

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE FISICA



Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de

LICENCIADO EN FISICA

Título: "CALIBRACION DE UN SOLARIMETRO"

Estudiante: GUILLERMO NAPOLEON MORAN ORELLANA

Este Trabajo de Graduación fué aprobado por:

Nombre:

Coordinadora y Asesora: M.S. Ethelvina Morillo de Escobar

Firma:

San Salvador, Octubre de 1984

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

Rector : Dr. Miguel Angel Parada

Secretario : Dra. Ana Gloria Castaneda de Montoya

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Decano : Ing. Manuel Antonio Cañas Lazo

Secretario : Ing. René Mauricio Mejía Méndez

DEPARTAMENTO DE FISICA

Jefe del Departamento : Lic. José Héctor Elías Díaz

SEMINARIO DE GRADUACION

Coordinadora y Asesora : M.S. Ethelvina Morillo de Escobar

DEDICATORIA

A mis Padres

Guillermo Napoleón Morán.

María Elena Orellana de Morán. (Q.E.P.D.)

A mi Esposa

Carmen Cecilia Reyes de Morán.

A mis Hijos:

Guillermo José Morán Reyes.

Carmen Elena Morán Reyes.

A mi Familia.

RECONOCIMIENTO

A la Organización de Estados Americanos (O. E. A.), por su apoyo continuado al proyecto de Celdas Solares a Bajo Costo, bajo cuyos auspicios ha sido posible el desarrollo de proyectos de investigación en Energía Solar, especialmente la realización de este trabajo.

RECONOCIMIENTO

A mi Asesora, M. S. Ethelvina Morillo de Escobar, por su dedicación a la investigación, sus atinadas observaciones y constante preocupación porque el desarrollo de este trabajo fuera un éxito.

Al Dr. Ignacio Galindo, por haber impartido un curso de capacitación sobre "Radiación Solar y sus Aplicaciones y sus acertadas sugerencias al inicio de este trabajo.

Al Dr. Héctor Riveros, por haber impartido la parte correspondiente a Energía Solar en el curso "Energías no convencionales: Solar y Geotérmica", dentro del XVIII CURCCAF y su asesoría en el Análisis de flujo de calor.

A los compañeros Elias de Jesús Rodas, Tomás Emilio Caprín Mixco y Pablo Aurelio Marroquín, por su entusiasta colaboración.

A la señora Nohemý Villeda de Roveló, por su constante aliento y excelente desempeño en la mecanografía de este trabajo.

A mis compañeros de labores, a mis amigos y a las personas que colaboraron en la ejecución de este trabajo.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es caracterizar un Solarímetro construída en el Depto. de Física. Esto es, la determinación de la constante de calibración, linealidad y constante de tiempo.

El Solarímetro se caracterizó utilizando el método de comparación propuesto por la Organización Meteorológica Mundial. Para el Solarímetro a prueba, en su versión final (Solar 2) se obtuvo como resultado de la caracterización - una constante de calibración de $1.19 \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w \cdot m^2} \pm 8.9\%$ linealidad (r) de 0.993 y una constante de tiempo (τ) de 330 - seg. A fin de introducir mejoras en el Solarímetro en su - versión final (Solar 2) o para diseñar y construir uno más eficiente se hizo un análisis de flujo de calor del sistema, compuesto por el disco sensor y los elementos que interactúan con él.

INTRODUCCION

La energía solar como una de las múltiples alternativas al problema de la crisis energética, debido a la dismi-
nución y posible desaparecimiento a corto plazo de algunos de los recursos naturales no renovables confronta todavía una serie de dificultades para su utilización en gran esca-
la y de manera rentable, debido principalmente a que se -
trata de una tecnología nueva, que requiere para su inves-
tigación de equipo de alto costo, principalmente para la -
medición de la radiación solar.

Lo anterior motivó a la sección de Estado Sólido del Departamento de Física a impulsar un plan de desarrollo e investigación aplicados que comprende un proyecto de "Dise-
ño y construcción de equipo de medición solar a bajo costo". A fin de contar con dispositivos para medir la energía solar que incide sobre nuestro territorio y tener la información -
necesaria para ser utilizada en el diseño y construcción de diversos sistemas solares que puedan tener aplicaciones, ta-
les como: La producción de electricidad, la desalinización del agua, el riego, la cocina, la conservación de alimentos por refrigeración, secado de granos, etc.

Para garantizar que las mediciones de irradiancia que se llevan a cabo con el solarímetro construido en el Departa-

mento de Física sean confiables; se hace necesario caracterizarlo, esto es hacer una determinación y evaluación de las características físicas del instrumento.

Lo anterior se llevó a cabo, siguiendo las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.), para la caracterización de piranómetros de tercera clase.

El solarímetro construido fué modificado posteriormente dos veces. En cada caso se caracterizó para hacer un seguimiento de los cambios que podría experimentar en sus características físicas debido a las modificaciones. Como resultado final se obtuvo un solarímetro con una constante calibración $\bar{K}'_{A_2} = 1.19 \times 10^{-3} \frac{m \cdot V}{w \cdot m} \pm 8.9\%$, linealidad $r = 0.993$ y constante de tiempo $\tau = 330$ seg.

Un análisis de flujo de calor del sistema se hizo a fin de determinar la influencia en las pérdidas de calor de los distintos elementos que interactúan con el sistema y proponer cambios al diseño modificado por última vez. O para el diseño y construcción de un nuevo solarímetro en base a los resultados del análisis de flujo de calor.

Este trabajo también contribuye a la capacitación de personal que pueda llevar adelante los planes de desarrollo e investigación de la energía solar y sus aplicaciones, del

Departamento de Física, así como la cooperación con otras - instituciones gubernamentales o privadas que trabajan en es te campo.

El desarrollo del trabajo se presenta de la siguiente manera:

Capítulo I. Se presentan los conceptos básicos sobre radiación solar; su interacción con la atmósfera y la superficie terrestre.

Capítulo II. Presenta las técnicas de medición de la radiación solar.

Capítulo III. Se presentan los métodos de calibración de los instrumentos de medición de la radiación solar.

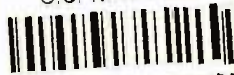
Capítulo IV. Se muestran los resultados de la caracterización del solarímetro a prueba.

