

2ej  
44 1984



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ANALISIS COMPARATIVO DE MEDIDORES DE  
RADIACION SOLAR**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**F I S I C O**

**P r e s e n t a :**

**Ana María Soler Arechalde**



México, D. F.

1984



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 está 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.

## I N D I C E

	INTRODUCCION	1
1.	CARACTERISTICAS DE LA RADIACION SOLAR	7
	1.1 El Sol	7
	1.2 Espectros Estelares	8
	1.3 Espectro Solar	10
2.	SENSORES DE RADIACION SOLAR	15
	2.0 Antecedentes	16
	2.1 Clasificación	16
	2.2 Piranómetros del siglo XIX	20
	2.3 Piranómetros Modernos	24
	2.4 Celdas Fotovoltaicas	46
	2.5 Piranómetros Empleados	49
3.	DESCRIPCION EXPERIMENTAL	53
	3.0 Antecedentes	53
	3.1 Pruebas	54
4.	ANALISIS DE RESULTADOS	66
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
6.	BIBLIOGRAFIA	84
7.	APENDICES	86
	A. Modelo Matemático pra la estimación de la radiación solar y temperatura ambiente instantáneas.	86
	B. Simulador Solar	94
	C. Instructivos	97

## INTRODUCCION

La necesidad de localizar zonas óptimas para el desarrollo y funcionamiento de dispositivos que operan aprovechando la energía solar llevó a varias instituciones a la instalación de estaciones solarimétricas en diversos lugares de la geografía nacional. Una de esas instituciones es el Instituto de Ingeniería de la UNAM (IdeI), que cuenta con cinco estaciones solarimétricas instaladas en: Cuernavaca, Tonanzintla, Celaya, Tlaxcala y Ciudad Universitaria en el Distrito Federal. Cada estación cuenta con un sensor INSOLAR de fabricación nacional, un almacenador de datos analógico-digital llamado CODA2, diseñado en el Instituto de Ingeniería, y una grabadora de cinta compacta. La información adquirida en forma de un registro

en la cinta compacta, es procesada posteriormente en las instalaciones del I de I para integrarla a una base de datos operada en una computadora Digital PDP-11-40.

Anteriormente a la instalación de la red solarimétrica, en el IdeI se elaboró un modelo matemático del comportamiento instantáneo de la radiación solar, cuyos resultados se comparan con estimaciones realizadas a partir de datos meteorológicos. Esta experiencia ha permitido detectar dos irregularidades notables e importantes en la información obtenida por la red solarimétrica:

- Desplazamiento del pico de mayor radiación hacia la tarde. (Comparar figs. 1 y 2).
- Achatamiento de las curvas en días muy claros.

Estas irregularidades fueron ubicadas, (después de eliminar la posibilidad de un comportamiento no lineal en los CODA2), en posibles errores de diseño o fabricación de los sensores INSOLAR.

Tratando de explicar el problema se consultó la información escrita presentada por el fabricante. En esta información el fabricante manifiesta, para el modelo ZK, que es el de los piranómetros instalados en la red, que "el transductor va sobre el disco metálico masivo, lo cual ha resuelto óptimamente el circuito termoeléctrico, y da al instrumento una estabilidad y sensibilidad hasta ahora no alcanzada en aparatos

tos comerciales". Dentro de la misma información es notable la ausencia de datos sobre la linealidad del aparato (Ver apéndice C). Considerando esta información como insuficiente para explicar los fenómenos manifestados se procedió entonces a consultar al fabricante en persona, el cual manifestó que su aparato no era de alta precisión y que la compensación térmica a través de la temperatura del plato era adecuada para usar el instrumento en el establecimiento de medidas diarias de insolación, más que para medidas instantáneas. Esto lo justificó diciendo que la temperatura del plato variaba de la misma manera que una función senoidal con un ciclo de 24 horas (Ver fig. 29). Ahora bien, siendo que las mediciones negativas son rectificadas a través de un diodo a la entrada del microprocesador y que la variación senoidal implica valores negativos resulta que tal compensación no es posible en el sistema en su diseño actual.

Como resultado de esta investigación inicial se decidió entrar en detalle en el análisis del comportamiento del piranómetro INSOLAR, que es lo que este documento presenta.

Con objeto de comprender la variable que debe medir un instrumento solarimétrico se estudió la fuente de radiación, es decir, al Sol (Cap. 1). Después se procedió a estudiar la historia y el funcionamiento de otros piranómetros, para analizar la posibilidad de desarrollar uno nuevo en el IdeI (Cap. 2). Con estos elementos se procedió a realizar los experimentos que se consideraron necesarios para caracterizar el comportamiento

de los aparatos en estudio (Cap. 3). Una vez realizados los experimentos y analizados los resultados se decidió estudiar la posibilidad de utilizar un elemento compensador térmico de tipo electrónico, pues los resultados no son confiables con la compensación por masa térmica, como lo manifestaba el fabricante (Cap. 4).

Con respecto al problema del achatamiento en las curvas, se analizaron los datos característicos de los sensores y el microprocesador instalados cuando se presentaba.

Se decidió que el origen del error no estaba en los aparatos, sino en su interconexión, pues el valor de salida del sensor era mayor que el valor máximo admitido por el amplificador de entrada del microprocesador. El cambio de este dispositivo, por uno que admitiera señales en el intervalo de operación deseado solucionó el problema.

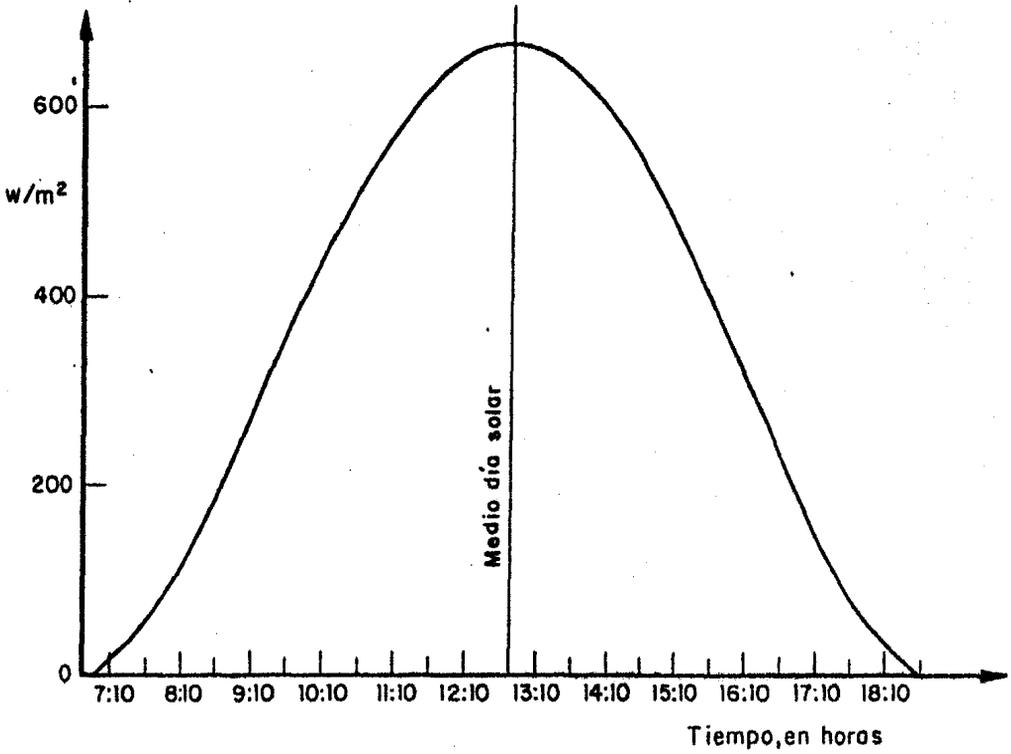


Fig 1 Estimación de la radiación solar recibida el día 9 de Noviembre de 1981 en la Cd. de Celaya Gto. de acuerdo a modelo matemático

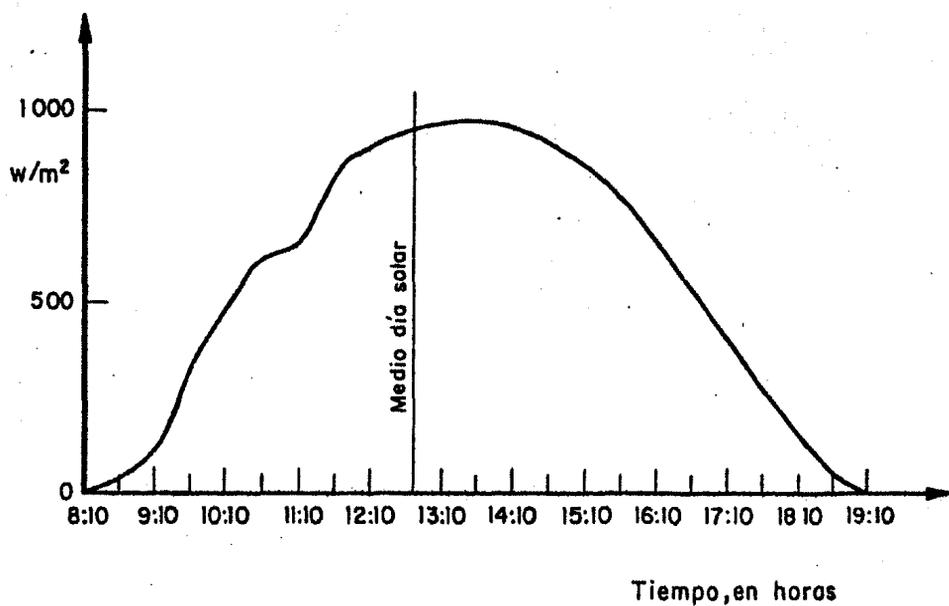


Fig 2 Radiación solar recibida el día 9 de Noviembre de 1981 en la Cd. de Guanajuato, Gto. con sensor insolar

## 2. CARACTERISTICAS DE LA RADIACION SOLAR.

### 2.1. El Sol.

Para comprender en detalle al fenómeno de la radiación solar se procedió a establecer las características más importantes de su fuente en cuanto a la generación y el transporte de la energía. Estas características que se manifiestan de manera particular en cada una de las capas definidas para el Sol (Fig. 3) se resumen en la tabla 1. Como se puede observar se han establecido seis capas distintas en las cuales ocurren fenómenos de transferencia de calor de tipo radiativo y convectivo en temperaturas y densidades que varían de manera notable de una capa a otra [1].

En los procesos de radiación internos al Sol se han establecido procesos de emisión de energía en forma de radiación electromagnética en un amplio intervalo de longitudes de onda que incluye desde ondas de radio, hasta rayos gamma. A continuación se presenta una descripción de los espectros estelares y lo que representan para después establecer el espectro solar.

## 1.2 Espectros estelares

El análisis espectral de Kirchhoff define los tres tipos posibles de espectros: continuo, de emisión y de absorción [1]. Estos análisis garantizan que cada elemento tiene una serie de líneas características que lo diferencian de los demás. Así, cuando se observa un espectro estelar se puede saber que elementos lo producen, la temperatura, presión, turbulencia, la presencia de campos magnéticos o eléctricos y si la estrella o fuente se acerca o aleja del detector [1]. La mayoría de las estrellas son de la misma naturaleza química y están compuestas principalmente por hidrógeno. Si se observan dos espectros diferentes se debe esencialmente a diferencias de temperatura. Esto se detecta por el grado de ionización en el que se encuentra el elemento. Por ejemplo, en las estrellas frías, el hidrógeno se encuentra neutro y sólo puede absorber fotones que puedan elevarse del primer nivel a mayores niveles produciéndose las características líneas oscuras de la serie de Lyman en el ultravioleta. Si por el contrario, la estrella se encuentra a grandes temperaturas no se observarán líneas de absorción pues el hidrógeno estará

completamente ionizado. Este tipo de análisis da por resultado la clasificación estelar que actualmente se usa. (Tabla 2) [1].

Una vez conocida la temperatura de las estrellas, se pueden hallar diferencias con otros espectros estelares que se sabe están a la misma temperatura. Por ejemplo, la presión juega un papel muy importante en el grado de ionización, o sea en la razón de átomos ionizados, pues a mayor presión es menor esta razón ya que se facilita la recapturación de electrones en dichas condiciones.

Otros efectos presentes en el estudio espectral son:

**Ensanchamiento Natural:** Los átomos poseen niveles discretos de energía no perfectamente marcados, por lo que emiten y absorben en un pequeño intervalo de energía en el cual está la energía nominal del átomo.

**Ensanchamiento Doppler:** Dado que los átomos se hallan a muy altas temperaturas y por lo tanto a grandes velocidades respecto a la Tierra se da el Efecto Doppler, por lo que medimos mayores o menores longitudes de onda si el cuerpo se aleja o acerca al detector.

**Ensanchamiento por colisiones:** Los niveles energéticos atómicos se pueden perturbar por la presencia de otros átomos o iones, pudiendo aún llegar a colisionar, este fenómeno ocasiona que el átomo absorba fotones a longitudes de onda diferentes, lo que aparece en el espectro como líneas fuera de lugar.

D. Efecto Zeeman: Desdoblamiento de líneas del espectro en dos o más según la magnitud del campo magnético.

Cuando se obtiene un espectro continuo de una atmósfera estelar, el estudio es más fácil pero la información es menor. Lo que se tiene es la opacidad de la atmósfera por la presencia de iones negativos del hidrógeno y de aquí la presión, temperatura, densidad y también el flujo de radiación que, manteniendo el incremento de temperatura con la profundidad da a conocer el modelo fotosférico.

### 1.3. Espectro solar

. Composición Química. Más de 60 elementos conocidos sobre la Tierra han sido identificados en el espectro solar. La mayoría se encuentran en forma atómica, pero más de 18 tipos de moléculas han sido identificadas, la mayoría en las regiones frías del Sol. La relativa abundancia de los elementos químicos en el Sol es similar a la hallada en otras estrellas: alrededor de un 60% a 80% de Hidrógeno, de un 19% a un 36% de Helio y el por ciento restante de otros elementos químicos.

Espectros de las capas solares externas.

Fotosfera. Aquí la mayor parte de la absorción de la luz visible se debe a la presencia de los iones negativos del hidrógeno, por lo que se obtendrán en el visible líneas de absorción.

Cromósfera. El espectro muestra líneas brillantes o de emisión debido a los gases calientes de esa capa; estas líneas se observan en el ultravioleta, rayos X, infrarrojo y longitudes

de onda de radio.

Corona: En el intervalo visible del espectro posee tres com  
ponentes que son:

- F. Parte de la luz solar reflectada y que presenta las mismas líneas oscuras del espectro fotosférico.
- K. Parte de la luz fotosférica reflejada por los electrones libres, todas las líneas de absorción son vistas fuera, dejando un espectro continuo.
- 3a. Consiste de líneas brillantes de emisión superpuestas sobre la luz de las K y F que son líneas de calcio níquel y hierro. Dada la alta temperatura de la capa, la mayoría de las líneas se hallan en el ultravioleta.

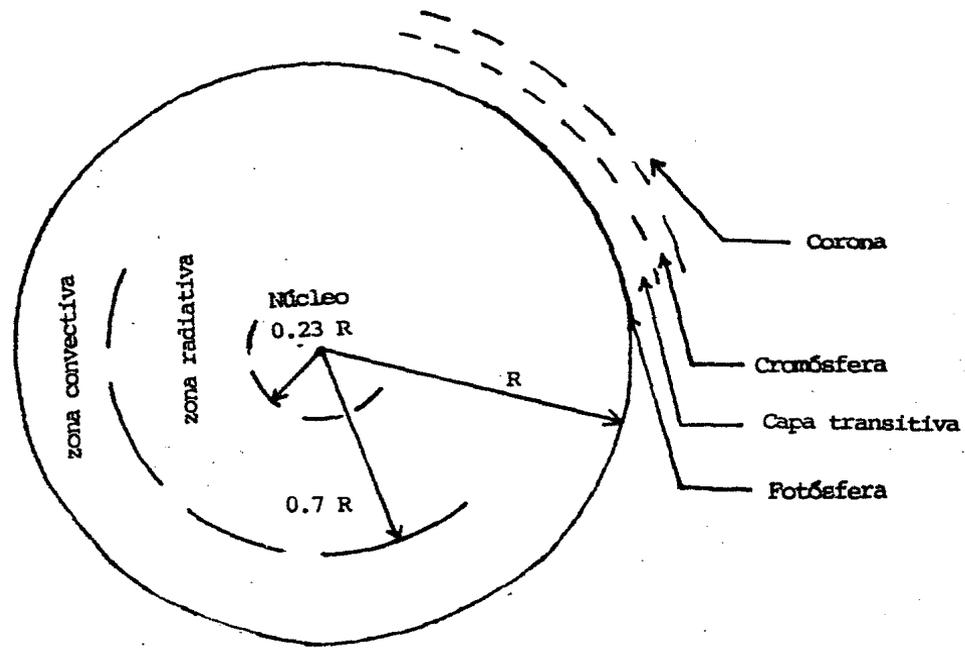


Fig. 3 Estructura estratigráfica del Sol.

TABLA 1. Estructura Solar

CAPA	CARACTERISTICAS	DENSIDAD	TEMPERATURA	ENERGIA
NUCLEO	Aquí se encuentra el Helio y es la fuente de rayos y electrones rápidos.	Diez veces la de los metales ordinarios	$27 \times 10^6$ K	En esta capa se da la cadena protón-protón para fusionar hidrógeno en helio, también se da el Ciclo Carbón-Carbón y el decaimiento Boro 8 a Berilio 8.
RADIATIVA	Densa capa de gas caliente muy opaca a los rayos.	De $0,1 \text{ g/cm}_3^3$ a $12,5 \text{ g/cm}^3$	De $1,3 \times 10^6$ K a $9,0 \times 10^6$ K	Aquí se da el proceso de emisión-absorción.
CONVECTIVA	Capa muy opaca, pero muy caliente.	De $2,0 \times 10_3^{-7} \text{ g/cm}^3$ a $0,1 \text{ g/cm}^3$	De 6800 K a $1,3 \times 10^6$ K	Dada la alta temperatura se da el proceso convectivo, saliendo la energía en forma de luz y calor.
FOTOSFERA	Capa de la cual vemos la luz emerger.	De $2,8 \times 10^{-8} \text{ g/cm}_3^3$ a $2,0 \times 10^{-7} \text{ g/cm}_3^3$	De 4500 K a 6800 K	Aquí se da el proceso emisión-absorción y además el convectivo.
CROMOSFERA	Capa más caliente y dinámica. Presenta grandes celdas convectivas.	Menor a $2,8 \times 10^{-8}$	De 6800 K a 100 000 K	La energía es bombeada al exterior por el movimiento de las celdas convectivas, ondas de presión provenientes de estas y choques.
CORONA	Atmósfera exterior muy delgada y caliente, cargada eléctricamente y retenida al Sol por medio de campos.	Del orden de $10^{-14}$	Del orden de $10^6$ K	El mecanismo de gran calentamiento de la corona es debido a las ondas de choque generadas en la convección atmosférica.

Tabla 2. Clasificación Estelar.

