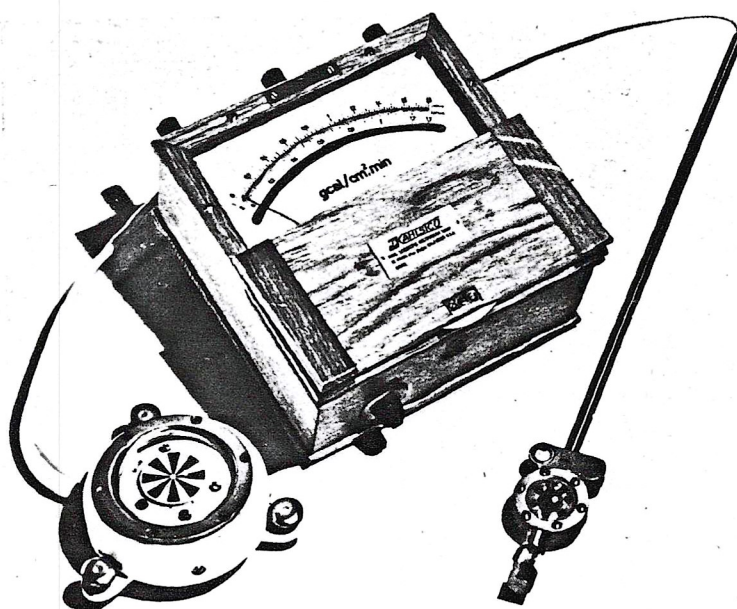


Fig 8. Piranómetro Dirmhirn-Sauberer
(Piranómetro de estrella)