En el Capítulo V se hace un análisis de flujo de calor del sistema.

Capítulo VI. Se presenta un análisis y discusión de - los resultados. Conclusiones y Recomendaciones.

Guillermo Napoleón Morán Orellana.
Octubre de 1984.

UES BIBLIOTECA FAC.
C.C. N.N. YMM



INVENTARIO: 19200606



X

INDICE

<u>CAPITULO</u>	PAGINA
RESUMEN	VI
INTRODUCCION	VII
I RADIACION SOLAR: SU INTERACCION CON LA ATMOSFERA Y LA SUPERFICIE TERRESTRE	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 LA RADIACION SOLAR	1
1.3 LA CONSTANTE SOLAR	3
1.4 INTERACCION DE LA RADIACION SOLAR CON LA ATMOSFERA TERRESTRE	5
1.5 DEFINICION DE LA RADIACION SOLAR TERRES- TRE	5
1.6 PROCESOS EN LA ATMOSFERA COMO RESULTADO DE LA INTERACCION CON LA RADIACION SOLAR	7
1.7 LA POSICION APARENTE DEL SOL	9
1.8 INTENSIDAD DE LA RADIACION SOLAR SOBRE - UNA SUPERFICIE	16
1.9 RADIACION DIURNA Y ANUAL	23
1.10 RADIACION SOLAR SOBRE PLANOS INCLINADOS	24
II TECNICAS DE MEDICION DE LA RADIACION - SOLAR	27
2.1 INTRODUCCION	27
2.2 RADIACION SOLAR. CARACTERISTICAS GENE- RALES	28

2.3	FACTORES QUE AFECTAN LA INTENSIDAD DE LA RADIACION SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE	28
2.4	BALANCE ENERGETICO AL NIVEL DEL SUELO	29
2.5	APARATOS DE MEDICION	30
2.6	MEDICIONES DE RADIACION SOLAR DIRECTA Y GLOBAL	31
2.6.1	PIRHELIOMETROS DE INCIDENCIA NORMAL	31
2.6.2	PIRANOMETRO	34
III	CALIBRACION DE INSTRUMENTOS DE RADIACION	36
3.1	PRINCIPIOS GENERALES DE CALIBRACION	36
3.1.1	INTRODUCCION	36
3.1.2	ESTANDAR	36
3.1.3	ESTANDAR ABSOLUTO	37
3.1.4	PROCESO DE CALIBRACION	38
3.2	PRINCIPIOS GENERALES PARA CALIBRACION DE INSTRUMENTOS DE RADIACION	40
3.2.1	INTRODUCCION	40
3.2.2	CLASIFICACION DE LOS EQUIPOS DE MEDICION	41
3.2.3	ESCALA PIRHELIOMETRICA ESTANDAR DE 1956	42
3.2.4	ESTANDAR PIRANOMETRICO INTERNACIONAL	43

	3.2.5 INSTRUMENTOS ESTANDAR	45
	3.2.6 CALIBRACION PIRHELIOMETRICA	46
	3.2.7 CALIBRACION PIRANOMETRICA	47
	3.2.8 CALIBRACION POR COMPARACION CON UN PIRANOMETRO DE REFERENCIA	49
	3.3 CALIBRACION EN UNA RED DE ESTA- CIONES	52
	3.4 CALIBRACION INICIAL Y CONTROL DE RUTINA	53
IV	CARACTERIZACION DEL SOLARIMETRO - CONSTRUIDO EN EL DEPARTAMENTO DE FISICA	54
	4.1 INTRODUCCION	54
	4.1.1 CARACTERIZACION	54
	4.1.2 METODO DE CALIBRACION	54
	4.1.3 MODIFICACIONES AL DISEÑO ORIGINAL	56
	4.1.4 PROCESO DE CARACTERIZACION	57
	4.1.5 REGISTRO DE GRAFICAS	58
	4.1.6 EQUIPO ESTANDAR	58
	4.2 CARACTERIZACION DEL SOLAR 0	59
	4.2.1 CONSTANTE DE CALIBRACION Y LINEA- LIDAD	59
	4.3 CARACTERIZACION DEL SOLAR 1	63
	4.3.1 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE CALIBRACION K_{A_1} UTILIZANDO LA TEC NICA T2	64

	4.3.3 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE CALIBRACION \bar{K}_{A_1}' Y DE LA LINEALIDAD r_1 , UTILIZANDO LA TECNICA T1	74
	4.4 CARACTERIZACION DEL SOLAR 2	77
	4.4.1 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE CALIBRACION Y LA LINEALIDAD BAJO CONDICIONES DE LABORATORIO Y DE CAMPO UTILIZANDO LA TECNICA T1	77
	4.4.2 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE TIEMPO	79
V	CALCULO DE FLUJOS DE CALOR	94
	5.1 INTRODUCCION	94
	5.2 TRANSFERENCIA DE ENERGIA CALORIFICA	94
	5.2.1 CONDUCCION	95
	5.2.2 RADIACION	95
	5.2.3 CONVECCION	96
	5.3 LEYES BASICAS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	97
	5.3.1 CONDUCCION	97
	5.3.2 RADIACION	98
	5.3.3 CONVECCION	99
	5.4 CALCULO DE FLUJOS DE CALOR	100
	5.4.1 RADIACION TOTAL INCIDENTE	100
	5.4.2 DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE ESTABILIZACION Y DE LA CONSTANTE DE TIEMPO	101

VI	ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION	107
6.1.1	LINEALIDAD	107
6.1.2	CONSTANTE DE CALIBRACION	107
6.1.3	CONSTANTE DE TIEMPO	110
6.2	CONCLUSIONES	111
6.3	RECOMENDACIONES	113
	BIBLIOGRAFIA	117
	ANEXOS	

CAPITULO I

RADIACION SOLAR: SU INTERACCION CON LA ATMOSFERA Y LA SUPERFICIE TERRESTRE

1.1 Introducción.

En este Capítulo examinaremos, el origen de la radiación electromagnética que proviene del sol, su naturaleza, e interacción con la tierra y su atmósfera. Determinaremos cómo para cualquier punto sobre la superficie terrestre, la intensidad de la radiación solar varía con la hora del día y la estación del año, así como el cálculo del flujo de radiación solar sobre una superficie inclinada a partir de datos obtenidos de una superficie horizontal.