TIPO	COLOR	TEMPERATURA	ESPECTRO	EJEMPLOS
O	Azul	Mayor a 25000 K	Pocas líneas de absorción en el espectro observable. Líneas de Helio ionizado, hidrógeno doble ionizado, silicio triplemente ionizado y líneas de hidrógeno débiles.	10 Lacertae
B	Azul	De 11000 a 25000K	Líneas de Helio neutro, silicón simple y doblemente ionizado, oxígeno y magnesio - una vez ionizado y líneas de hidrógeno más marcadas.	Rigel y Spica
A	Azul	De 7500 a 11000 K	Fuertes líneas de hidrógeno. Sólo líneas de ionización simple de magnesio, silicio, titanio y calcio. Débiles líneas de metales neutros.	Sirio y Vega
F	Azul a Blanco	De 6000 a 7500 K	Líneas más delgadas de hidrógeno pero más notorias. Líneas de ionización simple de calcio, acero y cromo. Líneas neutrales de acero, cromo y metales neutros.	Canopus y Procyon
G	Blanco a Amarillo	De 5000 a 6000 K	Líneas de Calcio ionizado muy notorias. Líneas de hidrógeno más débiles que en las anteriores. Muchas líneas de metales neutros y ionizados. Bandas de CH y radical CH muy fuertes.	Sol y Capella
K	Naranja a Rojo	De 3500 a 5000 K	Predominan líneas de metales neutros. Bandas de CH aún presentes.	Arturo y Aldebaran
M	Rojas	Menores a 3500 K	Fuertes líneas de metales neutros y bandas moleculares de óxido de Titanio	Betelgeuse y Antares.

## 2. SENSORES DE RADIACION SOLAR

### 2.0. Antecedentes

Cuando se empezó a detectar errores en las mediciones del piránómetro nacional se exploró la posibilidad de sustituirlo con ventaja, por un medidor de radiación distinto en concepto y en diseño. Para ello, se efectuó un inventario de diseños alternativos de aparatos con propósitos similares, que se describe brevemente enseguida. Nótese que, de la inspección de esos diseños, se desprende que es más accesible resolver los problemas detectados en el aparato nacional que intentar un nuevo diseño, dada la complejidad mayor de los diseños alternativos.

### 2.1 Clasificación

Los sensores de radiación solar se pueden clasificar en: térmicos piroeléctricos y fotodetectores.

Operan detectando el incremento de temperatura de algún material, que se produce como resultado de la transferencia de energía radiante en el espectro térmico, de una fuente al sensor. Se pueden clasificar en tres tipos distintos: calorímetros, termoeléctricos y bolómetros.

a. Calorímetros: funcionan a partir de un cambio de temperatura en el material, determinando así la energía radiante absorbida. Sensores de este tipo son los piranómetros de flujo de agua y de discos de plata del Instituto Smithsonian, el piranómetro Marvin, el Robitzsch y el Michelson. También se encuentran en esta categoría el piranómetro Eppley de compensación eléctrica, en el cual el cambio de temperatura por la absorción de radiación de un elemento es reproducida por una medida del monto de energía eléctrica en un elemento secundario. La celda Golay, que también corresponde a esta clasificación, funciona detectando el cambio de presión de un gas contenido en un recipiente cerrado y expuesto a la radiación. Estos detectores tienen como ventaja su simplicidad, pero no tienen suficiente sensibilidad y son muy lentos para responder a los cambios bruscos en la excitación.

b. Termoeléctricos: Operan bajo el principio de una fuerza electromotriz producida por la diferencia de temperaturas en la unión de dos metales y una de referencia. Esta fuerza es muy pequeña para un sólo termopar, pero puede incrementarse conectando varios en serie, formando una termopila. Son sensores de este tipo los pirheliómetros Eppley, Linke-Feussner y Savinov-Yanishevsky.

c. Bolómetros: La variación en la resistencia de un elemento semiconductor con la temperatura es su modo de operación. Su funcionamiento requiere de un circuito electrónico donde dos resistencias constituyen los brazos de un puente de Weathstone. Si un elemento es expuesto a la radiación mientras que el otro no, la diferencia

relativa de temperaturas generada resulta en un desbalance en <sup>17</sup> el puente. Por calibración propia el desbalance puede ser entonces interpretado en términos del flujo de energía radiante incidente sobre el elemento expuesto. Los bolómetros pueden ser de tres clases: metal, semiconductor y superconductor. De todos estos, debido a que el superconductor requiere de temperaturas cercanas al cero absoluto y a que el metal no es tan sensible, el bolómetro de semiconductor es de uso más común para medidas atmosféricas.

### Piroeléctricos.

En estos sensores la radiación es absorbida por cristales piroeléctricos, convirtiéndose en calor y alterando la estructura cristalina, lo que causa cambios en la polarización eléctrica espontánea del cristal. Para medir la variación de la radiación se conectan electrodos en la superficie del cristal, siendo la corriente generada proporcional a la razón de cambio de temperatura en el cristal. Las facetas más atractivas de los detectores piroeléctricos son su rapidez de respuesta y el gran ancho de banda espectral a la que son sensibles. Su desarrollo es reciente y presenta problemas de degradación del tiempo de respuesta. Sin embargo, esto último parece deberse más al sistema electrónico que al cristal, por lo que se piensa tienen interesantes posibilidades para realizar medidas atmosféricas en el intervalo del infrarrojo.

### Fotodetectores.

Este sensor es activado por eventos discretos de fotones que incidan

en el material. Aunque no todos los fotones incidentes sobre el detector causan un evento (la eficiencia cuántica típica va del 0.1 al 10%) y los electrones gastados van a calentar el detector, el monto de calentamiento por fotones no efectivos es despreciable para la mayoría de los fotodetectores. La ventaja del censo de eventos discretos son la mayor sensibilidad y velocidad de respuesta del detector. Existen tres clases de fotodetectores: fotovoltaicos, fotoconductivos y fotoemisivos.

- a. Fotovoltaicos: su forma de operar consiste en la generación de un voltaje a partir de la incidencia de fotones sobre la celda. Este fotovoltaaje es proporcional a la cantidad de radiación. Tienen la ventaja de medir diferencias de intensidad luminosa sin necesidad de fuentes externas de poder. Las más comunes son las celdas de selenio y silicio.
  
- b. Fotoconductivos. En estas celdas la conductividad eléctrica varía con el flujo incidente de radiación. Tienen la desventaja de requerir enfriamiento, por lo que aumentan la complejidad de los sistemas de medición.
  
- c. Detectores fotoemisivos: Tanto en los detectores fotovoltaicos como en los fotoconductivos, los electrones que son desalojados de las moléculas por la absorción de fotones dentro del material producen cambios de voltaje a lo largo de él o un cambio de la conductividad del material. En los detectores fotoemisivos, los electrones son desalojados del material, por medio del efecto fotoeléctrico son recolectados por un ánodo, dándose un flujo de corriente a través del detector. Estos

también pueden ser sujetos a un campo eléctrico de alta intensidad y acelerarlos a una segunda placa con energía suficiente para desalojar a un mayor número de electrones. Estos electrones secundarios son de nuevo acelerados a un tercer blanco y así sucesivamente para formar una cascada de electrones. En tubos bien diseñados se obtienen factores multiplicativos de hasta  $10^6$ , aumentando su sensibilidad.

Otros dispositivos fotoemisivos son las fotoceldas al vacío y las rellenas de gas. La simplicidad de la fotocelda al vacío, la cual está constituida por un cátodo sensible a la luz y un ánodo colector, la hace poseer una muy alta velocidad de respuesta, pero una baja sensibilidad para radiación atmosférica. La fotocelda llena de gas es un detector más sensible que el anterior, pero no es tan simple su uso. Los tubos llenos de gas tienden a ser inestables y con tiempos de respuesta mayores.

## 2.2. Piranómetros del siglo XIX.

Callendar: Este piranómetro fue inventado por H.S. Callendar en 1898 y una nueva versión mejorada apareció en 1905. El sensor está hecho de cuatro rejillas de alambre enrolladas sobre tiras de mica y conectadas en pares de tal manera que cada par constituye un termómetro de resistencia eléctrica. Un par de rejillas se cubre con esmalte negro para promover la absorción de luz, mientras que el otro par se deja sin cubrir, quedando expuesto metal de platino, que es un buen reflector. Los alambres están arreglados en configuración de tablero y montados en una cápsula al vacío. (Ver fig. 4). -La diferencia de temperaturas que se desarrolla entre cada par de alambres expuestos a la radiación solar, es proporcional a la intensidad de radiación incidente en ellas- de acuerdo a Callendar y Fowlers.[3]

La diferencia de temperaturas entre cada par de alambres se guarda al conectar dos brazos (como un puente Weathstone) con una pluma que hace un trazo en un tambor rotatorio. Cada instrumento está acompañado por un factor de calibración el cual permite interpretar la diferencia de temperaturas registradas en términos del flujo de energía radiante a la cual está expuesto el instrumento. El factor de calibración de que está provisto se supone independiente de la intensidad, dirección y longitud de onda de la radiación y de la temperatura de los alambres. Este instrumento fue desplazado con el desarrollo de los sensores termoeléctricos.

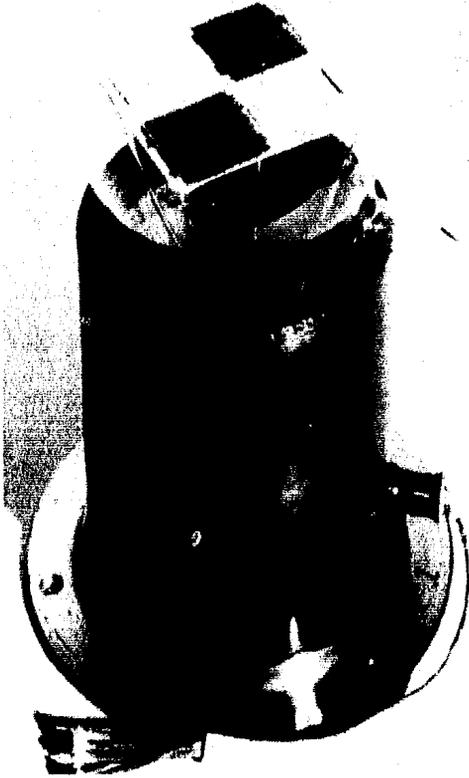


Fig. 4 Fotografia del piranómetro Callendar.

Angström: El principio de compensación eléctrica usado por K. Ångström en su piranómetro a finales del siglo XIX fue la base para el que desarrolló él mismo dos décadas después. El diseño del piranómetro se muestra en la fig. 5. La superficie receptora consta de dos tiras blancas (aa), cubiertas de óxido de magnesio y dos tiras negras (bb) cubiertas de platino negro. Las cuatro tiras están montadas lado a lado sobre una estructura aislada en el final de un cilindro níquel-plata y las uniones térmicas se sujetan en buen contacto térmico a las espaldas de las tiras, pero aisladas de ellas eléctricamente. Las tiras blancas son conectadas a través de un miliamperímetro y de una resistencia variable a una batería de bajo voltaje. El hemisferio de vidrio (g) se sostiene por medio de un disco de metal (d), dentro del cual está insertado un frasco con un agente secante. La operación del piranómetro es la misma que la de cualquier instrumento de tipo compensativo. Las tiras blancas se mantienen a la misma temperatura por un calentamiento de tipo eléctrico compensando la mayor energía absorbida por las tiras negras.

A pesar de sus atractivas facetas nunca tuvo un uso muy difundido.

Smithsonian: El sensor consta de dos tiras de manganín ennegrecidas. La superficie expuesta tiene 6mm de largo por 2mm de ancho. La tira b es 10 veces más delgada que la a y por lo tanto tiene una mayor conductividad térmica que la a. Las terminaciones de ambas tiras se soldan a postes de cobre con buen contacto térmico con las placas de níquel-plata. Las tiras están aisladas eléctricamente de los bloques de cobre y de las

otras mediante micas delgadas. Los termoelementos de platino y telurio van unidos por un papel de cera a las espaldas de las tiras de mangánin y son conectados en serie a través de un galvanómetro sensible de tal forma que el monto de la deflección del galvanómetro indica la diferencia de temperaturas en las tiras. Nunca tuvo uso general debido al uso del galvanómetro.

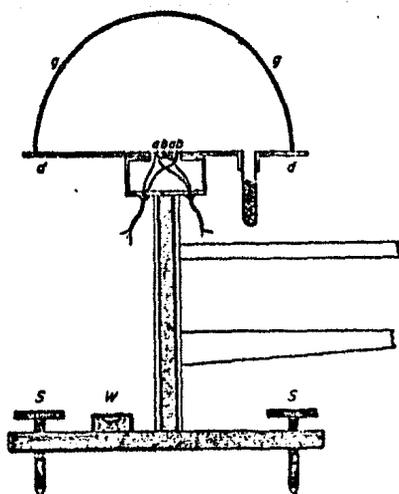


Fig. 5 Diagrama esquemático del piranómetro Angström con compensación eléctrica, a tiras blancas; b, tiras negras; g, hemisferio de cristal montado en el disco d; S, tornillos de ajuste; W, nivel.

### 2.3. Piranómetros Modernos

La Organización Meteorológica Mundial ha definido tres clases de piranómetros con base en su precisión y el desempeño del sistema en general. Todos los piranómetros tienen que calibrarse respecto a una radiación primaria patrón, para ser utilizados como medidores de rutina. Las bases para la clasificación se presentan en la Tabla 3.

Los piranómetros existentes hasta 1965 de acuerdo a sus características fueron agrupados de la siguiente forma:

Primera Clase:	Piranómetros de Termopila Referenciales
Segunda Clase:	Piranómetros: Kipp, Moll-Gorczyński, Eppley, con termopilas Volacine, Dirmhirn-Sauberer, Termoeléctrico Yanishevsky, Esférico Bellani.
Tercera Clase:	Piranómetro Bimetálico Robitzsch.

Durante 1965 se desarrollaron nuevos tipos de piranómetros basados tanto en termopilas de Eppley, como en celdas solares de silicio. Dada la precisión espectral de los Eppley se reclasificaron en primera clase, pero los de blanco y negro quedaron en la segunda. Los basados en celdas solares, dada su sensibilidad espectral restringida y su funcionamiento general, en la tercera clase.

	1a. Clase	2a. Clase	3a. Clase
Sensibilidad (mW/cm <sup>2</sup> )	± 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	± 5-7	± 10,0
Respuesta azimutal (desviación asumida tomando un día claro - %)	± 3,0	± 5-7	± 10,0

Tabla 3 Clasificación Piranométrica

Piranómetro Eppley: Es el piranómetro de uso más común en los Estados Unidos; en Europa los más comunes son los Moll-Gorczyński y los Robitzsch. El sensor de este instrumento es una termopila de Oro y Paladio y de aleaciones Platino-Rodio cuyas uniones se encuentran en buen contacto térmico pero aisladas eléctricamente de los anillos concéntricos del disco. El disco tiene un diámetro total de 29 mm. Dentro se encuentran anillos planos y delgados con un disco pequeño, todos ellos aislados térmicamente de los demás. El anillo exterior y el pequeño disco están cubiertos de óxido de manganeso, material de alta reflectancia para la radiación en el intervalo de longitudes de onda del espectro solar. El anillo interior va ennegrecido con laca negra óptica de Parson, lo que da por resultado poca reflectancia. Dada la diferencia en reflectancia de los anillos blancos respecto a los negros, adquieren diferentes temperaturas al exponerse a radiación, causándose una fuerza electromotriz en las termouniones.

La diferencia de temperaturas entre las uniones frías y calientes es una función del monto total de radiación de longitud de onda corta sobre el aparato. Dada su propia calibración, el voltaje de la termopila puede ser interpretado en términos de la radiación solar incidente. La cápsula de vidrio que rodea el disco sensitivo se llena de aire seco a la presión atmosférica en el momento de manufactura. La cápsula en sí es aproximadamente esférica de 76 mm de diámetro y hecha de vidrio de sodalime de aproximadamente 0.6 mm de espesor. Como se puede ver en la curva típica de transmisión contra longitud de onda para el vidrio (Fig. 6), los efectos selectivos en la transmi-

sión para el vidrio son menores. También se ve que la transmisión permanece constante entre 0.36 y 2.6 nm. De acuerdo a Thakaerara, el 92.5% de la irradiancia solar extraterrestre cae en el intervalo antes mencionado y el 97.9% de la irradiancia solar se encuentra entre 0.305 y 4.4 nm [3]. Entonces el instrumento responderá selectivamente con longitudes de onda cerca de los límites efectivos del espectro solar y no introducirá graves errores en los resultados. Para propósitos prácticos, los efectos de selectividad espectral por el vidrio son despreciables.

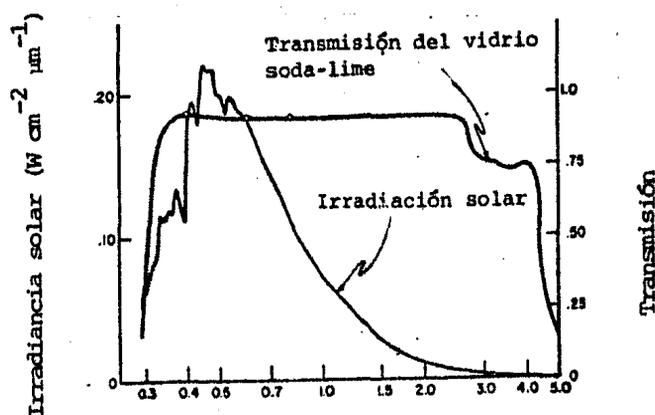


Fig. 6 Características de transmisión del vidrio soda-lime que cubría el modelo antiguo del piranómetro Eppley comparado con la distribución espectral de la radiación solar.

Los piranómetros Eppley no compensados están sujetos a una significativa dependencia de sensibilidad a la temperatura del instrumento. Desafortunadamente este factor ha sido abandonado por mucho tiempo en los datos publicados para medidas de radiación. Su sensibilidad decrece con el incremento de temperatura entre un 0.5% y un 1.5% por grado centígrado en el intervalo de -50 a 40 °C. Mientras que la respuesta normal de termopares se incrementa con la sensibilidad a la temperatura, esta disminuye debido a los efectos convectivos dentro de la cápsula del pirheliómetro.

Los resultados de tres pruebas diferentes de cambios de respuesta en el instrumento con la temperatura para un valor constante de la irradiación se muestra en la fig. 7. Los datos son promedios y fueron obtenidos con dos instrumentos probados por el National Bureau of Standards, cinco del Weather Bureau y dos por el Drummond.

Una considerable mejora en el dispositivo Eppley fue la inserción de un termistor de alrededor de 2000 ohms en serie con una de las puntas de la termopila. Mientras el coeficiente positivo de temperatura del termistor es mucho mayor en magnitud absoluta que el coeficiente negativo de la temperatura de la termopila, un "shunt" con una resistencia de 1500 ohms se introduce al circuito. La compensación de la temperatura se produce por la disminución de la resistencia, con un decremento consecuente en la caída de potencial en el circuito, al incrementarse la temperatura del termistor. El termistor se inserta en el sumidero de calor del elemento receptor y por lo tanto está sujeto a la temperatura del elemento mientras es protegido de la radiación incidente. (Ver Fig. 7).

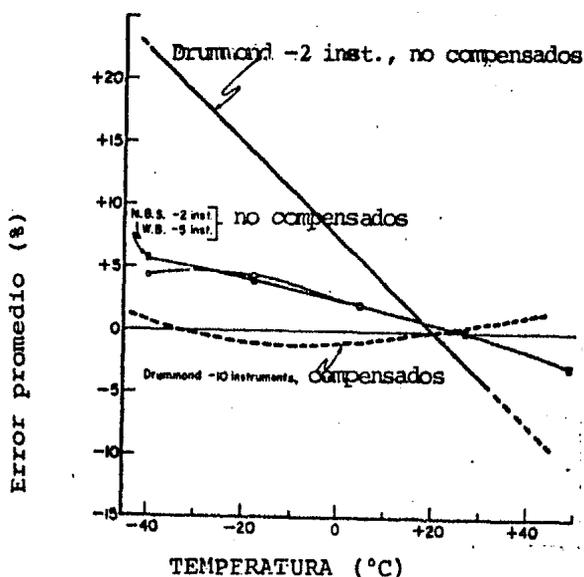


Fig. 7 Gráfica del error promedio como función de la temperatura para piranómetros Eppley compensados térmicamente.