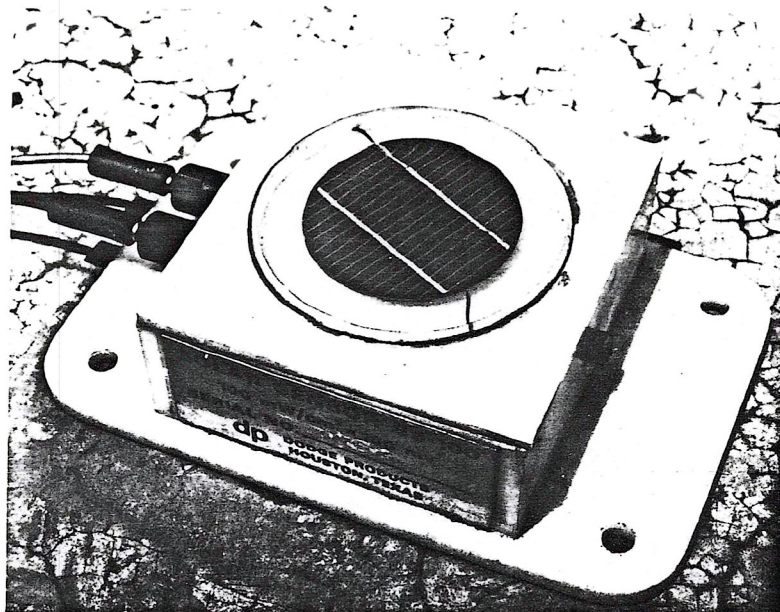


Fig 9. Fotocelda para medición de radiación total

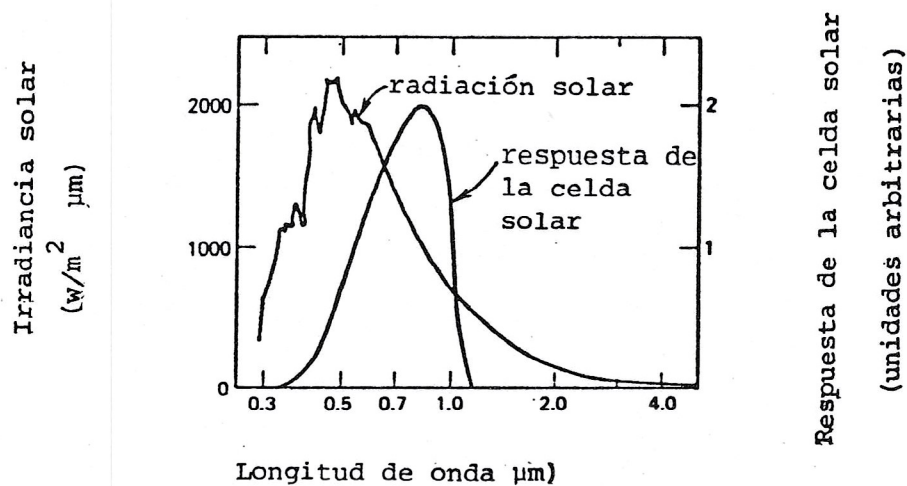


Fig 10. Respuesta espectral de las celdas solares contra el espectro solar

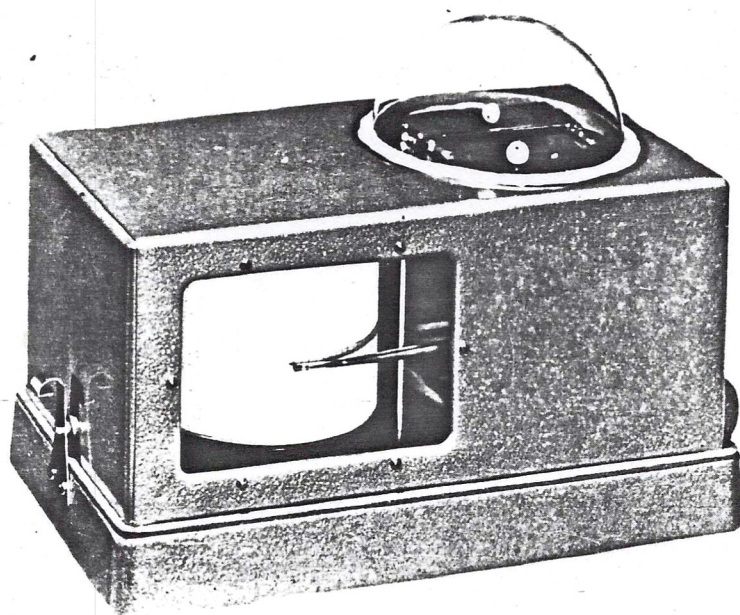


Fig 11. Actinómetro metálico de tipo Robitzsch.

9. MEDICIONES DE LA DURACION DE LA INSOLACION

Conocer el número de horas de brillo solar claro, esto es, el tiempo durante el cual el disco solar es visible, es muy útil para la estimación de promedios de radiación solar en periodos largos. Para esto se han usado ampliamente los siguientes dos instrumentos.

a. Registrador Campbell-Stokes del brillo solar

Este instrumento consiste básicamente en una esfera sólida de vi
drio de aproximadamente 10 cms de diámetro que, usada como lente,
produce una imagen del Sol sobre una tira de papel tratado están
dar, que va montado alrededor de la parte posterior de la esfe -

ra. La imagen solar quema el papel cuando la radiación directa alcanza un nivel suficientemente alto y deja una marca que permite establecer el nivel de insolación.

b. Interruptor de brillo solar de Foster

Este es un instrumento que registra el brillo solar usando celdas fotovoltaicas. Consiste en dos de estas últimas, una de ellas expuesta a la radiación directa y la otra no. En ausencia de radiación directa las dos producen la misma lectura. Cuando se intensifica la radiación directa la celda destapada da una señal mayor que la oculta. La duración de una diferencia crítica de radiación detectada por las dos celdas es una medida de la duración del brillo solar claro.

10. NORMALIZACION DE RADIOMETROS SOLARES

a. Clasificación estándar y especificaciones de exactitud

La Organización Meteorológica Mundial (WMO) ha establecido límites de exactitud para cuatro clases de radiómetros (ver la tabla 1). De esta manera se han clasificado los distintos instrumentos de acuerdo a la siguiente lista.

- Pirheliómetros referenciales estándar

- . Pirheliómetro Angström de compensación eléctrica
- . Pirheliómetro de disco de plata
- . Radiómetro de cavidad activa

- Pirheliómetros y piranómetros de primera clase
 - . Nuevo pirheliómetro Eppley
 - . Piranómetros selectos de termopila
 - . Pirheliómetro bimetalico Michelson
 - . Pirheliómetro revestido de hierro Linke-Feussner
 - . Pirheliómetro termoeléctrico Yanishevsky
- Pirheliómetros y piranómetros de segunda clase
 - . Pirheliómetro y piranómetro Moll-Gorczynski
 - . Pirheliómetro Eppley antiguo y piranómetro Eppley
 - . Piranómetro de termopila Volochine
 - . Piranómetro Dirmhirn-Sauberer
 - . Piranómetro esférico Ballani
- Piranómetros de tercera clase
 - . Piranómetro bimetalico Røbitzch

b. Norma Pirheliométrica Internacional 1956

Hasta 1956 dos pirheliómetros absolutos estándar (los pirheliómetros ^o Ångström y Abbot) fueron usados como referencia primaria para mediciones de radiación solar. Las escalas de radiación de estos dos instrumentos no estaban de acuerdo debido a pequeños errores sistemáticos. Fue en 1956, en la Conferencia de Radiación en Davos, Suiza, que se recomendó la adopción de una nueva escala, la Escala Pirheliométrica Internacional (IPS). Aquí se concluyó que las mediciones hechas de acuerdo a calibraciones realizadas respecto a instrumentos Abbot deberían ser reducidas en un 2% mientras las hechas respecto a los instrumentos ^o Ångström deberían aumentarse en un 1.5%.