1.2 La Radiación Solar.

Entendemos^{1/} por la radiación solar a la radiación - electromagnética proveniente directamente del disco solar cuya longitud de onda es desde 1 \AA hasta 10^6 cm .

Los fotones de radiación gamma que son extremadamente energéticos, al fluir hacia afuera del centro del sol colisionan con núcleos y electrones y son dispersados, cediendo

^{1/} B. J. Brinkworth, pp. 25-27.

do parte de la energía decayendo hacia rayos X, éstos a su vez al colisionar con el material cercano a la superficie del sol, originan la radiación electromagnética, que viaja al espacio. La distribución de energía es cercana a la de un "cuerpo negro" clásico a la temperatura de 5700 °K.

La radiación solar que se recibe en la tierra está comprendida en el intervalo de longitudes de onda entre 0.3 y 4.0 μm .

La distribución espectral se observa en la traza A y es similar a la traza B que corresponde a la de un cuerpo negro 5700 °K. (Fig. 1.1).

Debemos notar la forma de la curva. La ordenada en la Figura 1.1 es la densidad de energía definida de manera tal que el área bajo la curva entre cualesquiera dos longitudes de onda es proporcional a la energía transportada por la radiación solar en esa parte del espectro. Se puede observar que alrededor de la mitad de la energía del sol es radiada con longitudes de onda entre 0.35 y 0.75 micrometros, esto es en la banda visible.

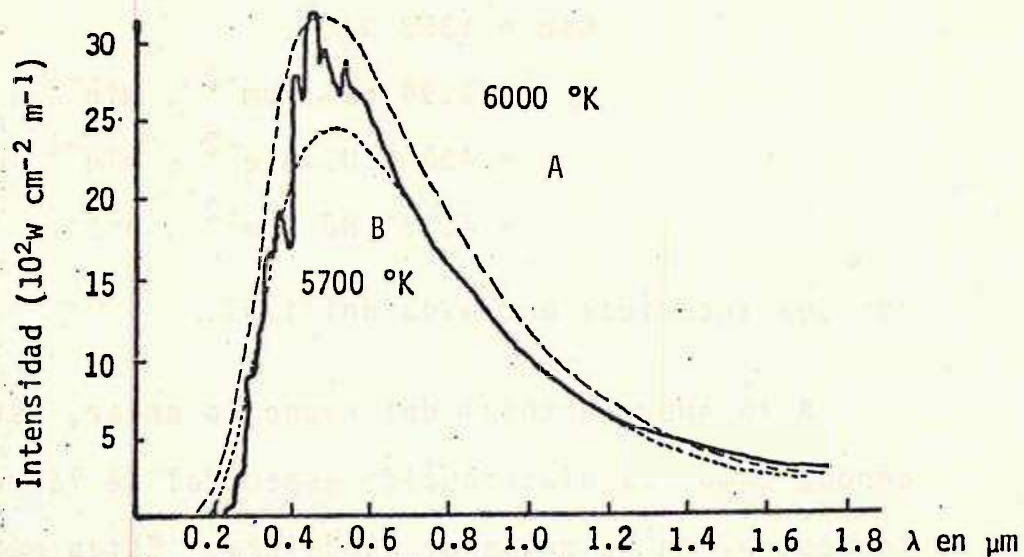


Figura 1.1 Espectro de radiación solar. Tomado de:
An Introduction to Atmospheric Physics.
Leagle, R. G.

1.3 La Constante Solar.

La constante solar^{2/} G_{sc} , es la energía proveniente del sol por unidad de tiempo, recibida en la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación, a la distancia tierra-sol (promedio) en el exterior de la atmósfera.

Se han hecho varias mediciones de G_{sc} , pero el valor estándar aceptado es:

^{2/} J. A. Duffie y W. A. Beckman. "Solar Engineering of Thermal Processes". pp. 6-7.

$$\begin{aligned}
 G_{sc} &= 1353 \text{ W/m}^2. \\
 &= 1.94 \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}. \\
 &= 428 \text{ BTU. pie}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}. \\
 &= 4.871 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}
 \end{aligned}$$

con una incerteza estimada del 1.5%.

A la energía total del espectro solar, usualmente se le conoce como "La distribución espectral de la radiación extraterrestre, en ausencia de atmósfera. Estas mediciones están estándar NASA/ASTM de irradiancia espectral.

Las variaciones de la radiación emitida por el sol, son debido a las tormentas solares y las variaciones de la distancia promedio tierra-sol; siendo expresada la dependencia de la radiación extraterrestre en el año por:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} n \right) \quad 1.1$$

donde G_{on} es la radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación el n ésimo día del año.

1.4 Interacción de la Radiación Solar con la Atmósfera Terrestre.

La radiación solar^{3/} viajando a 300,000 kms seg^{-1} , al-

^{3/} B. J. Brinkworth, op. cit. pp. 27-41.

canza la órbita de la tierra alrededor de ocho minutos después de dejar la superficie del sol, pasando a través de una superficie de 150 millones de kilómetros de radio. Tomando el valor de la constante solar de $1353 \text{ Wm}^{-2} \pm 1.5\%$. La brillantez del sol será de $3.85 \times 10^{26} \text{ W}$. y el flujo de radiación desde la superficie del sol será $6.33 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}$. De esta enorme cantidad de energía vertida desde el sol al espacio, sólo cerca de $1.1 \times 10^7 \text{ W}$ se absorbe por la tierra (con un albedo de 32%). Aunque si bien la tierra intercepta una pequeña fracción de la energía proveniente del sol, que cae sobre nuestra atmósfera superior en un período dado, (es equivalente a diez mil veces los requerimientos de energía del mundo entero en ese período) no toda alcanza la superficie de la tierra como resultado de complejas interacciones en la atmósfera.