La mejora del sensor obtenida con la inserción del termistor se puede ver en la última curva de la Fig. 7. Los datos son los promedios de resultados obtenidos en diez instrumentos de temperatura compensada expuestos a una radiación de  $1.2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$  y han sido normalizados para indicar error cero a  $20^\circ \text{C}$ .

El Eppley, al igual que otros, está sujeto a un error adicional asociado a cambios en el ángulo de incidencia de la radiación sobre el detector. Pruebas de ello, reportadas por Mc Donald [3], se muestran en la tabla 4; estos muestran errores considerables para ángulos mayores a  $60^\circ$ . Probablemente esto sea debido a cambios en la reflectancia de las superficies reflectoras, con el ángulo de incidencia -particularmente el negro-, o bien a impurezas en el vidrio de la cápsula.

Drummond [3], en 1965, estima que se obtienen errores del 2 al 3% para promedios diarios de radiación con los Eppley compensados. Para promedios de una hora se debe ser más cuidadoso con la calibración, pues los errores pueden ser de un 5% o más, particularmente a bajas elevaciones del Sol. Es razonable esperar que aparezcan errores de hasta el doble en medidas rutinarias de un equipo bien cuidado. El equipo mal cuidado puede presentar errores sistemáticos mayores al 10% en promedios mensuales, por lo que se recomienda calibración frecuente y mantenimiento constante.

Angulo de incidencia	Número de pirheliómetro			
	1754 (%)	1973 (%)	1220 (%)	1221 (%)
0	0	0	0	0
30	+3	0	+2	+2
60	+5	+1	0	-1
70	-	-	-6	-4
75	+1	-	-	-
80	-	-21	-19	-18
85	+3	-	-	-

Tabla 4. Errores causados por la respuesta de un instrumento no siendo directamente proporcional al  $\cos$  del ángulo de incidencia de la radiación sobre el detector

Eppley Blanco y Negro: El detector de este instrumento es una termopila de alambre enrollado hecha por electroplateado de cobre sobre constantán. Las juntas calientes y frías están cubiertas de Negro óptico de Parsons y Sulfato de Bario, respectivamente. De acuerdo a las especificaciones dadas por el fabricante, la estructura de compensación de temperatura provee una señal, la cual es independiente de la temperatura en el intervalo de  $-20^{\circ}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ . La sensibilidad es de alrededor de  $7.5 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  y la desviación en relación al ángulo de incidencia de  $0$  a  $80^{\circ}$  es de  $2\%$ . Una importante novedad es el vidrio de la cápsula, el cual es removible lo que facilita la limpieza y reparación de la superficie sensora (Figs. 8 y 9).

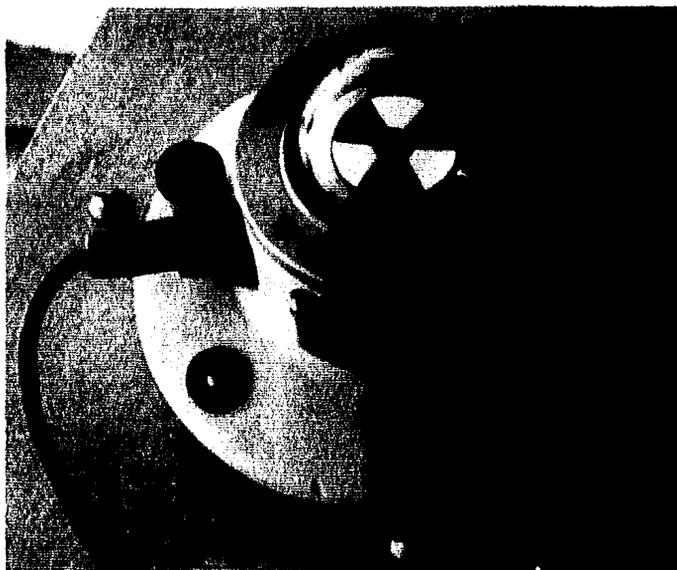


Fig. 9 Piranómetro Eppley blanco y negro

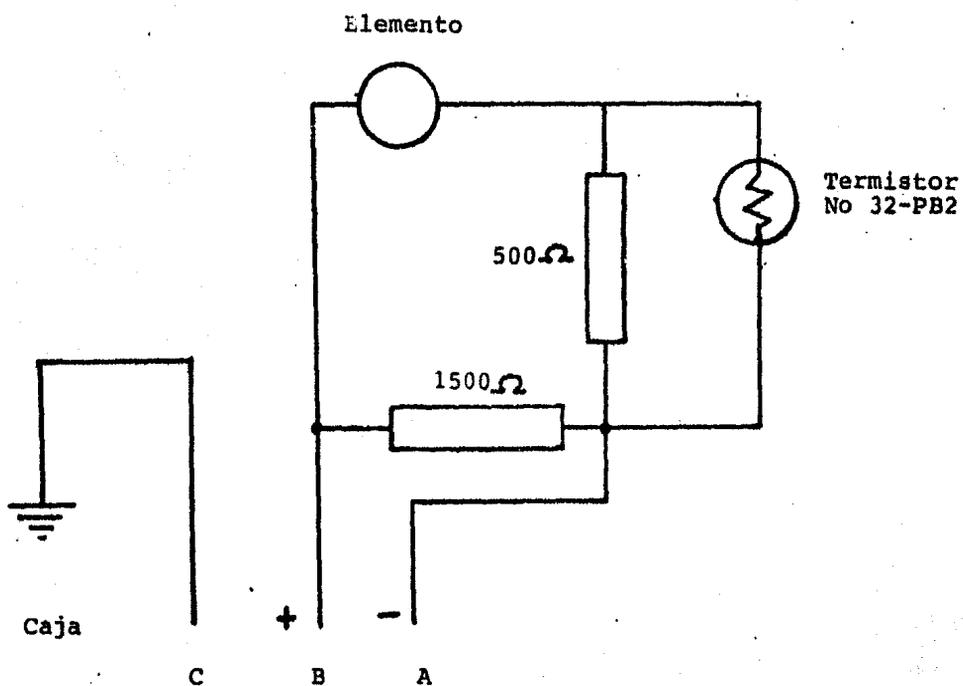


Fig. 8 Circuito de compensación térmica de un Piranómetro Eppley Blanco y Negro

**Eppeley de Precisión Espectral:** El primer modelo de este instrumento se utilizó en 1957. Las innovaciones respecto al primero fueron: a ) Compensación eléctrica para la dependencia de la sensibilidad con el medio ambiente, b ) Compensación óptica para la desviación de respuesta de acuerdo a la ley del coseno y c ) Posibilidad de uso de filtros para diferentes bandas espectrales. El detector del modelo original es una termopila convencional de bismuto de plata de 15 uniones que generan alrededor de  $7 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ .

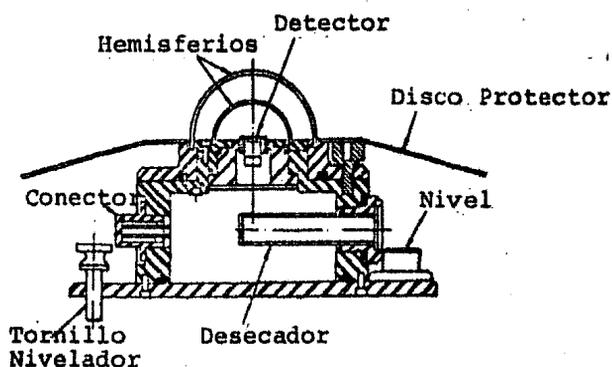


Fig.10 Corte transversal de un modelo común de piranómetro Eppeley de precisión espectral.

Una segunda versión de este instrumento de precisión, que es un modelo en producción común, es considerablemente menor en tamaño que la versión original y utiliza termopilas de cobre

electroplateadas a alambre de constantan sobre una mitad de cada termopila de alambre enrollado. El diseño del modelo común se muestra en la Fig.10. y sus especificaciones son:

Sensibilidad	5mV/cal cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
Impedancia	300 Ohms
Dependencia con la Temperatura	5% de -20 a 40°C
Error de coseno	1% sobre un ángulo de 0° a 80°
Tiempo de Respuesta	1 segundo
Respuesta lineal	4 cal cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>

Este instrumento cuenta con la versatilidad de poder reemplazar el hemisferio exterior por filtros, para medir la radiación en diferentes bandas espectrales. Una característica que debe mencionarse también es su aparente cambio de sensibilidad con el uso de filtros. Las causas de este aparente incremento en la sensibilidad son: un aumento de temperatura del filtro de vidrio por la absorción de radiación solar, con su consecutivo calentamiento del hemisferio interior, y una modificación en la distribución de la radiación de longitud de onda larga al detector.

Espectrolab: En apariencia externa es el mismo que el descrito con anterioridad. Tiene dos domos de vidrio y puede ser reemplazado de la misma manera por filtros ópticos de absorción para detectar la radiación en cierto ancho de banda. La termopila está cubierta con 3M Negro Velvet y tiene una resistencia total menor a 500 ohms.

Sus especificaciones son:

Sensibilidad	5 mV/ cal cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
Error en la Temperatura	1% de -20 a 40°C 2% de -40 a -20°C
Error por coseno	3% de 0 a 70° de ángulo de incidencia 7% de 70 a 80° de ángulo de incidencia
Tiempo de respuesta (1/e)	1.6 segundos

Moll-Gorczyński: Está basado en una termopila diseñada por el Dr. W.J. Moll. La termopila Moll, como se le conoce, fue usada por el Dr. Gorczyński para construir un piranómetro y un pirheliómetro en 1924. La termopila, para instrumentos recientes, consta de no menos de 80 termopares acomodados dentro de un círculo de 2 cm de diámetro y da arriba de 16 mV para radiación incidente de 1 cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>. La rápida respuesta de la termopila a cambios de radiación incidente, la muy pequeña dependencia con la temperatura del ambiente y la relación esencialmente lineal entre intensidad y respuesta del aparato hacen suponer un buen futuro para la medición de radiación en base a este instrumento.

El diseño básico se muestra en la Fig. 11. Las termouniones son tiras muy delgadas (0.005 mm), ennegrecidas, de manganín y constantan, unidas en el punto B y soldadas en los puntos A y C a postes de cobre (E y F); los postes están sujetos a un denso plato de latón (G); una delgada cubierta de laca entre los postes y el plato proveen de aislamiento eléctrico sin sacrificio de contacto térmico. Las uniones activas están normalmente dispuestas sobre una línea que pasa por el centro del plato y las

uniones pasivas están sobre los postes de cobre. La pequeña capacidad térmica de las tiras y la eficiencia de conducción del calor de los postes de cobre aseguran una temperatura casi constante y hacen innecesario proteger las uniones pasivas de la radiación incidente. La termopila Moll es la base del piranómetro M-G, manufacturado corrientemente por Kipp and Zonen. Este instrumento goza de considerable popularidad en Europa. La termopila del modelo corriente del Piranómetro M-G, consta de 14 elementos térmicos ennegrecidos de manganin y constantan arreglados en una configuración rectangular de 12 x 11 mm. Están protegidos por dos domos de vidrio hemisféricos concéntricos; la condensación de la humedad dentro de los domos se evita mediante la conexión a través de un tubo de los espacios cerrados a una botella de desecador como gelatina de sílice. Para evitar el calentamiento de la base del instrumento, debida a la radiación directa, se coloca un escudo de 30 cms de diámetro alrededor de el domo exterior, coplanar con el elemento sensitivo. Los domos tienen una transmisión alta y uniforme en el intervalo espectral de .32  $\mu$ m a 2.5  $\mu$ m; la transmisión cae de tajo debajo de 2.5  $\mu$ m y es constante en el ultravioleta, decreciendo a menos de .32  $\mu$ m y siendo una transmisión de 68% para longitudes de onda de .30  $\mu$ m. Aproximadamente el 3% de la energía extraterrestre está contenido en la región de longitudes de onda mayores a 2.5  $\mu$ m y sólo cerca de la mitad proviene de los alrededores. Aproximadamente el 1% de la energía extraterrestre cae en la capa de ozono con longitudes de onda entre .3  $\mu$ m y .32  $\mu$ m y es fuertemente dispersada, regresando al espacio cerca de la mitad. Mientras que el vidrio transmite cerca del 80% en ese intervalo, la energía ultravioleta bloqueada por

el vidrio es sólo del orden del 0,1% de la total, por lo que un sólo vidrio corta del orden del 1,6% de la energía solar incidente total y los dos cortan del orden del 3,2%. Esta disminución puede compensarse, por supuesto, por una calibración del instrumento, siempre y cuando la radiación usada para la calibración tenga la misma distribución espectral para la que fueron hechas las medidas. La sensibilidad del instrumento es de 8-9 mV/cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> y la resistencia interna de la termopila es aproximadamente de 10 ohms. Los montos de coeficientes de temperatura son de 0,0015 a 0,0020/°C, en el sentido de decremento de sensibilidad con incremento de temperatura. El instrumento no da compensación térmica.

Las desviaciones de la exactitud de la ley del coseno de respuesta con el ángulo de incidencia y cambios de respuesta con el azimut, pueden ser considerables fuente de error con este piranómetro. El fabricante muestra que las desviaciones de la ley del coseno de 1% para ángulos de incidencia menores a 75° y que para mayores ángulos las desviaciones son variables. Heinzpeter (1952) halló una dependencia relativamente alta de la respuesta del instrumento sobre el azimut de la fuente con respecto a la superficie sensible, siendo particularmente fuerte para grandes ángulos de incidencia. En la Fig. 13 se muestra el porcentaje de error, que está dado como función del azimut para cinco diferentes ángulos de incidencia [3]. Los datos están normalizados para no indicar error a cero azimuth. El doble máximo en las curvas se debe a la orientación no simétrica de las termouniones en la termopila Moll.

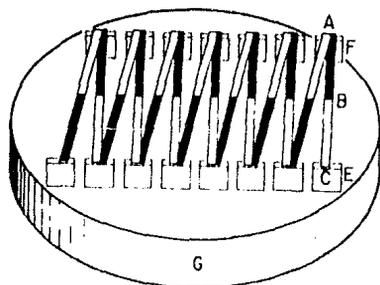


Fig. 11 Diagrama de la termopila Moll. B, uniones activas de tiras de metal; A y C, uniones pasivas de tiras de metal; E y F, postes de cobre; G, plato masivo de latón.

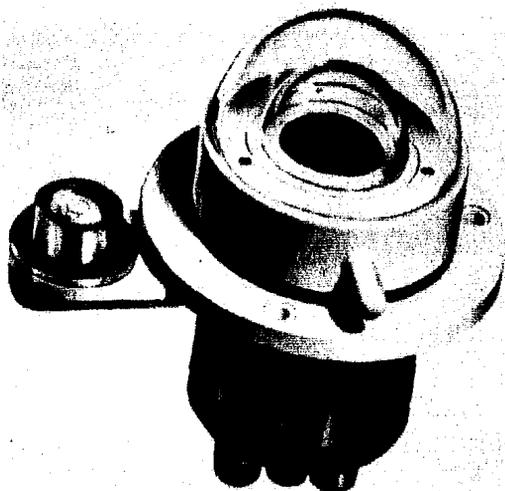


Fig. 12 Piranómetro Moll - Gorchynsky

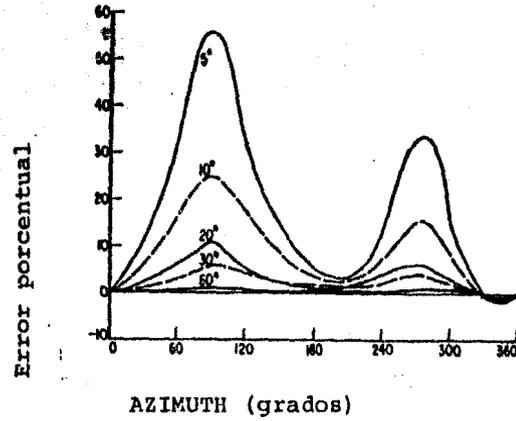


Fig. 13 Errores en la medición del piranómetro Moll-Gorczyński como función del azimuth a varios ángulos de incidencia de la radiación.

Dirmhirm-Sauber: Este piranómetro utiliza 32 placas de cobre de 50 nm de espesor, la mitad de ellas ennegrecidas para lograr alta absorción de radiación y la otra mitad, cubierta con un buen reflejante. Los dos conjuntos de placas se montan alternativamente como una estrella, formando una placa circular de aproximadamente 5 cm de diámetro.

Los dos tipos de platos quedan aislados térmicamente de los otros por estar montados sobre anillos concéntricos poco conductores, que en sí mismos están térmicamente aislados de la base principal del instrumento.

Las termouniones de cobre-constantán o de manganeso-constantán van soldadas por debajo de las placas de cobre. Las uniones calientes son ligadas a los segmentos negros y las frías a los segmentos blancos. La termopila de 32 uniones genera una fuerza electromotriz de  $1.8 \text{ mV/cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  y tiene una resistencia interna de aproximadamente 5 ohms; el tiempo de respuesta es tal que el 98% de respuesta se da, para cambios súbitos en la radiación, en 20 segundos. El disco sensible está cubierto por un hemisferio de vidrio de 2 a 3 mm de espesor y de 110 mm de diámetro que transmite más del 90% de la radiación solar de .3 a 3 $\mu\text{m}$ . La sección sensora está sellada herméticamente y el aire encerrado está en contacto con un agente secante, el cual elimina la humedad en la cara interior del vidrio. El sensor ensamblado es encerrado por una cubierta de 17 cms de diámetro y 10 cms de altura total. La cubierta está pintada de blanco para minimizar los efectos de calentamiento por radiación. Se ha encontrado que la respuesta del piranómetro de estrella es muy estable, particularmente después de un período de seis

meses y por una calibración propia contra un instrumento normalizado, por lo que produce medidas de radiación consistentes. La simetría circular del disco receptor elimina cualquier dependencia de la sensibilidad con el azimuth y las medidas existentes indican una relativa reducción de la respuesta del coseno a un ángulo de incidencia de  $75^\circ$ . La respuesta del instrumento es proporcional a la intensidad de radiación. La compensación térmica no está incluida, pero el coeficiente de temperatura es suficientemente bajo como para hacer innecesaria la compensación para la mayoría de las condiciones observacionales. Por ejemplo, un modelo muestra sólo un 1.8% de cambio de sensibilidad sobre un intervalo mayor de  $60^\circ\text{C}$ . Este piranómetro es recomendado por la Organización Meteorológica Mundial para la medición de la radiación global [3] (Ver Fig. 14).