Tabla 1. Clasificación piranométrica

	1a. Clase	2a. Clase	3a. Clase
Sensibilidad	± 0.1	± 0.5	± 1.0
Estabilidad (% de cambio por año)	± 1.0	± 2.0	± 5.0
Temperatura (máximo error debido a cambios de la temperatura ambiente %)	± 1.0	± 2.0	± 5.0
Selectividad (máximo error debido a respuesta espectral esperada %)	± 1.0	± 2.0	± 5.0
Linealidad (máximo error debido a la no linealidad no tomada en cuenta)	± 1.0	± 2.0	± 3.0
Constante de Tiempo (máxima)	25 seg.	1 min.	5 min.
Respuesta cosenoidal (desviación que se asume, tomando la elevación solar de 10° en un día claro %)	± 3.0	$\pm 5-7$	± 10.0
Respuesta azimutal (desviación asumida tomando un día claro - %)	± 3.0	$\pm 5-7$	± 10.0

En 1970, en la Tercera Comparación Internacional de Pirheliómetros organizada por la WMO y el observatorio de Davos, Suiza, se introdujeron dos nuevos radiómetros absolutos, uno por parte de Kendall y Berdahl (1970) y el otro por Geist (1971).

c. Métodos de normalización

La normalización de pirheliómetros se puede realizar si se escoge un día y una hora con radiación solar razonablemente estable y se realiza un número suficiente de observaciones. Para la normalización de piranómetros existe el método tradicional que consiste en el uso de un pirheliómetro estándar y la técnica de sombreado u ocultamiento. Este consiste en el registro de la salida del piranómetro a normalizar alternando la medición para el piranómetro descubierto (radiación total) y para el piranómetro con el elemento sensor sombreado. Este sombreado se logra con un disco sostenido por un brazo delgado. El disco es de diámetro suficiente para que, estando relativamente lejos del sensor (p. ej., 1 m), cubra solamente al elemento sensible y al bulbo que lo aísla. La constante de calibración para el piranómetro está dada por

$$K = H \sin \beta / (T - D)$$

donde

K = constante de calibración (unidades de salida del sensor por unidades de insolación, p.ej., 10 mv = 1 ly/min)

- H = radiación solar directa observada
- β = altura solar media
- T = salida del instrumento descubierto
- D = salida del instrumento sombreado

Con este método se presentan problemas debido a los periodos muy largos de exposición (hasta de varios días), temperatura ambiente variable y variaciones significantes de la ley del coseno de Lambert (especialmente en atmósferas turbias).

En la Conferencia de Energía Solar en Boston, en marzo de 1966, se presentaron 3 ponencias (Hill, 1966; Latimer, 1966; Drummond y Greer, 1966) donde se describe un procedimiento que permite calibrar piranómetros bajo techo. Esta técnica consiste en el uso de una esfera o hemisferio integrador con el cual se crea un campo de radiación isotrópico en una temperatura ambiente constante. Con esta técnica es posible que dos personas calibren una docena de piranómetros por día logrando un ajuste con $\pm 1.0\%$ de desviación. El piranómetro de referencia o estándar en la esfera o semiesfera debe estar necesariamente calibrado con la técnica tradicional.

Existen otros dos métodos de normalización de piranómetros que son menos aceptables. El primero consiste en la comparación del piranómetro con un piranómetro similar previamente calibrado teniendo al Sol como la fuente. Este método requiere de varios días de exposición para lograr una comparación apropiada. El segundo consiste en montar en un mismo plano los dos instrumentos (el calibrado y el no calibra-

do) en el laboratorio y usar una fuente de luz artificial colimada va riando ángulos de altitud y de azimuth para medir la respuesta hemisférica.

11. MEDICION DE LA FRACCION DIFUSA DE LA RADIACION

Existen dos maneras de medir la radiación difusa. La primera consis te en el uso de un pirheliómetro y un piranómetro para medir el compo_n nente directo y la radiación total. Se calcula la fracción difusa por medio de la fórmula

$$F_d = F - F_p \cos \theta_o$$

donde:

F_d = radiación difusa en una superficie unitaria horizontal

F = radiación total en una superficie unitaria horizontal

F_p = radiación directa en una superficie unitaria normal al rayo solar

θ_o = ángulo cenital

Debido a que este método requiere para efectuar mediciones continuas, de un mecanismo seguidor, resulta demasiado caro. Existe entonces una segunda manera de establecer la fracción difusa. Esta consiste en el uso de una banda que oculte del Sol al elemento sensible de un piranómetro. El método de la banda es apropiado para mediciones continuas pero requiere de correcciones debido a que la banda no permite el paso de la radiación difusa de algunas partes de la semiesfera celeste hacia el transductor.

BIBLIOGRAFIA

1. Coulson K.L., "Solar and Terrestrial Radiation", Academic Press Inc., New York 1975, 322 pp
2. CSAGI. "Radiation instruments and measurements; Part 4, IGY Instruction Manual", pp 371-466. Pergamon Oxford, 1958
3. Duffie J., Beckman W., "Solar Engineering of Thermal Processes" John Wiley & Sons, New York, 1980
4. Guideto Meteorological Instrumentation and Observing Practices, fourth ed. 1971, WMO No 8TP3, Secretariat World Met. Organization, Geneva, Switzerland
5. Selcuk, K and Yellott, J.I. "The use of Silicon cells for Measurement of Direct and Diffuse Solar Radiation", Solar Energy, Oct 1962
6. 1973 Solar Energy Data Workshop, Charles Turner, ed., NSF-RANN-74-062, Sept 1974, Sup't of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