1.5 Definición de la Radiación Solar Terrestre.

Describimos la radiación tal como la percibimos. La porción de la radiación solar incidente que nos viene directamente del disco solar aparente, sin reflexión de otros objetos, es llamada radiación directa. La radiación solar global es toda radiación solar incidente sobre una superficie, incluyendo la radiación difusa y directa. No se incluye la radiación que ha sido absorbida por la materia y

reemitida, ya que la mayor parte de esta radiación está a longitudes de onda mayores de $4 \mu\text{m}$. La radiación solar difusa es la radiación solar global menos la radiación directa. (Ver Fig. 1.2).

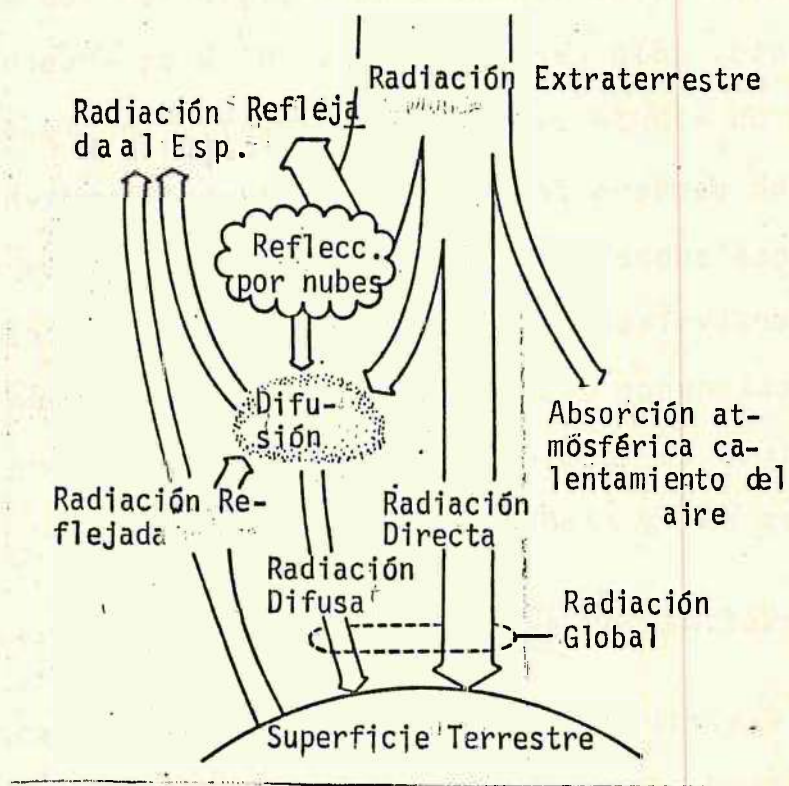


Fig. 1.2 Radiación Solar Global Directa y Difusa.

1.6 Procesos en la Atmósfera como Resultado de la Interacción con la Radiación Solar.

En los niveles más altos sobre los 25 Km. de la superficie terrestre ocurre un proceso que remueve virtualmente toda la radiación ultravioleta. Ordinariamente el oxígeno molecular, O_2 es primero disociado en oxígeno atómico O . La energía requerida para romper la ligadura molecular es tal que solamente fotones con longitudes de onda menores que alrededor de $0.18 \mu m$ son efectivos y toda esta radiación es removida en el proceso. Algunos de los átomos de oxígeno se recombinan de nuevo formando moléculas de O_2 , pero la mayoría de éstos se recombinan de nuevo para formar moléculas de ozono O_3 . El ozono es otro fuerte absorbedor de radiación pero no está tan fuertemente ligado como el O_2 , así que fotones con longitud de onda menores que $0.32 \mu m$. puede disociarlo en O y O_2 de nuevo. Un estado estable existe ahora, en el cual disociación y recombinación de O , O_2 y O_3 ocurre continuamente, removiendo virtualmente toda la radiación ultravioleta y transformándola en fotones de más baja energía. Fotones con longitud de onda comprendida entre las bandas visibles e infrarroja interactúan con gas molecular y partículas de polvo.

Dispersando la radiación solar uniformemente en todas -

direcciones, así que parte de la radiación es redirigida hacia afuera de la tierra y regresa de nuevo al espacio. Este tipo de dispersión afecta la longitud de onda corta de la radiación en su mayor parte. Como un resultado de la radiación dispersada se tiene el cielo claro con su característico color azul cuando lo vemos para bajas altitudes. Las gotas de agua también dispersan la radiación fuertemente, y cuando aparecen en forma densa como en una nube espesa, la dispersión múltiple puede causar que el 80% aproximadamente de la radiación incidente regrese al espacio. Ya que en promedio las nubes terrestres cubren el 50% de la atmósfera, éste es un potente mecanismo para las pérdidas de energía solar.

La verdadera absorción por medio de las moléculas de vapor de agua, dióxido de carbono y otros constituyentes de la atmósfera es otra importante barrera para los rayos solares. La componente infrarroja de la radiación solar tiene energía correspondiente a la de ligadura en algunas de las moléculas constituyentes de la atmósfera. La energía puede ser tomada de las ondas en estas vibraciones y ser distribuida a otras moléculas a través de la frecuente ocurrencia de colisiones en nuestra relativa atmósfera densa. Para los propósitos actuales, debemos de considerar a la radiación absorbida como que se ha perdido, aunque si bien la reemisión de energía tiene importantes efectos.

Estas interacciones con la atmósfera reducen la intensidad de la radiación solar en la superficie a un poco más de la mitad del valor en la parte superior de la atmósfera. La absorción de la radiación solar produce cambios en la distribución espectral de la energía, y la dispersión de la energía solar modifica la trayectoria por la cual la energía llega a la superficie terrestre. Estos efectos dependen sobre todo de la constitución local de la atmósfera y varía apreciablemente de lugar a lugar. La polución o contaminación atmosférica proveniente de los centros de población, el alto contenido de vapor de agua cerca de las costas y cambios en los patrones de las cubiertas de nubes, nos sirven para hacer predicciones de la intensidad de energía solar. Quizá la parte más importante es la longitud de la trayectoria de la radiación solar a través de la atmósfera para alcanzar una ubicación particular. Esto determina las pérdidas a través de la dispersión y absorción. Además la intensidad de la radiación varía en una forma complicada con la hora del día, la estación del año y la posición de la superficie terrestre como pronto veremos.