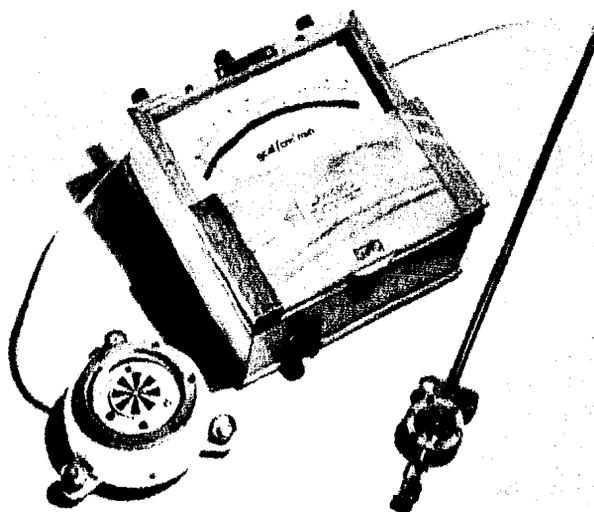


Fig. 14 Piranómetro de estrella con medidor y detector de balance radiativo.

Yanisehovsky: Es el principal instrumento utilizado en U.R.S.S. para medir la radiación solar difusa, global y superficie de albedo. El sensor está construido en un patrón de tablero alternativo blanco-negro o bien en un patrón radial, alternando segmentos blancos y negros (Ver Fig.15). Las juntas calientes son ennegrecidas con hollín y las frías con magnesio. El sensor ensamblado es cubierto por un sólo hemisferio de vidrio y se le provee de un hemisferio opaco auxiliar, para obtener el cero del instrumento. La condensación de la humedad en el lado interno del vidrio se evita utilizando un agente secante en una cavidad que se encuentra dentro de la base del instrumento.

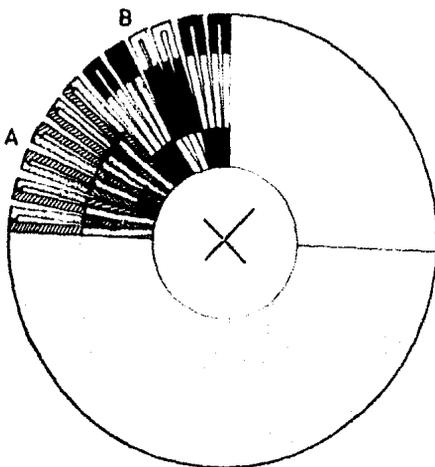


Fig. 15 Patrón esquemático de segmentos blancos y negros que constituyen las uniones del piranómetro Yanishevsky. A, secciones no pintadas; B, secciones pintadas.

Los modelos antiguos de este aparato presentaban una deficiencia debida al espesor de la pintura de los elementos sensibles.

Las tiras metaálicas eran muy delgadas, pero la capa de pintura era suficientemente gruesa para causar aspereza en la superficie; esta aspereza, en combinación con espacios entre los elementos, causaba la desviación de la ley de coseno antes mencionada. En los modelos más recientes no hay espacios significativos entre los elementos y la pintura, tiene un espesor más uniforme sobre la superficie sensora completa. La construcción es de tres anillos, dos de manganin y uno de constantán situados muy cerca uno de otro y que terminan en tiras delgadas radiales.

Las tiras radiales son pintadas de blanco y negro, como se muestra en la Fig. 15, de tal modo que se obtiene una superficie plana. El Yanishevski se utiliza como un instrumento relativo y por lo tanto requiere de calibración contra un patrón. El método operacional de calibración es el que se conoce como "Sun-Shadow" siendo el piranómetro Angstrom la norma primaria. Son considerables las desviaciones de la respuesta del aparato, con el ángulo solar de la ley ideal del coseno y se requiere de una corrección en las medidas. También es necesaria una corrección debido a la selectividad de la longitud de onda.

Piranómetro de Physics Metereological Observatory: Este observatorio se localiza en Davos, Suiza y actualmente ha suspendido la manufactura de piranómetros. El sensor básico de este instrumento es de 60 termopilas de cobre-constantán. La termopila

Moll de 60 elementos que usa forma un arreglo circular de 25 mm de diámetro. Las juntas calientes de la termopila hacen buen contacto térmico con el receptor ennegrecido y, las calientes, con el aluminio. Las termopilas pueden tener dos tipos de sensibilidad, cuyas especificaciones son:

Tipo de Termopila	TD-25-60 C	TD 25-60
Sensibilidad mV/cal $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$	7	22
Tiempo de Respuesta (1/e) segs.	2	4
Resistencia Interna ( $\Omega$ )	170	180
Coefficiente de Temperatura $\%$ $1^\circ\text{C}$	-0.1 (máx)	-0.15 (máx)
Error coseno con $80^\circ$ ang. incidente	-3.0 (máx)	-3.0 (máx)

Robitzsch Bimetálico: Es un instrumento muy usado a pesar de su baja precisión y desempeño limitado. Se utiliza regularmente para reportar radiación solar en estaciones remotas.; su popularidad se debe a su simplicidad y a que posee un captador de datos propio, muy deseable en operación remota.

El sensor principal es una tira bimetálica ennegrecida de 8.5 x 1.5 cms que actúa como un termómetro bimetálico; posee un extremo libre que se mueve a medida que los cambios de temperatura causan una distorsión en la tira. A través de un mecanismo el movimiento del extremo libre de la tira causa una deflexión de la pluma de registro y hace un trazo en el papel montado sobre un tambor de reloj. El mecanismo entero se encuentra encerrado en una cubierta metálica sellada y desecada; la parte principal del sensor se cubre con un domo hemisférico de vidrio;

además, la cubierta posee una ventana para observar el papel de registro.

Dado que el instrumento es sensible al medio ambiente, se han desarrollado gran número de dispositivos para compensar esta influencia, pero no se han logrado grandes resultados. También se han detectado grandes cambios en la constante de calibración para variaciones en el ángulo de incidencia, llegando a ser hasta de un 40%.

La gran capacidad calorífica del elemento bimetálico trae como consecuencia su baja respuesta a cambios del flujo de energía incidente; su tiempo normal de respuesta es de 10 a 15 minutos, por lo que es ineficiente para períodos de medición cortos.

El domo que cubre el sensor presenta una transmisión espectral no uniforme de acuerdo al modelo, pero es normalmente, mayor al 90% en el intervalo de 0.4 a 2.0 nm. Los esfuerzos realizados para mejorar su precisión conllevan a una modificación del diseño básico. (Fig. 16).

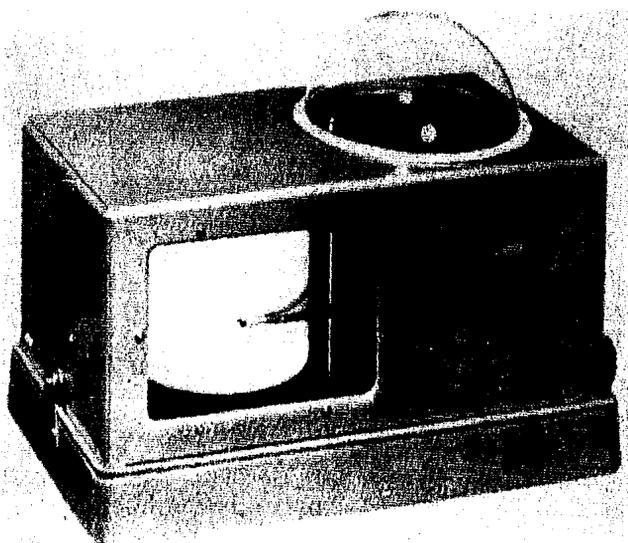


Fig. 16 Piranómetro Robitzsch Bimetálico

#### 2.4. Celdas Fotovoltaicas

La invención de las celdas solares fotovoltaicas de silicio abrió nuevas posibilidades para el desarrollo de aparatos de medición de radiación simples y baratos, pero la precisión obtenida con ellos no es alta y, probablemente, sólo sea adecuada para períodos de un día o mayores. Además de su simplicidad y bajo costo, los instrumentos basados en celdas solares poseen una respuesta casi instantánea (10 mseg.), alta corriente de salida directamente proporcional a la radiación incidente, y, sobre todo, estabilidad con el tiempo y clima. Las características de las celdas en sí mismas originan inexactitudes en las medidas: primero, las celdas responden selectivamente con la longitud de onda de la radiación incidente (Véase fig. 17). Obsérvese que la respuesta es despreciablemente pequeña a longitudes de onda menores a 0,4  $\mu\text{m}$  y mayores a 1.1  $\mu\text{m}$ , que presenta un máximo relativamente agudo a 0.85  $\mu\text{m}$ , lo que podría no tener mayor importancia si la distribución espectral de la radiación fuese constante, pues se tomaría en cuenta en la calibración del instrumento. Desgraciadamente el procedimiento no resulta satisfactorio pues la distribución espectral de la radiación solar que llega no es estrictamente constante, ya que varía con la elevación solar, nubosidad, turbidez, vapor de agua y características reflectoras de la superficie fundamental. Todo ello puede causar errores de un 5%.

Segundo, su coeficiente de temperatura es del orden de 0.0004 a 0.0001 por  $^{\circ}\text{C}$ , variando algo con la longitud de onda de la radiación, siendo positivo entre 0.85 y 1.1  $\mu\text{m}$ , pero cercano a cero o ligeramente negativo para valores menores a 0.85  $\mu\text{m}$ , lo

que se considera que introduce un error de un 5% para medidas entre 0 y 40°C.

Tercero: Su respuesta se desvía fuertemente de la ley ideal del coseno con el ángulo de incidencia, dada la naturaleza de las celdas de silicio, estas desviaciones se muestran en la Fig. 17. Se cree, que se debe a la reflexión de tipo especular de la superficie semipulida de las celdas [3]. Por otro lado, si la celda se monta bajo un plástico difusor, no se obtiene una respuesta cosenoidal (ver curva superior de la Fig. 18). Esta mejora baja considerablemente la sensibilidad, pero aumenta la validez de integración sobre períodos de días completos. El error introducido por tal efecto, es de un 10%. Todo ello hace que los piranómetros basados en celdas fotovoltaicas sean considerados de tercera clase.

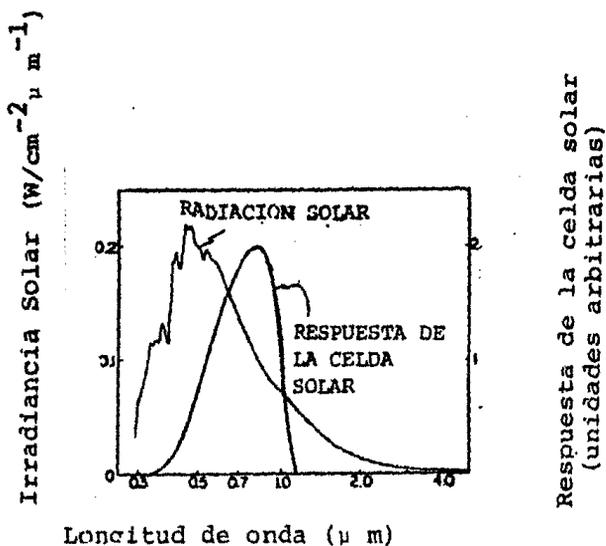


Fig. 17 Respuesta espectral de las celdas solares de silicio comparadas con la distribución espectral de la radiación solar.

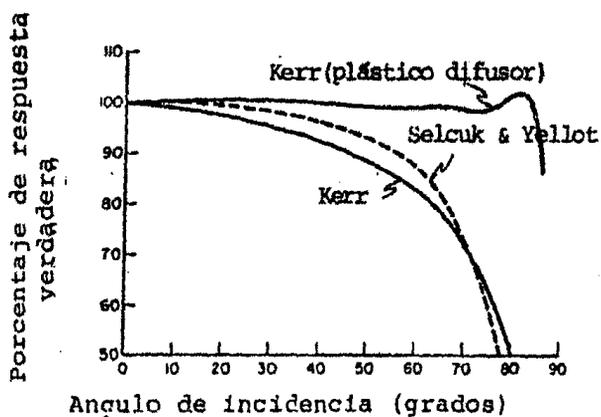


Fig. 18 Respuesta angular de las celdas solares de silicio con y sin la cubierta plástica difusora expresada en porcentaje de respuesta de acuerdo a una ley cosenoidal ideal.

## 2.5 Piranómetros Empleados

### Piranómetro Insolar.

El dispositivo sensor consta de una termopila sobre un disco de material altamente reflejante. Estos dos elementos tienen conectados un termopar, cuya "tierra térmica" es el plato que los rodea y del que deben ir perfectamente aislados, para obtener así la diferencia de potencial eléctrico, que es correspondiente a la medida de radiación solar mediante la calibración de cada aparato.

Las especificaciones del mismo se muestran en el Apéndice C y fueron anexadas al dispositivo en el momento de la compra. Como puede observarse no se explica el circuito termoeléctrico por lo que se consultó al fabricante cuando se presentó el problema del desplazamiento del pico de mayor radiación a la tarde. Su respuesta fue que el sensor era adecuado para promedios diarios y no para medidas instantáneas, ya que el plato tarda un determinado tiempo en calentarse de acuerdo a las variaciones de la temperatura ambiente. Esto puede comprobarse si se observan las figuras 2 y 29. La figura 29 es la aproximación de las variaciones de la temperatura ambiente mediante un modelo matemático (ver Apéndice A).

En ningún lugar de las especificaciones se menciona la magnitud del error introducido en la medición por variaciones en la temperatura ambiente o en el plato y del siguiente análisis se deduce que son considerables.

La ecuación de equilibrio térmico de un plato como el del sensor, que cuenta con una masa  $m$ , una capacidad calorífica  $C_p$  expuesto a una diferencia de temperatura ambiente de  $T_{\infty 1}$  a

$T_{\infty 2}$  es:

$$m C_p \frac{dT_p}{dt} = h A (T_p - T_{\infty 2})$$

ya que suponemos que inicialmente la temperatura del plato y del ambiente son iguales.

La solución de la misma es:

$$T_p = C e^{-\frac{h A}{m C_p} t} + T_{\infty 2}$$

Suponiendo  $h$  y  $C_p$  contantes, es claro que la temperatura del plato depende de la relación área - masa y de la temperatura final del ambiente. En la práctica,  $h$  es fuertemente dependiente de la velocidad del viento. Dado que tanto esta velocidad como  $T_{\infty}$  son variables a lo largo del día, puede concluirse que el diseño, basado en el plato como "tierra térmica", introduce por necesidad errores en la medición, considerables y difícilmente cuantificables.

### Piranómetro Eppley.

Anteriormente se describe el modelo Eppley blanco y negro, que generalmente corresponde al utilizado en los experimentos. Lo que aquí se mencionan son sus características particulares. El modelo del piranómetro es el 8-48, que cuenta con una termopila diferencial electroplateada (cobre-constantán) con juntas calientes cubiertas con negro 3M Belvet y frías con Sulfato de Bario. El vidrio protector es el Schott WG7, el cual es transparente para radiaciones entre 280 y 2800 nm; éste se sella para evitar contacto con el medio ambiente, pero es fácilmente removible para su mantenimiento. Posee un circuito compensador para evitar dependencia de la medida con la temperatura ambiente. (fig.8) [10].

Especificaciones más precisas del mismo se encuentran en el manual de usuario, que se encuentra en el Apéndice C.

### Fotocelda.

Es el modelo SS-100 de los Laboratorios Dodge de Houston, Texas.

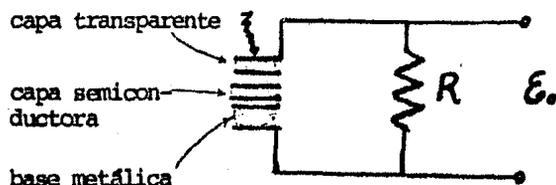
El sensor consta de tres capas:

- base metálica
- semiconductor
- metálica transparente delgada

El funcionamiento del dispositivo es el siguiente: la luz al incidir sobre la capa transparente y la semiconductor se genera una diferencia de voltaje como se muestra en la fig.18a! La señal de salida dependerá en gran parte de la resistencia de carga  $R$ . La variación del voltaje a circuito abierto respecto a la excitación se aproxima a una función logarítmica, lo que se puede linealizar si se disminuye la resistencia de carga. Dicho comportamiento es ventajoso debido a la sensibilidad que presenta en un gran rango de intensidades luminosas.

La mayor desventaja es la alta dependencia de la señal de salida respecto a la longitud de onda, ya que es más sensible al rojo e infrarojo en el espectro solar. También es susceptible a las variaciones del ángulo de incidencia.

Todo ello como ya también se mencionó hace que estos sensores pertenezcan a la tercera clase.



### 3: DESCRIPCION EXPERIMENTAL

#### 3.0 Antecedentes

La similitud en el desplazamiento del pico de mayor radiación hacia la tarde, y el pico de temperatura ambiente máxima. La considerable importancia de las variaciones de la temperatura ambiente sobre el plato o "tierra térmica" planteaba serias dudas con respecto a la efectividad de la misma como compensador térmico.

La explicación brindada por el fabricante era muy aceptable y cualitativamente resolvía el problema. Pero de hecho era necesario conocer más a fondo el comportamiento del plato y verificar cuantitativamente la magnitud de la compensación. Al exponerse el plato a la radiación, sufre un aumento de temperatura, que no es de la misma magnitud que las variaciones en la temperatura ambiente. Al llegar al mediodía solar, el

plato aún no ha alcanzado su temperatura máxima, lo que trae consigo una medida menor a la real, por la naturaleza del sensor. Al sobrepasar el mediodía, la radiación comienza a disminuir y como la temperatura del ambiente continúa creciendo, el plato no se enfriará, por lo que la señal también aumentará. Haciendo uso del mismo razonamiento, en ausencia de radiación, el detector dará una señal negativa, pues el plato no se habrá enfriado aún. La integración del área bajo estas curvas dará la radiación total a lo largo del día.

Con el fin de corroborar lo antes mencionado, era necesario delinear la influencia de cada una de las variables involucradas, para lo que se desarrollaron una serie de experimentos en un ambiente controlado.

El ambiente controlado fue provisto por el simulador solar con que cuenta el IdeI, fuente de radiación constante y sistema de circulación de aire que permite mantener la temperatura ambiental constante y velocidad del aire, lo que establecería con certeza la influencia de la temperatura del plato en la medición. Mayor información del simulador solar se muestra en el Apéndice B.

### 3.1 Pruebas

El método experimental constó de cuatro fases las que se describen a continuación.

Primera Prueba: Se observó el tiempo en el que respondía el sensor Insolar a una señal constante de radiación con el plato enfriado a 0°C. Se detectó una diferencia en la medida de un 20% en menos de una hora, lo que llevó a pensar que el cambio de condiciones había sido demasiado brusco. Este experimento llevó a un segundo, cuyas finalidades eran:

- a) Verificar que sin señal de radiación (luces apagadas) la señal detectada fuese nula (0 mv)
- b) Tomar el tiempo que tardan los sensores en dar una señal de salida constante a una señal de radiación constante (tiempo de respuesta)

El experimento mostró que no se llegaba a una medida estable, por lo que se pensó que los multímetros usados no eran confiables y que el voltaje de la luz eléctrica variaba considerablemente. (Al revisar la instalación eléctrica del edificio donde se encuentra el simulador se descubrió que a la misma se habían conectado motores demasiado potentes para el diseño de la línea.) El experimento, dados los problemas anteriores, se modificó; ahora se decidió no exponer los sensores a una fuente de radiación supuestamente constante. Como anteriormente se había verificado que en ausencia de radiación la medida en ambos era nula, se pensó en desarrollar la prueba al revés:

- a) Exponer los dos sensores a 10 min. de radiación
- b) Apagar las luces y tomar el tiempo que tardaban en dar una señal de salida nula.

Se observó que la fotocelda, dada su rapidez de respuesta, no era detectable el tiempo de respuesta; en cambio, el sensor Insolar nunca se estabilizó, además de que con la luz apa

gada daba una señal negativa. Aquí se estableció, para el sensor Insolar, la necesidad de conocer la temperatura del plato y definir algún tipo de relación entre esta última y la señal de salida del sensor.