1.7 La Posición Aparente del Sol.

Si bien la órbita de la tierra alrededor del sol es es-

trictamente una elipse, la excentricidad es tan pequeña que es escasamente distinguible de un círculo. El radio medio es de alrededor de 150 millones de kilómetros, y define la unidad astronómica de distancia; las variaciones extremas del radio durante el año tienen un valor de 3.4% solamente. Esta variación no es perceptible y no juega un papel significativo en los cambios de la estación terrestre. Estas son causadas por la inclinación del eje de rotación, el cual no es perpendicular al eje de la órbita. La inclinación relativa a ese plano es alrededor de 66.5° y, ya que no existen fuerzas actuando sobre su movimiento, el eje apunta en una dirección que está esencialmente fija en el espacio, como se puede ver a partir de la Fig. 1.3; esto origina substanciales variaciones en la duración de la luz diurna durante el año, a medida que la tierra se mueve alrededor de su órbita. Un punto en el hemisferio septentrional tendrá su período más largo de luz en la época de solsticio de verano, o sea en junio 22 cuando el extremo septentrional del eje apunta hacia el sol, y sufre un largo período de obscuridad en el solsticio de invierno, el 22 de diciembre cuando el eje apunta hacia afuera. Los dos puntos neutrales entre ellos se encuentran cuando el eje de la tierra es perpendicular a la línea que une la tierra con el sol. y son los equinoccios, que aparecen el 21 de marzo y el 23 de septiembre.

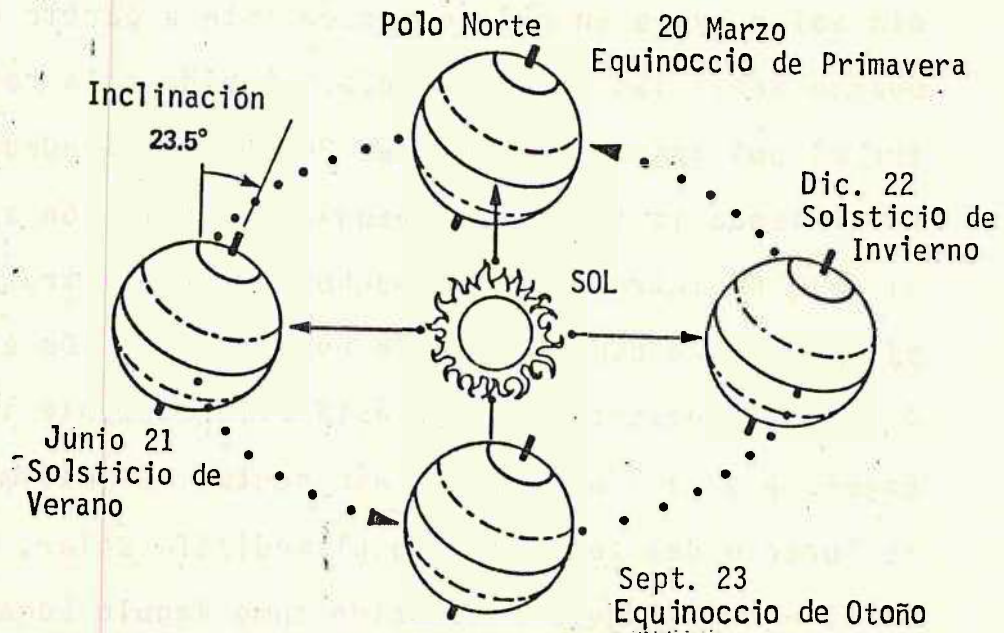


Fig. 1.3 Diagrama de la Orbits Terrestre alrededor del Sol.

Tomado de: Solar Energy Technology Handbook. William C. Dickinson.

El movimiento aparente del sol, visto desde un punto - en la latitud ϕ en el hemisferio norte, en el solsticio de verano, es como el que se muestra en la Figura 1.4. Definimos la posición aparente del sol como se ve desde un punto sobre la tierra por dos ángulos, la altitud α relativa a la horizontal y el acimut γ_s relativo al Norte (rumbo). Cuando el sol está al rumbo sur, el acimut es 90° y la altitud

es un máximo. En ese instante se dice que se tiene el mediodía solar, y es un origen conveniente a partir del cual se pueden medir las horas del día. Debido a la rotación terrestre el sol aparece girando en 24 horas, alrededor de la tierra, siendo la tierra tan pequeña en relación a la distancia al sol, no introduciremos muchos error, si trasladamos este eje de manera que pase sobre nuestra posición en la latitud ϕ como se muestra. El eje está evidentemente inclinado a un ángulo ϕ a la línea N-S en ese punto. Si medimos el movimiento horario del sol relativo al mediodía solar, habremos girado el eje un ángulo W conocido como ángulo horario, a un tiempo t horas después del medio día dado por

$$W = 15 (H_s + 12) \text{ en la mañana} \quad 1.2$$

ó

$$W = 15 (H_s - 12) \text{ en la tarde} \quad 1.3$$

donde

$$H_s = LMT + EOT + 4 (L_{tz} - L) \quad 1.4$$

LMT : Tiempo local medio.

EOT : Ecuación del tiempo.

L_{tz} : Meridiano estándar local.

L : Longitud del observador.