El siguiente experimento se dividió en dos fases: Una primera para medir la linealidad respecto a la cantidad de radiación y la segunda para hallar la relación entre la temperatura ambiente y del plato con la radiación medida. En este experimento se incluyó un tercer sensor compensado térmicamente (Eppley).

El método desarrollado fue el siguiente:

- a) Se colocaron termopares de cobre-constantán de calibre 30 y punta fría en la parte superior de cada uno de los tres sensores usando resina epóxica (insolar, Eppley y Fococelda). Ver figuras 20, 21 y 22 respectivamente.
- b) Con el fin de evitar errores humanos en la medición las señales de salida tanto de los sensores como de los termopares se introdujeron a un graficador mecánico de 20 canales, que toma una medida cada 1.7 segundos y que posee una sensibilidad de 0.01 mv (Fig. 23). Dado que las señales de la fotocelda y del sensor Insolar eran muy grandes en comparación con las de los termopares y del sensor Eppley, fue necesario hacer uso de un atenuador de 4 canales con una sensibilidad de 0.01 mv, por lo que la respuesta debe ser multiplicada en el caso respectivo por los siguientes factores, para obtener los valores reales:

Fotocelda	10
Insolar	5

- c) Una vez hechas las conexiones, se colocaron los sensores debajo de la lámpara. El plano de la lámpara se ubicó paralelo al plano del suelo para evitar efectos angulares de los que ya se hablaron anteriormente. La lámpara se encontraba a una distancia del piso de 1 m y los sensores dentro de un círculo de aproximadamente 50 cm de radio cuyo centro coincidía con el de la lámpara.
- d) Se prendieron las luces en aproximadamente 8 minutos, ya que no se podían prender todas a un mismo tiempo y se dejaron prendidas durante tres horas y seis minutos (ver fig. 24).
- e) Transcurrido dicho tiempo, se fueron apagando en pares de focos (ya que cada interruptor controla dos focos simétricos) en intervalos de 100 segundos.
- f) Una vez apagados todos los focos, se continuó el registro durante dos horas y 15 minutos

Durante la realización de esta prueba se estableció necesario, dado que en todos los fenómenos térmicos la temperatura ambiente y los gradientes de temperatura son importantes, realizar otra prueba midiendo el gradiente de temperaturas entre la parte su

perior e inferior del plato y la temperatura ambiente.

Así se efectuó el mismo experimento, sólo que ahora los sensores poseían además un termopar en la parte inferior (excepto la fotocelda, ya que su forma no lo permitía) y para medir la temperatura ambiente se colgó un termopar de la parte central de la lámpara y muy cerca de los sensores. En esta fase se eliminó el paso anterior y en el paso ~~el~~ registro sólo duró 40 minutos después de apagarse las luces. (Figs. 25, 26 y 27)

En esta última parte, no se pudo hacer uso del atenuador por lo que las medidas de las temperaturas se efectuaron manualmente con un multímetro H.P. con una sensibilidad de 0.001 mv.

Los resultados mostraron que el comportamiento del sensor Insolar no es lineal, que esta no-linealidad se debe fundamentalmente al tipo de compensación térmica por medio de una gran masa térmica y que los resultados eran suficientes para explicar la no simetría en las curvas de insolación obtenidas en la red solarimétrica y que no era necesaria mayor experimentación. Sin embargo, para justificar de manera completa estas conclusiones, se realizó el análisis que se presenta en el siguiente capítulo.

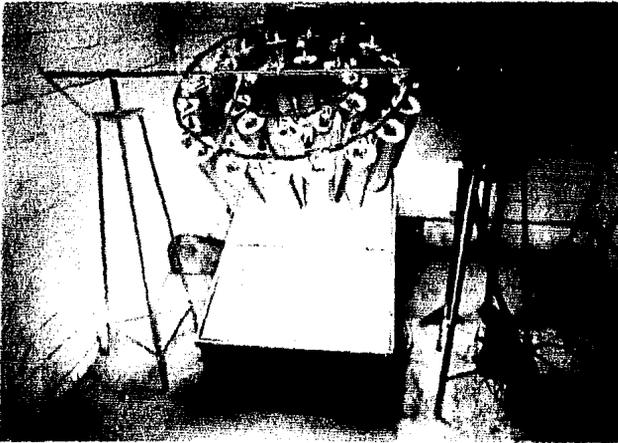


Fig. 19 Simulador solar del I. de I.

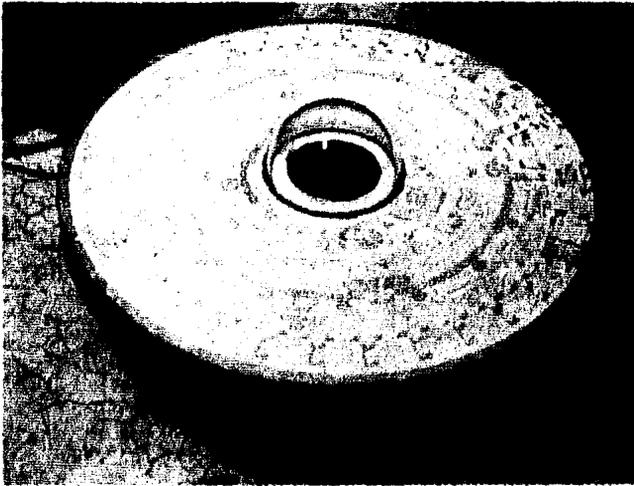


Fig. 20 Piranómetro Insolar

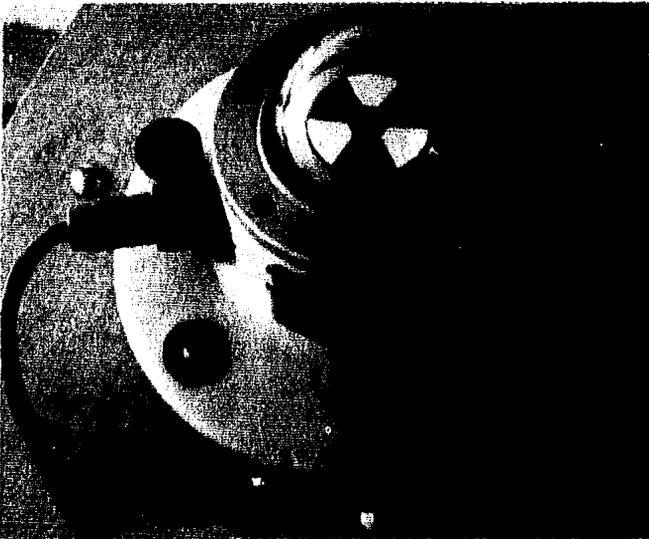


Fig. 21 Piranómetro Eppley Blanco y Negro

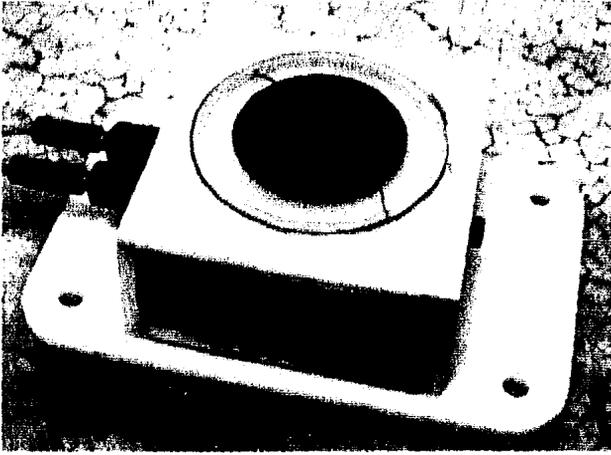


Fig. 22 Fotocelda

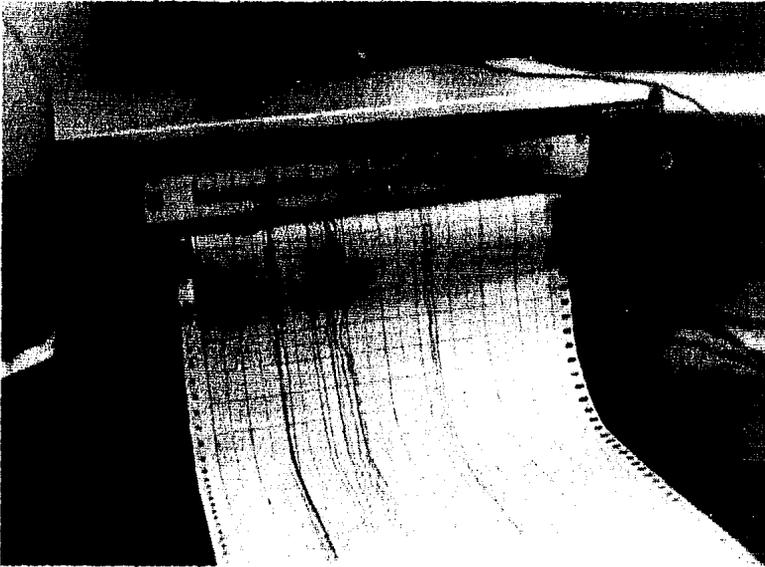


Fig. 23 Graficador Mecánico

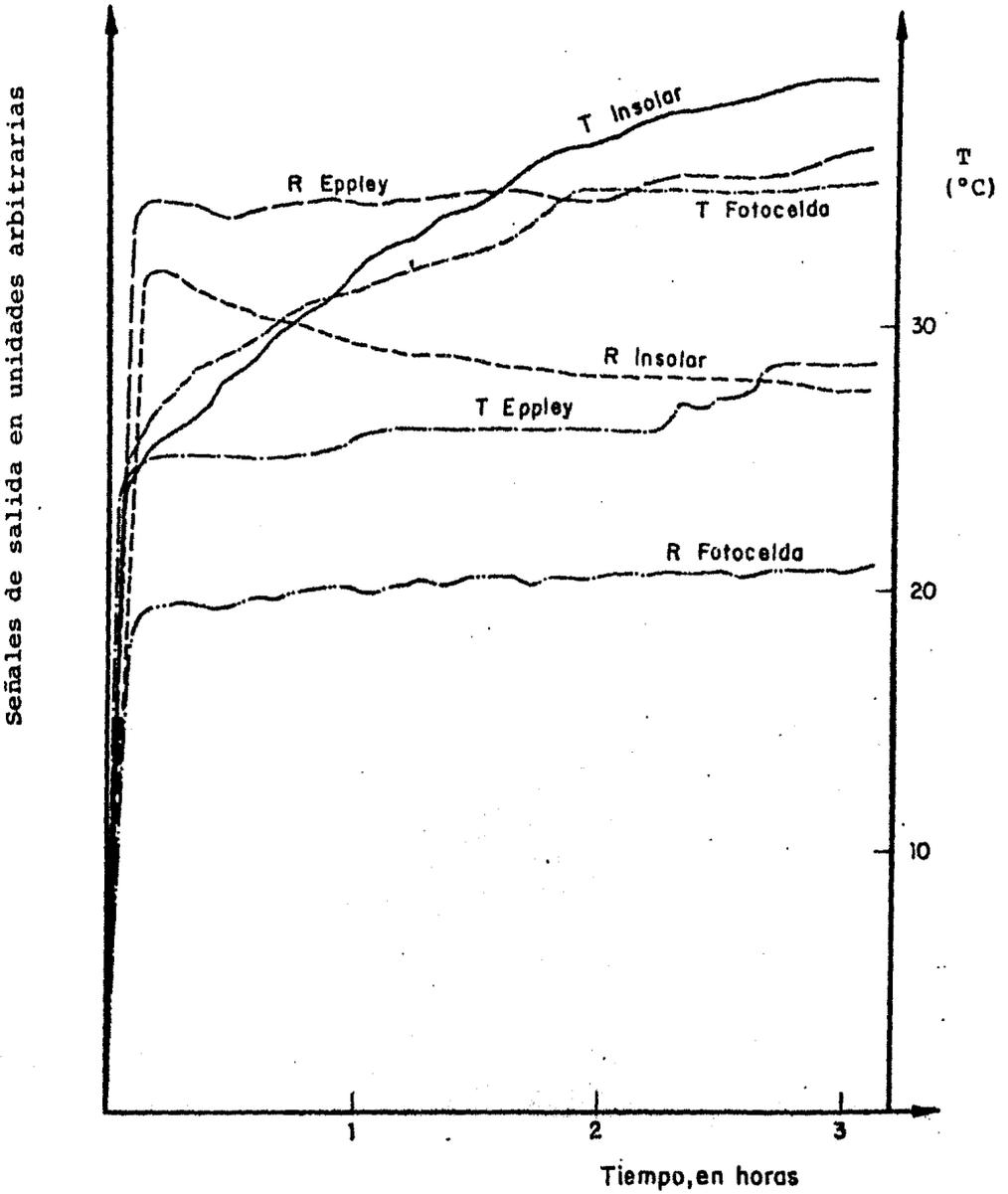


Fig 24 Evolución de las señales de salida de los sensores probados, así como de sus temperaturas superficiales

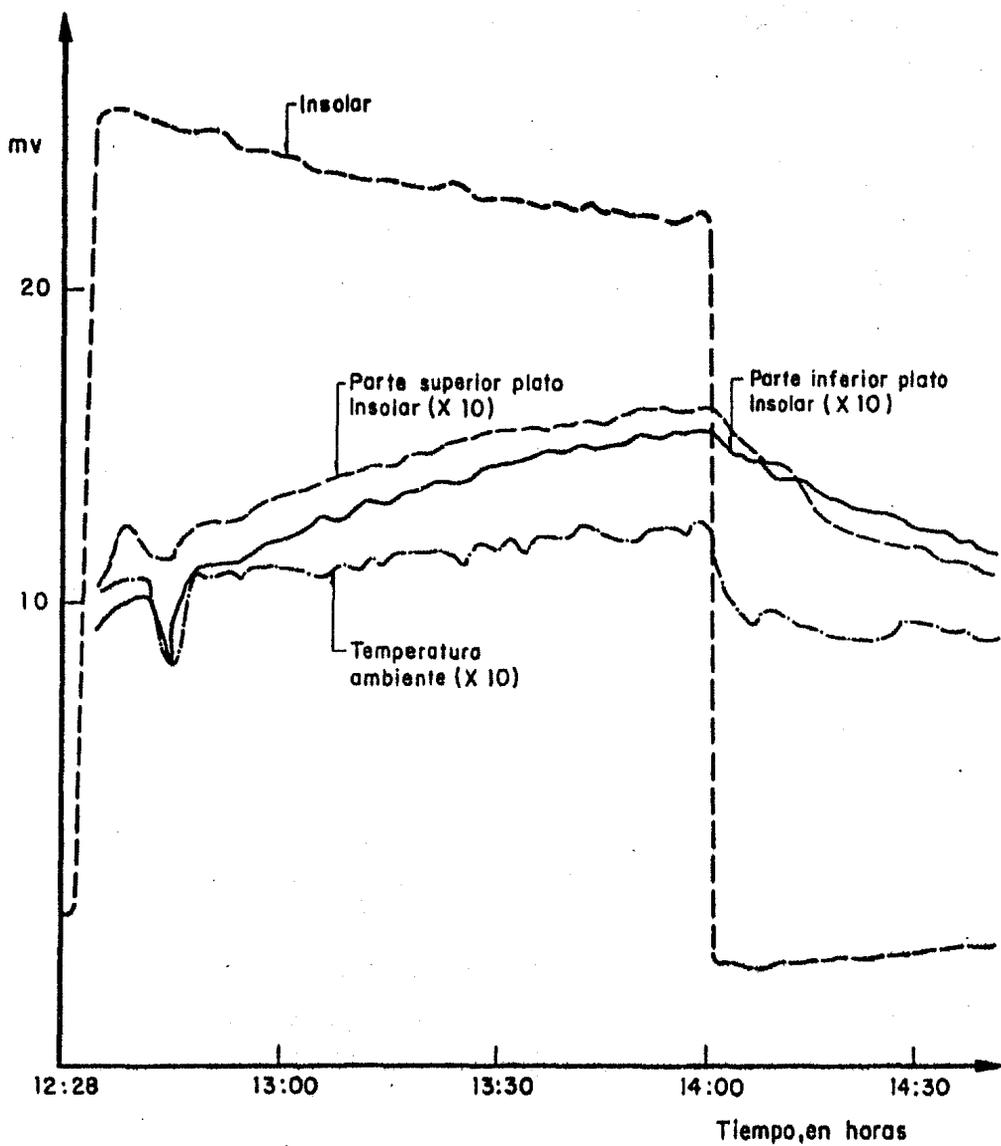
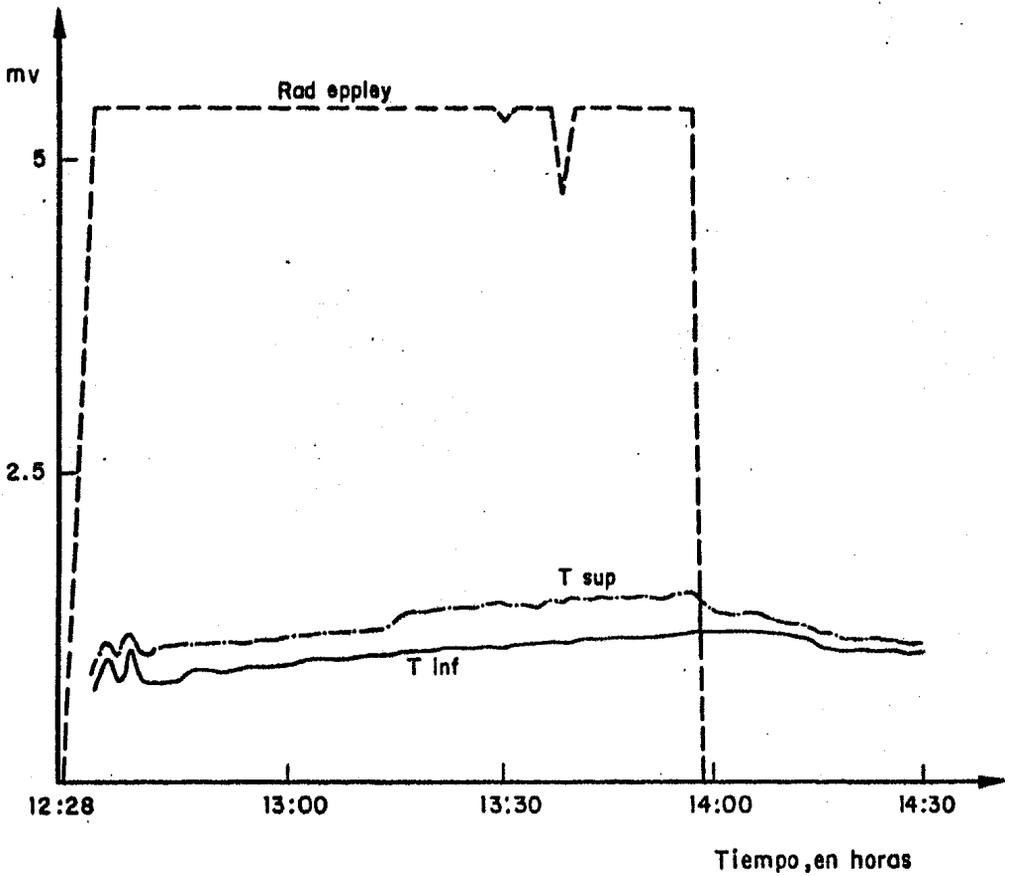