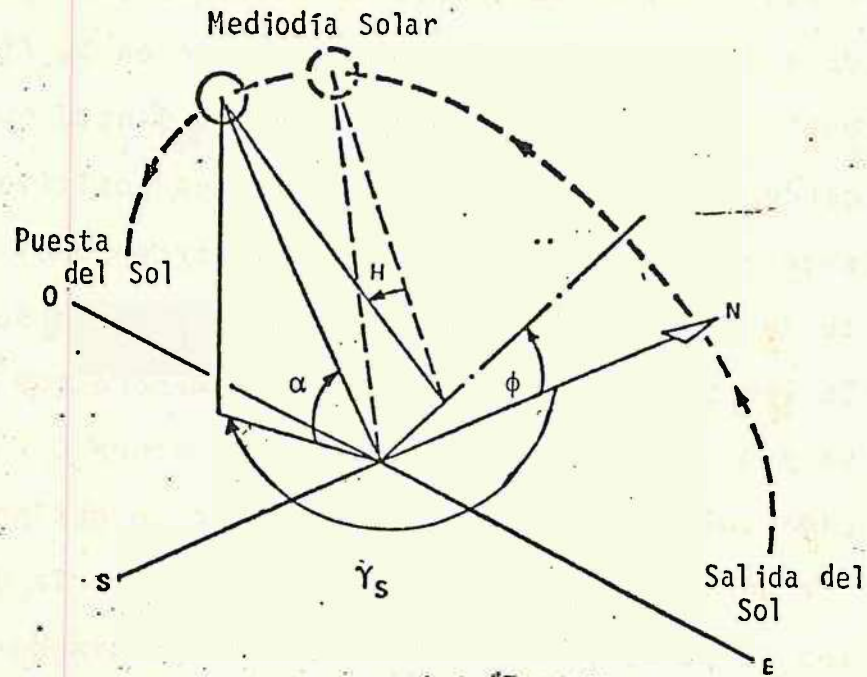


Fig. 1.4 Movimiento aparente del Sol a una latitud ϕ en el hemisferio Septentrional.

Tomado de: Solar Energy forman, B. J. Brinkworth.

El ángulo horario es cero al mediodía y se incrementa con el tiempo hasta 360° . La tierra rota entonces 15° por hora.

$$W = \frac{t}{24} \times 360 = 15 t \text{ grados} \quad 1.5$$

$$W = \frac{t}{24} \times 2\pi = 0.252 t \text{ radianes} \quad 1.6$$

La variación estacional en la posición aparente del sol está representada por el ángulo de declinación δ .

Este varía entre + 23.5 en el solsticio de verano y - 23.5 en el solsticio de invierno como puede ser deducido a partir del movimiento mostrado en la Figura 1.3. El movimiento descrito en la Figura 1.4 está evidentemente tomando lugar en el verano, allí δ es positivo, con el sol siguiendo una trayectoria que intercepta el horizonte norte de la línea E - O en la salida y en la puesta del sol. En los equinoccios δ es cero, de manera que el sol se eleva y se pone exactamente sobre la línea E - O. La declinación solar en otras épocas del año se obtiene mejor a partir de tablas, sin embargo para la mayoría de los propósitos se puede permitir un cálculo aproximado. Si se mide la época del año en días "d" a partir del equinoccio de primavera la declinación está dada aproximadamente por:

$$\delta = 23.5 \quad \text{sen} \frac{2\pi d}{365} \quad \text{grados} \quad 1.7$$

Estamos ahora en posición de calcular la posición aparente del sol en un punto con latitud ϕ a cualquier hora del día representada por el ángulo horario W y la estación del año representada por la declinación δ . Al mediodía solar, la altitud tiene evidentemente su máximo valor de $90^\circ - \phi + \delta$, pero en otras horas la determinación de la posición es un poco más difícil. Pero se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Sen } \alpha = \cos \delta \cos w \cos \phi + \text{sen } \delta \text{ sen } \phi. \quad 1.8$$

$$\text{Sen } \gamma_s = \frac{\cos \delta \text{ sen } W}{\cos \alpha} \quad 1.9$$

No existe una forma completamente satisfactoria de representar tridimensionalmente, el movimiento aparente del sol en un diagrama, pero el método adoptado en la Fig. 1.5 muestra algunas de las condiciones esenciales. El diagrama muestra las coordenadas angulares de la posición aparente del sol α y γ_s como funciones del tiempo relativas al medio día local.

Se dan trayectorias para posiciones representativas sobre la tierra en varias épocas del año, el ecuador (Lat 0°), trópicos (Latitud 23.5°). Europa septentrional (Lat 52°) y círculo ártico (Lat 23.5°). Aquellas partes de la trayectoria para las cuales el acimut excede los 0° , esto es, sobre el lado norte del plano E - 0 están punteadas.

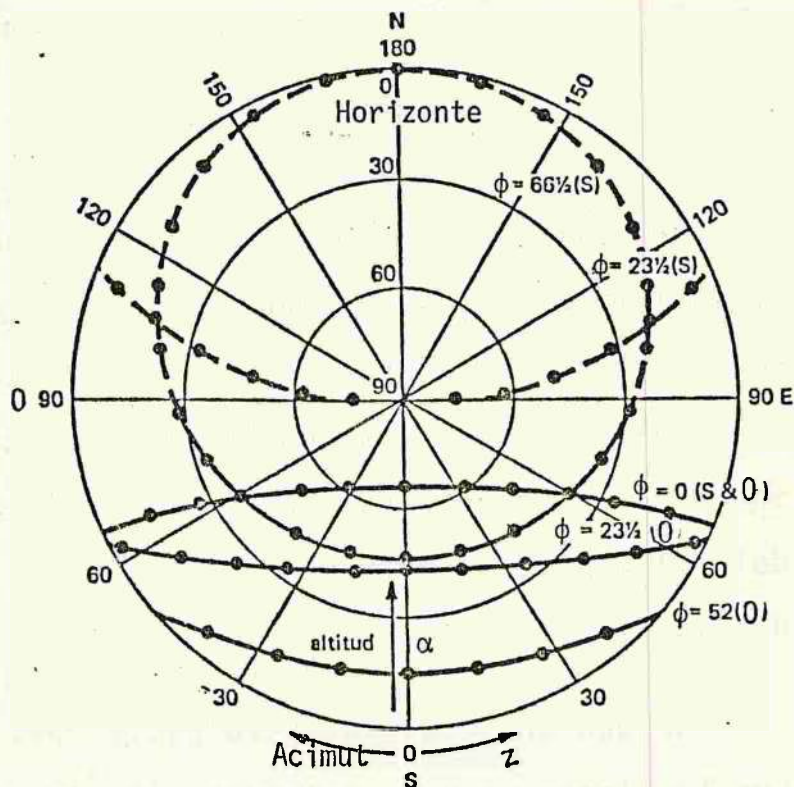


Fig. 1.5 Trayectoria aparente del Sol en distintas latitudes y estaciones. (Hemisferio Septentrional).

Tomado de: Solar Energy for Man. B. J. Brinkworth p. 33.