Fig 25 Gráfica del tercer experimento para el sensor Insolar



Nota: La irregularidad de la curva, pico muy pronunciado al rededor de las 12:50 no es explicable más que como un error en la medición

Fig 26 Gráfica del tercer experimento para el sensor Eppley

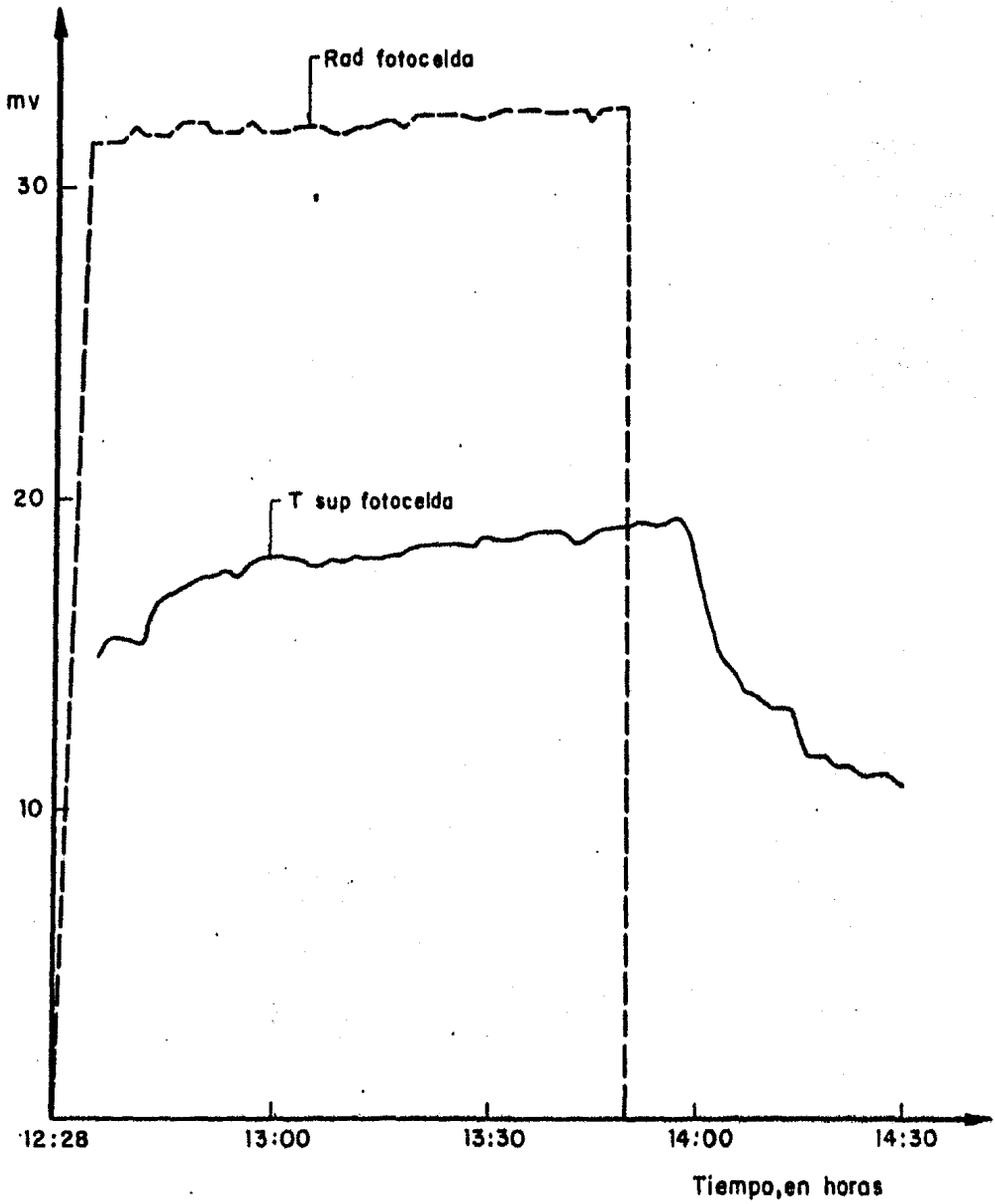


Fig 27 Gráfica del tercer experimento para la fotocelda

#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS

Los datos obtenidos fueron transformados a las mismas unidades de acuerdo a las constantes dadas por lo fabricantes (ver tabla 5) y se analizaron por medio de ajustes: lineal, exponencial, logarítmico y potencial. Los datos que se muestran en las figuras 24,25,26 y 27, se utilizaron para elaborar las tablas 6, 7, 8 y 9 respectivamente.

Tabla 5. Constantes de los Sensores

Insolar	46.11 mV	=	1000 W/m <sup>2</sup>
Eppley	9.47 mV	=	1000 W/m <sup>2</sup>
Fotocelda	10 mV	=	100 W/m <sup>2</sup>
Termopares	1 mV	=	25.5932 °C

Con los datos de la figura 24 se elaboró la tabla 6 en la que

se muestra el intervalo en horas considerado; el promedio de la señal de salida del sensor en  $W/m^2$  y por último la temperatura superior del sensor en grados centígrados, repitiéndose las dos últimas columnas para cada sensor.

Con los datos (0 hs → 3.65 hs) de esta tabla se analizó el comportamiento mediante ajuste de los siguientes tipos:

Ajuste:

Lineal	$Y=I$	$X=T$	$b=b$	$I= mT + b$
Exponencial	$Y=\ln(I)$	$X=T$	$b=\ln(a)$	$I=ae^{mT}$
Logarítmico	$Y=I$	$X=\ln(T)$	$b=b$	$I=m\ln(T) + b$
Potencial	$Y=\ln(I)$	$X=\ln(T)$	$b=\ln(a)$	$I=aT^m$

En la tabla 7 se indican los resultados de dichos ajustes y el factor de correlación correspondiente, encontrándose subrayados aquellos de mayor magnitud.

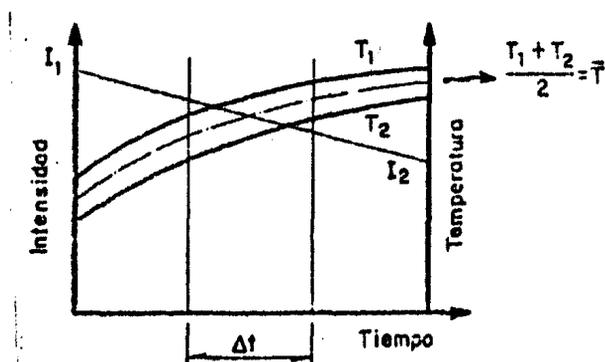
De los ajustes efectuados a los datos del sensor Eppley, se infiere que no existe ninguna relación entre la temperatura superior del sensor y la radiación, ya que  $r^2$  se encuentra entre 0.3005 y 0.3473 en todos los ajustes.

En el caso del sensor Insolar se observa que no existe ajuste alguno de donde nació la necesidad de realizar el tercer experimento que es en el que se toma además la temperatura inferior. Los ajustes realizados a la fotocelda, a pesar de ser de orden mayor, no expresan con certeza el tipo de relación. Se observa que existe inmediatamente después un párrafo FotoceldaII, que se compone de los mismos ajustes pero con los datos del tercer

experimento, de donde se puede asegurar que no existe relación alguna entre la temperatura y la medición obtenida,

El tercer experimento es prácticamente un análisis concreto del sensor Insolar ya que, como puede observarse, el sensor Eppley permaneció constante a pesar de las variaciones en las temperaturas ambiente, superior e inferior del mismo (fig.24). Las figuras 25,26 y 27, realizadas con los datos obtenidos en este tercer experimento, muestran a la radiación y a las temperaturas inferior y ambiente en mV en un mismo eje temporal, de los tres sensores utilizados.

Realizando los mismos ajustes que para el experimento anterior, sólo que con la temperatura media y únicamente con el sensor Insolar, se tuvieron los resultados que se muestran en la tabla 10 y que se elaboraron con los datos de la tabla 9 en dos intervalos: Calentamiento (12:33.1 → 12:59.8) (tabla 9) y enfriamiento (14:01.5 → 14:38.9) (tabla 9). Como de dichos resultados no se infiere un comportamiento definido, se pensó en el siguiente modelo:



Para cada  $\Delta t$  se tiene un valor de  $\Delta I / \Delta \bar{T}$ , por lo que debe existir una relación:

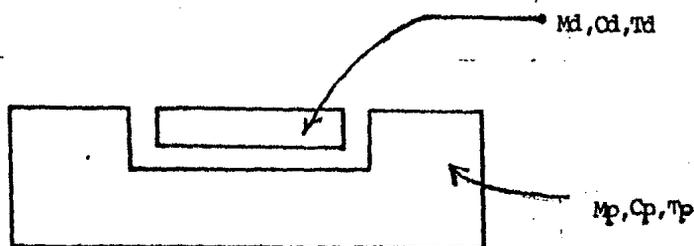
$$\frac{\Delta I}{\Delta \bar{T}} = E (t)^j$$

con E y j constantes.

Así se realizó la tabla 11 donde se muestra el tiempo, la radiación,  $\Delta I$ ,  $\bar{T}$ ,  $\Delta \bar{T}$  y finalmente  $\Delta I / \Delta \bar{T}$ .

Del análisis de datos es claro que no existe relación alguna, lo que llevó a un análisis de los flujos de calor presentes y del tipo de curva obtenida en la respuesta del aparato, de forma plankiana.

El análisis a los flujos fue el siguiente:



$$\text{Ec. disco} \quad Q_{\text{gana(sol)}} - Q_{\text{pierde(ambiente+plato)}} = M_d C_d \frac{dT_d}{dt}$$

$$\text{Ec. plato} \quad Q_{\text{gana(ambiente+disco)}} - Q_{\text{pierde(ambiente)}} = M_p C_p \frac{dT_p}{dt}$$

Desgraciadamente este sistema de ecuaciones no puede resolverse en ausencia de datos (experimentales o teóricos) de los flujos de calor y de la temperatura del disco sensor. Este procedimiento se abandonó ya que, dada su complejidad, no era esperable de él un resultado de calidad aceptable.

Sin embargo se realizó un segundo análisis sobre los datos, tomando únicamente los comprendidos en el intervalo (12:48.5 a 13:59.8). El análisis fue I contra  $\bar{T}$ , obteniéndose una recta con

factor de correlación  $r^2 = 0.9004$  con valores de:

$$m = -4.5864 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$b = 666.48 \text{ W/m}^2$$

o sea que  $I - I_0 = -(4.5864) (\bar{T} - T_0)$

y por lo tanto

$$\frac{dI}{d\bar{T}} = -4.5864$$

Lo que demuestra que la temperatura del plato es un factor predominante en la medición, por lo que para poder corregir las mediciones obtenidas es necesario registrar la temperatura del plato.

TABLA 6

Hora	S. Eppley		S. Insolar		Fotocelda		T.suelo
	T.plato		Radiación	T.plato	Radiación	T.plato	
	Radiación						
	w/m <sup>2</sup>	°C	w/m <sup>2</sup>	°C	w/m <sup>2</sup>	°C	°C
0	221.50	21.75	277.96	21.75	150.41	21.75	25.39
0.05	443.57	24.31	459.74	24.31	279.98	24.31	28.15
.1	581.02	25.59	534.53	23.63	239.96	25.59	33.27
.15	601.93	25.59	555.86	25.59	334.98	26.87	38.39
.20	596.70	25.59	550.63	25.59	334.98	27.38	40.95
.25	596.70	25.59	550.53	26.87	340.00	27.38	42.23
.30	596.70	25.59	545.19	26.87	340.00	27.38	43.51
.35	596.70	25.59	545.19	26.87	340.00	29.43	44.79
.4	591.40	25.59	534.53	27.38	334.98	"	46.07
.45	591.40	25.59	529.16	29.43	334.98	"	47.35
.5	591.40	25.59	529.16	29.43	340.00	"	48.63
.55	591.40	25.59	523.80	29.43	340.00	"	48.63
.6	596.70	25.59	523.80	30.71	345.02	30.71	49.91
.65	596.70	25.59	523.80	30.71	340.00	"	50.93
.7	596.70	25.59	518.50	30.71	345.02	"	50.93
.75	601.93	25.59	518.50	31.99	345.02	31.99	51.19
.8	601.93	25.59	518.50	31.99	350.03	"	51.44
.85	601.93	25.59	513.13	31.99	350.03	"	51.44
.9	601.93	25.59	513.13	31.99	350.03	"	51.44
.95	601.93	25.59	507.76	33.02	350.03	"	52.47
1.00	596.70	26.87	502.40	33.02	345.02	"	53.49
1.05	596.70	26.87	502.40	33.57	345.02	"	53.74
1.10	601.93	"	502.40	33.57	350.03	"	53.74
1.15	601.93	"	502.40	33.57	350.03	"	54.00
1.2	601.93	"	502.40	33.57	350.03	33.02	54.00
1.25	601.93	"	502.40	33.57	354.98	"	54.51
1.3	601.93	"	497.10	35.83	350.03	"	55.02
1.35	601.93	"	497.10	35.83	350.03	"	55.02
1.4	612.52	"	502.40	35.83	354.98	"	55.02
1.45	607.23	"	497.10	35.83	354.98	"	56.04
1.5	607.23	"	497.10	35.83	354.98	"	55.02
1.55	607.23	"	497.10	37.11	354.98	33.57	56.04
1.6	607.23	"	491.73	37.11	354.98	"	56.04
1.65	607.23	"	491.73	37.11	354.98	"	56.04
1.7	601.93	"	486.37	37.11	350.03	"	56.04
1.74	607.23	"	491.73	38.39	354.98	35.83	55.02
1.8	601.93	"	486.37	38.39	354.98	"	55.02
1.85	607.23	"	486.37	38.39	354.98	"	55.02
1.9	607.23	"	486.37	"	354.98	"	55.02
1.95	607.23	"	486.37	"	354.98	"	56.04
2.0	607.23	"	481.07	"	354.98	"	55.02
2.05	607.23	"	481.07	"	360.00	"	55.02
2.1	607.23	"	481.07	39.67	360.00	37.11	56.04
2.15	607.23	"	481.07	"	354.98	"	56.04
2.2	601.93	"	481.07	"	360.00	"	56.04
2.25	607.23	26.87	481.07	"	360.00	"	56.04
2.3	607.23	27.38	481.07	"	360.00	"	57.58
2.35	607.23	26.87	481.07	"	360.00	"	56.82
2.4	607.23	27.38	481.07	"	360.00	"	56.82
2.45	607.23	27.38	481.07	"	360.00	"	57.58

Hora	S. Eppley		S. Insolar		Fotocelda		T.Suelo °C
	Radiación w/m <sup>2</sup>	T.plato °C	Radiación w/m <sup>2</sup>	T.plato °C	Radiación w/m <sup>2</sup>	T. plato °C	
2.50	601.93	27.38	475.70	39.67	354.98	37.11	58.61
2.55	607.23	27.38	475.70	"	354.98	"	58.61
2.6	607.23	29.43	481.07	"	360.00	"	59.38
2.65	607.23	"	481.07	"	360.00	"	59.38
2.7	607.23	"	481.07	40.95	360.00	"	59.38
2.75	613.40	"	481.07	"	360.00	"	59.38
2.8	607.23	"	475.70	"	360.00	38.39	59.38
2.85	613.40	"	475.70	"	360.00	"	60.14
2.9	613.40	"	475.70	"	360.00	"	60.14
2.95	613.40	"	475.70	"	360.00	"	60.14
3.00	613.40	"	475.70	"	365.00	"	60.14
3.05	613.82	29.43	481.07	"	365.00	"	60.14
3.10	601.90	29.43	465.02	"	350.00	"	58.86
3.15	580.78	28.66	448.99	"	335.00	"	58.10
3.20	514.25	28.66	400.88	40.95	300.00	38.13	57.58
3.25	475.18	28.15	365.60	40.69	265.00	37.62	56.30
3.30	421.33	28.15	319.64	40.44	230.00	37.11	55.02
3.35	363.78	28.15	280.08	40.44	199.00	35.83	53.74
3.40	300.95	28.15	250.68	39.67	175.00	35.83	51.19
3.45	242.87	27.90	187.08	38.90	147.00	35.06	48.63
3.50	192.71	27.90	144.32	38.39	95.00	34.55	47.35
3.55	79.72	26.87	-42.76	37.62	45.00	33.27	44.79
3.60	26.40	26.10	32.07	37.11	5.00	31.99	42.23
3.65	0.00	26.10	-41.69	35.83	0.00	31.22	39.67
3.7	"	26.10	-41.69	35.06	"	30.71	38.39
3.75	"	26.10	-41.69	34.55	"	30.71	37.11
3.8	"	26.10	-37.41	33.78	"	30.46	35.83
3.85	"	26.10	-34.21	33.27	"	30.46	35.06
3.9	"	26.10	-32.07	33.01	"	29.94	34.55
3.95	"	26.10	-32.07	32.50	"	29.94	33.78
4.00	"	26.10	-31.00	32.50	"	29.43	33.27
4.05	"	25.59	-31.00	31.99	"	29.43	32.50
4.10	"	25.59	-31.00	31.22	"	29.43	31.99
4.15	"	25.59	-26.72	30.71	"	28.66	31.99
4.20	"	25.59	-23.52	30.20	"	28.66	31.22
4.25	"	25.59	-24.58	29.94	"	28.66	30.71
4.30	"	25.59	-22.45	29.43	"	28.66	30.71
4.35	"	25.59	-21.38	28.66	"	28.15	30.45
4.40	"	25.34	-20.31	28.15	"	28.15	30.20
4.45	"	25.34	-19.24	28.15	"	28.15	29.43
4.50	"	25.34	-19.24	28.15	"	28.15	29.43
4.55	"	25.35	-18.17	28.15	"	28.15	28.66
4.60	"	25.34	-16.04	27.38	"	27.90	28.66
4.65	"	25.08	-13.90	27.13	"	27.90	28.41
4.70	"	25.08	-13.90	26.87	"	27.90	28.15
4.75	"	25.08	-12.83	26.87	"	27.90	27.38
4.80	"	25.08	-12.83	26.10	"	27.90	27.38
4.85	"	24.82	-11.76	26.10	"	27.90	27.38
4.90	"	24.82	-11.76	25.59	"	26.87	26.87
4.95	"	24.31	-10.69	25.59	"	26.87	26.87

Hora	S.Eppler		S. Insolar		Fotocelda		T.Suelo °C
	Radiación w/m <sup>2</sup>	T.plato °C	Radiación w/m <sup>2</sup>	T.plato °C	Radiación w/m <sup>2</sup>	T.plato °C	
5.00	0.00	24.31	- 10.69	25.34	0.00	26.87	26.87
5.05	"	24.31	- 10.69	25.08	"	26.87	26.87
5.10	"	23.54	- 10.69	25.08	"	26.87	26.87
5.15	"	23.54	- 9.62	25.08	"	26.87	26.87
5.20	"	23.29	- 9.62	25.08	"	26.87	26.87
5.25	"	23.29	- 9.62	25.08	"	25.59	26.87
5.30	"	23.29	- 8.55	24.31	"	25.59	26.10
5.35	"	23.29	- 8.55	24.31	"	25.59	26.10
5.40	"	23.03	- 8.55	24.31	"	25.59	26.10
5.45	"	23.03	- 8.55	24.31	"	"	25.85
5.50	"	23.03	- 9.62	23.54	"	"	25.59
5.55	"	23.03	- 8.55	23.54	"	"	25.85
5.60	"	22.27	- 8.55	23.54	"	"	25.85
5.65	"	22.27	- 5.34	23.54	"	"	25.85
5.70	"	22.27	- 2.14	23.54	"	"	25.85

TABLA 7

Ajustes de Radiación en  $w/m^2 = I$  con Temperatura superior en  $^{\circ}C = T$ 

Sensor	Lineal $I=mT+b$	Exponencial $I=ae^{bT}$	Logarítmico $I=b+m\ln T$	Potencial $I=aT^m$
Eppley	b=32.1974	a=153.9712	b=-1368.2191	a=5.2591
	m=20.9672	b=.05012	m=596.9984	m=1.4360
	$r^2=0.3350$	$r^2=0.3005$	$r^2=.3824$	$r^2=.3473$
Inaolar	b=557.0535	a=534.7787	b=658.3249	a=582.6317
	m= -1.7542	b= -0.0023	m= -45.9159	m= -0.0465
	$r^2= 0.0654$	$r^2= 0.0190$	$r^2= 0.0427$	$r^2= .0076$
Fotocelda	b= 180.6898	a= 189.8159	b= -238.1514	a= 3.7140
	m= 4.9837	m= 0.01791	m= 167.1530	m= 0.6084
	$r^2= 0.4754$	$r^2= 0.3793$	$r^2= 0.5412$	$r^2= 0.4429$
Fotocelda II	b= 306.4960	a= 306.7801	b= 295.6392	a= 296.5350
	m= 0.3401	m= .0011	m= 6.9534	m= 0.0217
	$r^2= 0.3096$	$r^2= 0.3119$	$r^2= 0.2010$	$r^2= .2030$

Tabla 8

HORA	Sensor		Eppley		Fotocelda		Temperatura Ambiente					
	Radiación		Temperatura Superior		Temperatura Inferior		Temperatura Superior					
	mV	W/m <sup>2</sup>	mV	°C	mV	°C	mV	°C				
12:28.0	0.0	000.00	---	---	---	---	0.0	000.0	---	---		
:29.7	0.0	000.00	---	---	---	---	0.0	000.0	---	---		
:31.4	5.4	570.22	---	---	---	---	0.0	000.0	---	---		
:33.1	5.4	570.22	0.96	24.57	0.74	18.94	31.5	315.0	0.4	10.24	1.03	26.36
:34.8	5.4	570.22	---	---	---	---	31.5	315.0	---	---	---	---
:36.5	5.4	570.22	1.04	26.62	0.80	20.47	31.5	315.0	1.5639.92	---	1.08	27.64
:38.2	5.4	570.22	---	---	---	---	31.5	315.0	---	---	---	---
:39.9	5.4	570.22	1.06	27.13	0.82	20.99	32.0	320.0	1.5439.41	---	1.06	27.13
:41.6	5.4	570.22	---	---	---	---	31.7	317.0	---	---	---	---
:43.3	5.4	570.22	1.10	28.15	0.82	20.99	31.7	317.0	1.6843.00	---	1.10	28.15
:45.0	5.4	570.22	---	---	---	---	31.7	317.0	---	---	---	---
:46.7	5.4	570.22	1.12	28.66	0.87	22.27	32.1	321.0	1.7143.76	---	1.11	28.41
:48.4	5.4	570.22	1.12	28.66	0.87	22.27	32.1	321.0	1.7444.53	---	1.11	28.41
:50.1	5.4	"	---	---	---	---	32.1	321.0	---	---	---	---
:51.8	5.4	"	1.14	29.18	0.89	22.78	31.8	318.0	1.7544.79	---	1.11	28.41
:53.5	5.4	"	1.14	29.18	0.90	23.03	31.8	318.0	1.7845.56	---	1.09	27.90
:55.2	5.4	"	1.11	28.41	0.92	23.54	31.8	318.0	1.7544.79	---	1.09	27.90
:56.9	5.4	"	1.16	29.69	0.92	23.54	32.1	321.0	1.8046.07	---	1.08	27.64
:58.6	5.4	"	1.15	29.43	0.94	24.06	31.8	318.0	1.8146.32	---	1.11	28.41
13:00.3	5.4	"	1.16	29.69	0.95	24.31	31.8	318.0	1.8146.32	---	1.12	28.66
:02.0	5.4	"	1.18	30.20	0.95	24.31	31.8	318.0	1.8146.32	---	1.10	28.15
:03.7	5.4	"	1.19	30.46	0.97	24.82	32.0	320.0	1.8146.32	---	1.11	28.41
:05.4	5.4	"	1.20	30.72	0.98	25.08	32.0	320.0	1.7945.81	---	1.14	29.18
:07.1	5.4	"	1.21	30.98	0.99	25.34	32.0	320.0	1.7945.81	---	1.12	28.66
:08.8	5.4	"	1.21	30.98	0.99	25.34	31.8	318.0	1.8146.32	---	1.15	29.43
:10.5	5.4	"	1.22	31.22	1.00	25.59	31.8	318.0	1.8046.07	---	1.15	29.43
:12.2	5.4	"	1.24	31.74	1.02	26.10	32.0	320.0	1.8246.58	---	1.13	28.92
:13.9	5.4	"	1.24	31.74	1.02	26.10	32.0	320.0	1.8146.32	---	1.15	29.43
:15.6	5.4	"	1.26	32.25	1.02	26.10	32.2	322.0	1.8146.32	---	1.15	29.43
:17.3	5.4	"	1.35	34.55	1.05	26.87	32.2	322.0	1.8246.58	---	1.15	29.43
:19.0	5.4	"	1.36	34.81	1.05	26.87	32.0	320.0	1.8246.58	---	1.15	29.43
:20.7	5.4	"	1.36	34.81	1.06	27.13	32.4	324.0	1.8247.09	---	1.12	28.66
:22.4	5.4	"	1.39	35.57	1.06	27.13	32.4	324.0	1.8547.35	---	1.18	38.20
:24.1	5.4	"	1.40	35.83	1.08	27.64	32.4	324.0	1.8547.35	---	1.18	30.20
:25.8	5.4	"	1.40	35.83	1.08	27.64	32.4	324.0	1.8647.60	---	1.16	29.69
:27.5	5.4	"	1.41	36.09	1.08	27.64	32.4	324.0	1.8647.60	---	1.20	30.72
:29.2	5.4	"	1.41	36.09	1.09	27.90	32.3	323.0	1.8547.35	---	1.15	29.43
:30.9	5.4	"	1.45	37.11	1.09	27.90	32.3	323.0	1.8948.37	---	1.17	29.94
:32.6	5.3	559.66	1.44	36.85	1.10	28.15	32.5	325.0	1.8747.86	---	1.20	30.72
:34.3	5.4	570.22	1.42	36.34	1.11	28.41	32.6	326.0	1.8747.86	---	1.21	30.97
:36.0	5.4	"	1.44	36.85	1.12	28.66	32.5	325.0	1.8848.12	---	1.21	30.97
:37.7	5.4	"	1.43	36.60	1.13	28.92	32.6	326.0	1.9048.63	---	1.21	30.97
:39.4	5.4	"	1.46	37.37	1.13	28.92	32.5	325.0	1.9048.63	---	1.20	30.72
:41.1	5.4	"	1.45	37.11	1.13	28.92	32.5	325.0	1.9048.63	---	1.24	31.74
:42.8	5.4	"	1.48	37.88	1.14	29.18	32.5	325.0	1.9048.63	---	1.24	31.74
:44.5	5.4	"	1.46	47.47	1.15	29.43	32.6	326.0	1.8647.60	---	1.22	31.22
:46.2	5.4	"	1.48	37.88	1.15	29.43	32.2	322.0	1.8747.86	---	1.21	30.97
:47.9	5.4	"	1.48	37.88	1.16	29.69	32.6	326.0	1.9148.88	---	1.20	30.72
:49.6	4.7	"	1.47	37.62	1.16	29.69	32.6	326.0	1.9148.88	---	1.19	30.46
:51.3	5.4	"	1.49	38.13	1.17	29.94	32.7	327.0	1.9249.14	---	1.19	30.46

Tabla 8

Hora	Sensor		Eppley				Fotocelda				Temperatura Ambiente	
	Radiación		Temperatura Superior		Temperatura Inferior		Radiación		Temperatura Superior			
	mV	W/m <sup>2</sup>	mV	°C	mV	°C	mV	W/m <sup>2</sup>	mV	°C	mV	°C
13:53.0	5.4	570.22	1.49	38.13	1.17	29.94	32.6	326.0	1.92	49.14	1.21	30.97
:54.7	5.4	570.22	1.46	37.37	1.17	29.94	32.5	325.0	1.92	49.14	1.19	30.46
:56.4	5.4	570.22	1.49	38.13	1.18	30.20	32.9	329.0	1.91	48.88	1.23	31.48
:58.1	5.3	559.66	1.51	38.64	1.19	30.46	32.6	326.0	1.92	49.14	1.22	31.22
:59.8	5.4	570.22	1.53	39.16	1.20	30.72	32.7	327.0	1.94	49.65	1.26	32.25
14:01.5	0.0	000.00	----	----	----	----	0.0	000.0	----	----	----	----
:03.2	0.0	000.00	1.40	35.83	1.20	30.72			1.73	44.28	1.01	25.85
:04.9	0.0	000.00	1.37	35.06	1.21	30.97			1.61	41.20	0.98	25.08
:06.6	0.0	000.00	1.36	34.81	1.22	31.22			1.48	37.88	0.93	23.80
:08.3	0.0	000.00	1.37	35.06	1.24	31.74			1.44	36.85	0.97	24.82
:10.0	0.0	000.00	1.36	34.81	1.23	31.48			1.38	35.32	0.95	24.31
:11.7	0.0	000.00	1.33	34.08	1.20	30.72			1.37	35.06	0.92	23.54
:13.4	0.0	000.00	1.30	33.27	1.21	30.97			1.34	34.29	0.94	24.06
:15.1	0.0	000.00	1.29	33.02	1.2	30.72			1.30	33.27	0.92	23.54
:16.8	0.0	000.00	1.27	32.50	1.19	30.46			1.30	33.27	0.91	23.29
:18.5	0.0	000.00	----	----	----	----			----	----	----	----
:20.2	0.0	000.00	----	----	----	----			----	----	----	----
:21.9	0.0	000.00	----	----	----	----			----	----	----	----
:23.6	0.0	000.00	----	----	----	----			----	----	----	----
:25.3	0.0	000.00	----	----	----	----			----	----	----	----
:27.0	0.0	000.00	1.23	31.48	1.13	28.92			1.22	31.22	0.89	22.78
:28.7	0.0	000.00	1.22	31.22	1.11	28.41			1.17	29.94	0.93	23.80
:30.4	0.0	000.00	1.18	30.20	1.09	27.90			1.18	30.20	0.92	23.54
:32.1	0.0	000.00	1.17	29.94	1.07	27.38			1.15	29.43	0.92	23.54
:33.8	0.0	000.00	1.16	29.69	1.09	27.90			1.15	29.43	0.90	23.03
:35.5	0.0	000.00	1.17	29.94	1.07	27.38			1.13	28.92	0.90	23.03
:37.2	0.0	000.00	1.14	29.18	1.08	27.64			1.11	28.41	0.87	22.27
:38.9	0.0	000.00	1.15	29.43	1.05	26.87			1.12	28.66	0.89	22.78
:40.6	0.0	000.00	1.12	28.66	1.05	26.87			1.11	28.41	0.87	22.27
:42.3	0.0	000.00	1.14	29.18	1.06	27.13			1.08	27.64	0.88	22.52

TABLA 9

Sensor Insolar						
hora	Radiación <sub>2</sub>		T superior		T inferior	
	mV	W/m <sup>2</sup>	mV	C	mV	C
12:28.0	0.0	0.0	----	----	----	----
:29.7	.1	2.14	----	----	----	----
:31.4	16.5	352.77	----	----	----	----
:33.1	25.5	545.19	1.03	26.36	.92	23.54
:34.8	25.7	549.47	----	----	----	----
:36.5	25.8	551.60	1.25	31.99	1.00	25.59
:38.2	25.7	549.47	----	----	----	----
:39.9	25.5	545.19	1.16	29.69	1.04	26.62
:41.6	25.4	543.05	----	----	----	----
:43.3	25.3	540.91	1.14	29.18	.80	20.47
:45.0	25.	534.5	----	----	----	----
:46.7	25	534.5	1.23	31.48	1.07	27.38
:48.4	25	534.5	1.25	31.99	1.13	28.92
:50.1	25	534.5	----	----	----	----
:51.8	25	534.5	1.26	32.25	1.14	29.18
:53.5	24.5	523.81	1.26	32.25	1.14	29.18
:55.2	24.4	521.67	1.29	33.02	1.17	29.94
:56.9	24.4	521.67	1.31	33.53	1.19	30.45
:58.6	24.4	521.67	1.33	34.04	1.20	30.71
13:00.3	24.2	517.40	1.34	34.29	1.21	30.97
:02	24.2	517.40	1.35	34.55	1.23	31.48
:03.7	24	513.12	1.36	34.81	1.25	31.99
:05.4	23.7	506.71	1.38	35.32	1.28	32.76
:07.1	23.7	506.71	1.40	35.83	1.27	32.50
:08.8	23.7	506.71	1.40	35.83	1.28	32.76
:10.5	23.5	502.43	1.42	36.34	1.3	33.27
:12.2	23.5	502.43	1.43	36.60	1.33	34.04
:13.9	23.5	502.43	1.44	36.85	1.32	33.78
:15.6	23.5	502.43	1.43	36.60	1.34	34.29
:17.3	23.3	498.15	1.46	37.37	1.35	34.55
:19	23.3	498.15	1.48	37.88	1.36	34.81
:20.7	23.3	498.15	1.47	37.62	1.38	35.32
:22.4	23.2	496.02	1.49	38.14	1.39	35.57
:24.1	23.2	496.02	1.51	38.64	1.38	35.52
:25.8	23.4	500.29	1.52	38.90	1.39	35.57
:27.5	22.9	489.60	1.53	39.16	1.43	36.60
:29.2	22.9	489.6	1.54	39.41	1.44	36.85
:30.9	22.9	489.6	1.55	39.67	1.45	37.11
:32.6	22.8	487.46	1.55	39.67	1.46	37.37
:34.3	22.8	487.46	1.56	39.92	1.47	37.62
:36	22.7	485.33	1.55	39.67	1.48	37.88
:37.7	22.6	483.19	1.57	40.18	1.48	47.88
:39.4	22.7	485.33	1.57	40.18	1.49	38.14
:41.4	22.6	483.19	1.58	40.44	1.50	38.39
:42.8	22.5	481.05	1.59	40.69	1.50	38.39
:44.5	22.8	487.46	1.56	39.92	1.50	38.39
:46.2	22.4	478.91	1.6	40.95	1.51	38.64
:47.9	22.5	481.05	1.59	40.69	1.52	38.90
:49.6	22.4	478.91	1.62	41.46	1.54	39.41
:51.3	22.3	499.07	1.61	41.20	1.53	39.16
:53	22.3	499.07	1.63	41.72	1.54	39.41

hora	Radiación		T superior		T inferior	
	mV	W/m <sup>2</sup>	mV	C	mV	C
:54.7	22.3	499.07	1.61	41.20	1.55	39.67
:56.4	22.1	472.50	1.62	41.46	1.55	39.67
:58.1	22.2	474.64	1.61	41.20	1.56	39.92
:59.8	22.4	478.91	1.64	41.97	1.56	39.92
14:01.5	- 1.6	- 34.21	-----	-----	-----	-----
:03.2	- 1.6	- 34.21	1.55	39.67	1.51	38.64
:04.9	- 1.7	- 36.35	1.51	38.64	1.47	37.62
:06.6	- 1.8	- 38.48	1.50	38.39	1.45	37.11
:08.3	- 1.8	- 38.48	1.45	37.11	1.43	36.60
:10.0	- 1.7	- 36.35	-----	-----	-----	-----
:11.7	- 1.6	- 34.21	1.45	37.11	1.38	35.32
:13.4	- 1.6	- 34.21	1.41	36.09	1.40	35.83
:15.1	- 1.6	- 34.21	1.34	34.29	1.37	35.06
:16.8	- 1.5	- 32.07	1.29	33.02	1.35	34.55
:18.5	- 1.5	- 32.07	-----	-----	-----	-----
:20.2	- 1.5	- 32.07	-----	-----	-----	-----
:21.9	- 1.5	- 32.07	-----	-----	-----	-----
:23.6	- 1.5	- 32.07	-----	-----	-----	-----
:25.3	- 1.4	- 29.93	-----	-----	-----	-----
:27.0	- 1.4	- 29.93	1.19	30.46	1.28	32.76
:28.7	- 1.3	- 27.79	1.17	29.94	1.27	32.50
:30.4	- 1.2	- 25.66	-----	-----	-----	-----
:32.1	- 1.2	- 25.66	1.18	30.20	1.23	31.48
:33.8	- 1.1	- 23.52	1.14	29.18	1.23	31.48
:35.5	- 1.1	- 23.52	1.13	28.92	1.22	31.22
:37.2	- 1.1	- 23.52	1.13	28.92	1.19	30.46
:38.9	- 1.1	- 23.52	1.12	28.66	1.20	30.71

Ajustes de Radiación en  $W/m^2 = I$  con la Temperatura Media del Plato en  $^{\circ}C = T$  para el Sensor Insolar.

	Lineal	Exponencial	Logarítmico	Potencial
Insolar	$I = m\bar{T} + b$	$I = ae^{b\bar{T}}$	$I = b + m \ln \bar{T}$	$I = a\bar{T}^b$
Calentamiento	$b = 667.1058$ $m = 4.5951$ $r^2 = 0.8996$	$a = 693.3577$ $b = -0.0090$ $r^2 = .8978$	$b = 1049.2660$ $m = -153.1025$ $r^2 = 0.8913$	$a = 1465.0891$ $b = -0.2998$ $r^2 = 0.8875$
Enfriamiento	$b = 21.2302$ $m = -1.5379$ $r^2 = .8708$	$a = -0.0152$ $b = 0.0320$ $r^2 = 0.3587$	$b = 0.2184$ $m = -52.83$ $r^2 = 0.8771$	$a = 5.02 \times 10^{-3}$ $b = 2.5682$ $r^2 = 0.1000$

TABLA 11

hora	Radiación (W/m <sup>2</sup> )	$\Delta I$ (W/m <sup>2</sup> )	$\bar{T}$ (°C)	$\Delta \bar{T}$ (°C)	$\Delta I / \Delta \bar{T}$ (W/m <sup>2</sup> °C)
12:33.1	545.19	----	24.95		
36.5	551.60	-6.41	28.79	-3.84	1.67
39.9	545.19	-6.41	28.16	.64	- 10.02
43.3	540.91	4.28	24.83	3.33	1.28
46.7	534.5	6.41	29.43	4.6	- 1.40
48.4	534.5	0	30.46	-1.03	0
51.8	534.5	0	30.72	-0.26	0
53.5	523.81	10.69	30.72	0	0
55.2	521.67	2.14	31.48	-0.76	- 2.82
56.9	521.67	0	31.99	-0.51	0
58.6	521.67	0	32.38	-0.39	0
13:00.3	517.40	4.27	32.63	-0.25	- 17.08
02.	517.40	0	33.02	-0.39	0
03.7	513.12	4.28	33.4	-0.38	- 11.26
05.4	506.71	6.41	34.04	-0.64	- 10.01
07.1	506.71	0	34.17	-0.13	0
08.8	506.71	0	34.30	-0.13	0
10.5	502.43	4.28	34.80	-0.5	- 8.56
12.2	"	0	35.32	-0.52	0
13.9	"	0	35.32	0	0
15.6	"	0	35.44	-0.12	0
17.3	498.15	4.28	35.96	-0.52	- 8.23
19	"	0	36.34	-0.38	0
20.7	"	0	36.47	-0.13	0
22.4	496.02	2.13	36.86	-0.39	- 5.46
24.1	496.02	0	37.08	-0.22	0
25.8	500.29	- 4.27	37.24	-0.16	+26.69
27.5	489.6	10.69	37.88	-0.64	-16.70
29.2	"	0	38.13	-0.25	0
30.9	"	0	38.39	-0.26	0
32.6	487.46	2.14	38.52	-0.13	-16.46
34.3	487.46	0	38.71	-0.19	0
36	485.33	2.13	38.78	-0.07	-30.43
37.7	483.19	2.14	39.03	-0.25	- 8.56
39.4	485.33	-2.14	39.16	-0.13	+16.46
41.1	483.19	2.14	39.42	-0.26	- 8.23
42.8	481.05	2.14	40.04	-0.62	- 3.45
44.5	487.46	-6.41	39.16	-0.88	7.28
46.2	478.91	8.55	39.80	-0.64	-13.36
47.9	481.05	-2.14	39.80	0	-
49.6	478.91	2.14	40.44	-0.64	- 3.34
51.3	499.07	-20.16	40.18	+0.26	-77.54
53.0	"	0	40.57	-0.39	0
54.7	"	0	40.44	+0.13	0
56.4	472.10	26.57	40.57	-0.13	+ 204.38
58.1	474.64	-2.14	40.56	+0.01	- 214
59.8	478.91	-4.27	40.95	-0.39	- 10.95

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se exploró la introducción de un error en la lectura de un piranómetro debida a variaciones en la temperatura de referencia o "tierra térmica", integrada por un plato masivo de metal conductor. Primeramente fue necesario establecer el objetivo de la lectura; si este fuese sólo el de conocer la radiación total diaria en forma integrada, posiblemente el error de este origen fuera poco importante, como clama el fabricante nacional de estos aparatos.