1.8 Intensidad de la Radiación Solar sobre una Superficie.

Dos factores influyen fuertemente la intensidad de la radiación solar que incide directamente sobre una superficie:

1. La oblicuidad de los rayos relativos al plano de la superficie.

2. La longitud de la trayectoria de los rayos a través de la atmósfera.

Ambos factores dependen sobre todo de la altura solar aparente. Si como se muestra en la Fig.1.16 rayos de intensidad I por unidad de área caen sobre una superficie plana en una dirección inclinada, a un ángulo θ con respecto a la normal, o perpendicular a través de la superficie, el área cubierta de radiación por unidad de área es $\frac{1}{\cos \theta}$, entonces la intensidad sobre una superficie es $I \cos \theta$.

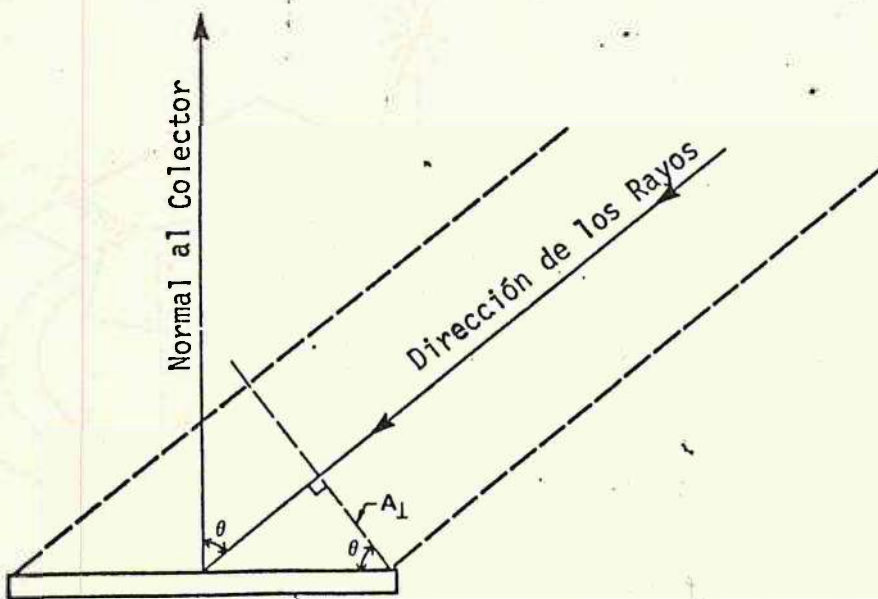


Fig. 1.6 La Ley del Coseno: El efecto del ángulo Solar sobre la cantidad de radiación (Irradiancia que llega a un colector).

Podemos representar la inclinación de cualquier superficie, tal como la pendiente de una colina, o el techo de una casa, especificando la dirección de su normal de la misma forma que hemos especificado la posición aparente del sol; asignándole una altitud ψ y un acimut γ (Ver Figura 1.7).

De manera que el ángulo θ entre los rayos solares directos y la normal a dicho plano está dado por:

$$\cos \theta = \cos (\alpha - \psi) + \cos \alpha \cos \psi [\cos (\gamma_s - \gamma) - 1] \quad 1.10^{4/}$$

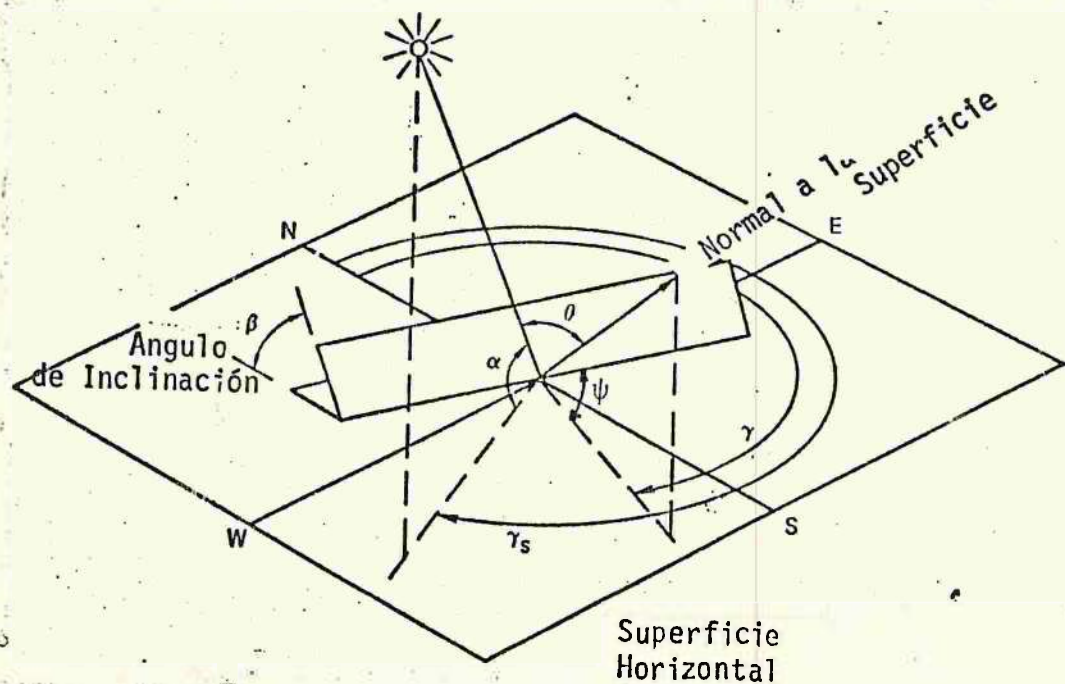


Fig. 1.7 Relación de la radiación incidente sobre una superficie inclinada.

4/ B. J. Brinkworth, pp. 36

β = Angulo de inclinación de la superficie inclinada con respecto al plano horizontal.

α = Altitud Solar.

ψ = Angulo que forma la normal a la superficie inclinada con respecto al plano.

γ_s = Acimut del sol.

γ = Acimut del plano.

Podemos ver que para superficies con $\gamma = \gamma_s$, cuya normal yace, como el sol en el mismo plano vertical, el ángulo θ es igual a $(\alpha - 90^\circ)$ entonces $\cos \theta$ es igual a $\sin \alpha$.