Para la aplicación en investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar, la lectura de la radiación debe ser confiable en intervalos muy cortos, y es deseable contar con información de la radiación instantánea.

Un medidor adecuado a este uso debe, por supuesto, reaccionar instantáneamente a un cambio instantáneo en la radiación recibida. Con este objetivo se diseñaron pruebas experimentales para evaluar la respuesta instantánea a la radiación en el único medidor de origen totalmente nacional. Estas pruebas permiten concluir lo siguiente en forma resumida:

1. En un piranómetro no compensado térmicamente, usando la inercia térmica del plato como referencia o "tierra térmica", existen fuertes variaciones, cuando la temperatura del plato varía. Se encontró que las variaciones de la temperatura del plato están íntimamente ligadas con la temperatura ambiente, ya que es al ambiente a donde el plato rechaza calor. Esto explica la falta de simetría en las lecturas ya que la temperatura del ambiente no es simétrica con respecto al mediodía solar, como la radiación solar. La imprecisión de la lectura en estas condiciones hace que el sensor sea inadecuado tanto para lecturas de radiación instantáneas como para promedios diarios
2. La lectura de un piranómetro como el anterior (Insolar) es aceptable si se le corrige con el conocimiento de las temperaturas del plato y del disco sensor

3. Si el piranómetro anterior se compensara térmicamente mediante un termistor en serie con la termopila, como ocurre con el sensor Eppley, la lectura de la radiación será sumamente confiable, y aparentemente la instalación de ese compensador térmico será sencilla
4. Dado que las mediciones solarimétricas del banco de datos del I de I se elaboraron con sensores no compensados térmicamente, y se carece de la información necesaria para su corrección, se consideran no confiables.

De este trabajo se desprenden dos recomendaciones principales:

1. Los sensores Insolar que actualmente integran la red solarimétrica del I de I deben ser compensados térmicamente a la mayor brevedad posible
2. Se sugiere continuar la presente línea de investigación para intentar desarrollar un algoritmo que permita rescatar las lecturas de dicha red solarimétrica en sensores no compensados.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Abell George O. "Exploration of the Universe". Ed. Holt, Rinehart and Winston. 3a. Edición (1975) 380-536
2. Almanza R y López S. "Radiación Solar Global en la República Mexicana mediante datos de insolación". Series del Instituto de Ingenierfa. UNAM. Octubre (1975). 71.
3. Coulson Kinsell L. "Solar and Terrestrial Radiation". Ed. Academic Press. (N.Y. U.S.A.) (1975). Cap. 1-11.
4. De Buen O y Palacios L. "Medidas de Insolación 1982". Informe Interno del Instituto de Ingenierfa. Proy. 2112, 2127 y 2131. UNAM. Mayo (1983).
5. Duffie J. y Beckman W. "Solar Energy Thermal Processes". Ed. John Wiley & Sons. (N.Y. U.S.A.). 1a. Edición. Cap. 1-3
6. Fernández J.L. y Estrada V. "Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la República Mexicana". Series del Instituto de Ingenierfa. UNAM. Diciembre(1982). 71.
7. Gutierrez F, Maldonado A. y Sandoval A. "Simulador de Efectos Solares para Captadores Planos". Informe Interno del Instituto de Ingenierfa, Proy 2125. UNAM. Febrero (1983). Capítulo 5.
8. Parker E.N. "The Sun". Scientific American. Septiembre (1975). 43-57.
9. Palacio A y Rodríguez A. "Estimación de la Radiación Solar y de la Temperatura Ambiente Instantáneas". Memorias de la IV Reunión Nacional de Energía Solar. (San Luis Potosí, México) (1980).

10. "Instrumentation for the Measurement of the Components of Solar and Terrestrial Radiation". The Eppley Laboratory, Inc. Nota Técnica que acompaña al Piranómetro Eppley Blanco y Negro Modelo 8-48.

APENDICE A. MODELO MATEMATICO PARA LA ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR  
Y TEMPERATURA AMBIENTE INSTANTANEAS.

La necesidad de poder estimar la radiación de un lugar en una hora y día determinado, llevó a el establecimiento de un modelo matemático aproximado. El modelo, como ya se mencionó con anterioridad, fue desarrollado en el I de I y es de gran simplicidad ya que el único dato necesario es la radiación total máxima del día especificado.

Primeramente se muestran las definiciones necesarias para fundamentar el modelo, aunque de hecho únicamente se toma como herramienta. Si se desea más información remitase al documento original ficha 6 .

A.1. Definiciones

Radiación directa: Radiación proveniente del centro del sol

al punto de observación.

**Radiación difusa:** Radiación solar recibida del Sol después que su dirección ha cambiado por reflexión y difusión por la atmósfera.

**Radiación total:** Suma de las radiaciones directa y la difusa.

**Constante Solar:** Cantidad de flujo total de radiación que incide sobre una superficie perpendicular a la radiación solar en la estratósfera.

## A.2. Desarrollo

La radiación proveniente del Sol varía en términos de lugar geográfico, hora del día, estación del año, nubosidad, contaminación desde 0 hasta  $1.5 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ , siendo la función descrita muy semejante a una senoide de la forma:

$$H(t) = H \text{ máx} \cos^n \frac{\pi t}{L_d}$$

donde

$H \text{ máx}$  es el valor máximo de la radiación en el día

$L_d$  es la longitud del día solar o sea  $t_{\text{alba}} - t_{\text{ocaso}}$  siendo  $t > 0$  en la tarde y  $t=0$  medio día solar

$n$  es un exponente, con valor mayor a 1.

Tanto  $t$  como  $L_d$  deben estar en las mismas unidades de tiempo.

De estudios estadísticos se han establecido los siguientes exponentes para las diferentes radiaciones.

$n = 1.2$  para la radiación total

$n = 1.5$  para la radiación directa.

Integrando  $H(t)$  desde el alba hasta el ocaso se obtiene la radiación total recibida en un día que es la que se da en la información cartográfica.

Si se desea saber la forma de dicha curva en el tiempo se debe de conocer la posición del Sol relativa al plano o superficie que se estudia, por lo que es necesario hacer un estudio geométrico como el siguiente:

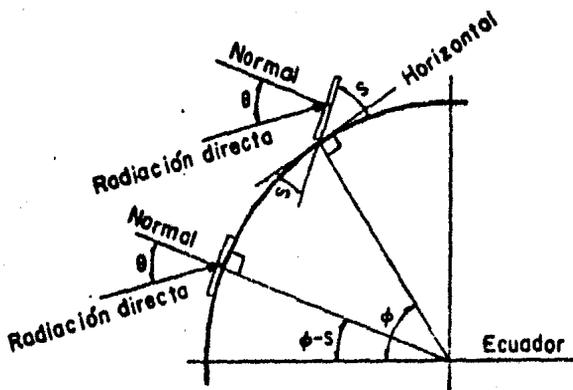


Fig 28 Sección de la tierra en la que se muestran  $\phi, \theta, s$  y  $\phi - s$

donde

$\phi =$  latitud

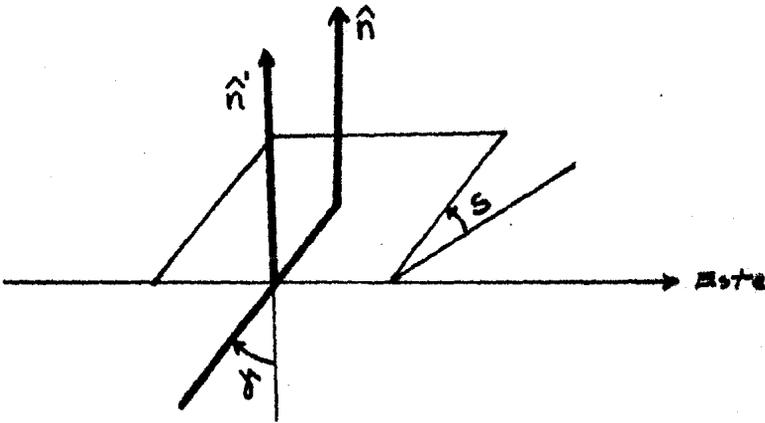
$\delta$  = declinación, ángulo formado entre la recta que une al Sol con el observador en el ecuador y la vertical del lugar al mediodía.

$s$  = el ángulo entre la horizontal y el plano

$\vartheta$  = Angulo azimutal, o sea la desviación de la normal a la superficie con respecto al meridiano local.

$\omega$  = ángulo horario

$\theta$  = ángulo de incidencia de la radiación directa respecto a la normal al plano.



La declinación  $\delta$  está dada de acuerdo a la ecuación aproximada de Cooper:

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left( 360 \frac{284 + N}{365} \right)$$

donde  $N$  es el día en fecha juliana.

Esto nos da que  $\delta = 0$  en los equinoccios y a 23.45 en los solsticios.

El ángulo de incidencia está dado por:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \text{ sen } \phi \text{ cos } s - \text{sen } \delta \text{ cos } \phi \text{ sen } s \text{ cos } \delta + \text{cos } \delta \\ & \text{cos } \phi \text{ cos } s \text{ cos } \omega + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } s \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega + \text{cos } \\ & \delta \text{ sen } s \text{ sen } \delta \text{ sen } \omega. \end{aligned}$$

De esta formula general se tienen dos casos que son los de mayor interés:

a)  $\delta$  igual a cero y  $s = 0^\circ$  ó  $90^\circ$

$$\theta_z = \text{Cos}^{-1} (\text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \omega)$$

obteniéndose el ángulo zenital, o sea el ángulo entre los rayos de la radiación directa y la horizontal.

b)  $\delta = 0$  y  $s \neq 0$

$$\theta_T = \text{Cos}^{-1} (\text{cos } (\sigma - s) \text{ cos } \delta \text{ cos } \omega + \text{sen } (\sigma - s) \text{ sen } \delta)$$

o sea una superficie orientada al norte o sur ( $\delta = 0$ ) con inclinación  $S$  ó una superficie horizontal con latitud artificial  $(\sigma - s)$ .

De la ecuación del ángulo zenital podemos obtener el ángulo del alba o sea  $\omega_0$ . Haciendo  $\theta_z = 90^\circ$  y despejando se tiene

$$\cos \omega_0 = - \frac{\operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta}{\operatorname{cos} \phi \operatorname{cos} \delta} = - \operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta$$

Como el plano en el que el Sol se mueve describe  $360^\circ$  cada 24 hs, o sea  $15^\circ$  por hora, de ahí que la longitud del día solar sea

$$L_d = \frac{2}{15} \cos^{-1} (\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta)$$

Para obtener la fracción de radiación directa recibida por un plano no horizontal se debe calcular el factor de proyección  $R_b = \frac{\operatorname{cos} \theta}{\operatorname{cos} \theta_2}$  que al multiplicarse por  $H_b$  de la fracción deseada.

La radiación difusa se considera por lo general isotrópica si el nublado es homogéneo haciéndose constante, por lo que la ecuación finalmente queda:

$$H'(t)_T \stackrel{\sim}{=} H(t)_b R(t)_b + H(t)_d$$

En el caso de nuestros medidores  $s=0$  por lo tanto  $\theta = \cos^{-1} (\operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi + \operatorname{cos} \delta \operatorname{cos} \phi \operatorname{cos} \omega)$

### A.3. Estimación de la Temperatura Ambiente

Una buena aproximación de la temperatura ambiente a lo largo de un día conociendo las temperaturas máxima y mínima promedios del lugar, se tiene mediante la suma de dos funciones senoidales con periodos diferentes.

Mediante observaciones se ha detectado que la temperatura mínima es cerca del alba y la máxima después del medio día solar, por lo que el período será menor para la senoide que representa el calentamiento.

Suponiendo que la temperatura mínima se tiene a la hora  $t_m$  y la máxima a la  $t_M$ , la forma de las funciones será:

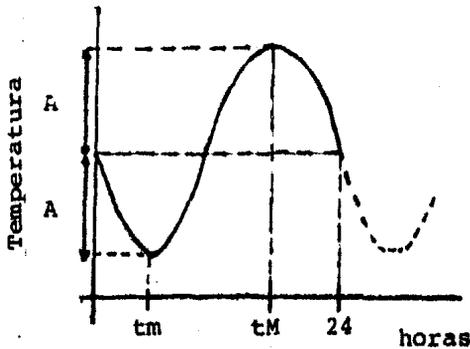


Fig. 29 Temperatura Ambiente de acuerdo a modelo.

Donde los periodos serán:

$$t_M - t_m = t_g$$

$$24 - t_M - t_m = t_c$$

y podrán ser descritas mediante las ecuaciones:

$$T = A \operatorname{sen}\left(\frac{3}{2} + \theta/t_g\right) + B$$

$$\text{para } t_m \leq t \leq t_M \quad \text{y } \theta = t - t_m$$

y

$$T = A \cos(\theta_{\pi} / t_c) + B$$

para  $t_M \leq t \leq 24$        $\theta = t - t_m$

$0 \leq t \leq t_m$        $\theta = t + (24 - t_m)$

donde  $A = (t_M - t_m) / 2$

y

$$B = (t_M + t_m) / 2$$

## APENDICE B. SIMULADOR SOLAR

La necesidad experimental de mantener la mayoría o la totalidad de las variables de un fenómeno controlados lleva al experimentador a la construcción de dispositivos que simulen el fenómeno que se desean estudiar. Tal es el caso del simulador solar con que cuenta en IdeI.

Este dispositivo es un cuarto de asbesto de aproximadamente  $25 \text{ m}^2$ , que cuenta con una lámpara circular de 28 focos y un sistema de circulación de aire. Los focos de la lámpara son de filamento incandescente cuya potencia a 120 Volts es de 150 Watts y se encuentran distribuidos en 2 círculos concéntricos. Estos son controlados por 14 interruptores, que controlan 2 focos simétricos respecto al eje de la lámpara. Dicho eje sirve, al soportarse en dos apoyos, para obtener ángulos de inclinación como con-

junto a su vez cada foco presenta 2 movimientos perpendiculares entre sí. El sistema de circulación de aire posee como fin fundamental mantener una temperatura ambiente y velocidad del viento constante.

En la figura 30 se muestra la gama espectral del espectro solar para la cual la intensidad de la radiación del simulador y la solar guardan una relación lineal entre sí, donde

$$R_{\text{solar}} = K \cdot R_{\text{simulador}}$$

$$\text{y } K = 1.9546$$

Conjuntamente a las pruebas anteriores se realizaron otros experimentos respecto a la intensidad y uniformidad de la radiación, llegándose a las siguientes conclusiones:

- Al disminuir la altura de la intensidad aumenta no así la uniformidad.
- Se observa mayor uniformidad con los focos y lámparas perpendiculares al piso, siendo ésta en círculos concéntricos.

Estas conclusiones permitieron establecer como adecuado el colocar a la lámpara a una distancia de 100 cms del piso con el plano de la lámpara paralelo al del piso para obtener una radiación constante y uniforme.

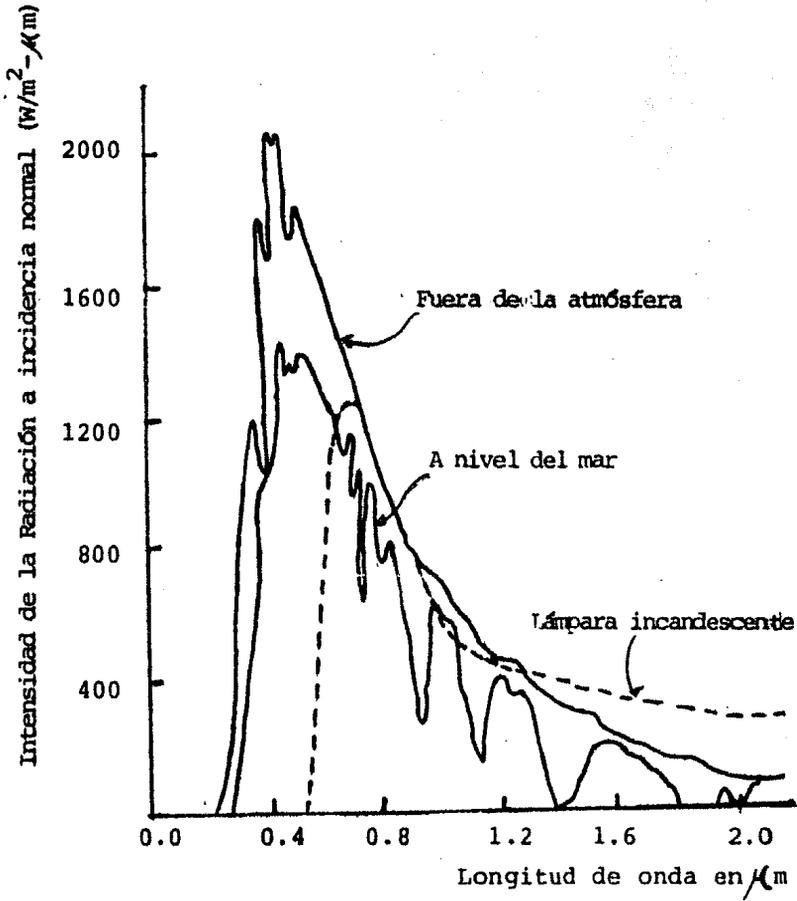


Fig. 30 Espectros de irradiación en incidencia normal de la luz solar fuera de la atmósfera, a nivel del mar, comparada con la distribución espectral de una lámpara de filamento incandescente ( $T=2800K$ ), como las usadas en el simulador [7].

**APENDICE C. INTRUCTIVOS**