La longitud de la trayectoria de los rayos directos a través de la atmósfera es casi inversamente proporcional al $\sin \alpha$ como veremos, de la Fig. 1.8, debido a que la atmósfera terrestre es tan delgada comparada con su radio. Solamente para altitudes solares muy bajas, la curvatura de la tierra se vuelve importante en este caso. Es una simplificación muy útil. Los meteorólogos relacionan la longitud de la trayectoria con la masa de aire, tal que una trayectoria radial directa corresponda a una masa de aire = 1. Entonces para cualquier altitud α , la masa de aire es igual a -

$\frac{1}{\sin \alpha}$. La idea aquí es que la dispersión y absorción experimentada por un rayo solar es proporcional a la masa de constituyentes atmosféricos que atraviesa. Por ejemplo cuando α tiene los valores 42° , 30° , 20° , la masa de aire es $1\frac{1}{2}$, 2 y 3, respectivamente.

La reducción de la intensidad y modificación de la distribución de la energía solar por absorción y dispersión depende de una forma medianamente complicada de la trayectoria de aire (longitud) o de la masa de aire. Los efectos se muestran aproximadamente para atmósferas despejadas en la Fig. 1.9. La reducción general se debe en gran parte a la dispersión y las profundas fisuras a la absorción por vapor de agua y dióxido de carbono.

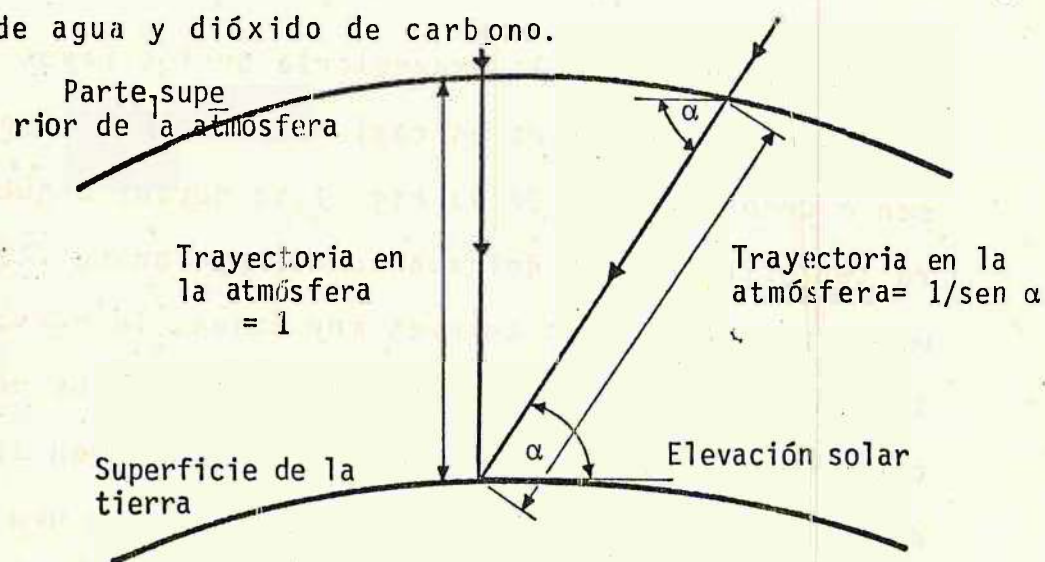


Fig. 1.8 Longitud de la Trayectoria del Rayo en la Atmósfera.

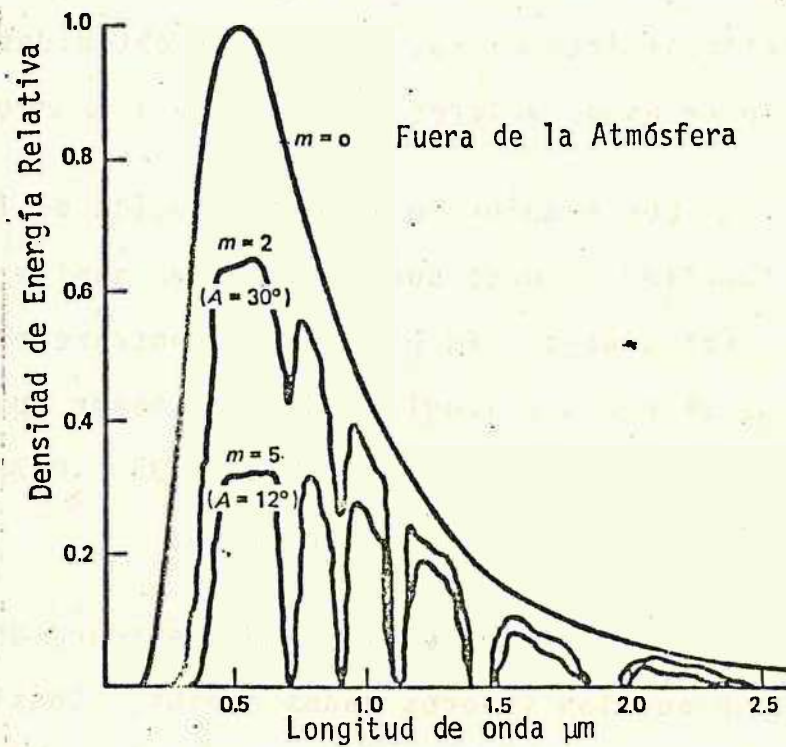


Fig. 1.9 Efecto del paso a través de la atmósfera de la radiación solar.

Tomado de: Solar Energy forman. B. J. Brinkworth.

Las áreas bajo estas curvas representan la intensidad I , la energía total por unidad de tiempo por unidad de área sobre una superficie mirando directamente al sol. Para altitudes solares de 90° , 30° , 20° y 12° , respectivamente (correspondientes a masas de aire de 1, 2, 3 y 5) la intensi

dad I es alrededor de 900, 750, 600 y 400 watts por metro cuadrado en una atmósfera clara. Valores aproximados para alturas intermedias pueden ser obtenidos por interpolación, entre estos valores, de acuerdo a la apropiada masa de aire.

Los cambios en la distribución de la energía con la longitud de onda son pequeños en puntos diferentes, horas y estaciones. En promedio encontraremos una distribución de 1% con una longitud de onda menor que $0.35 \mu\text{m}$; alrededor del 50% en la banda visible ($0.35 - 0.75 \mu\text{m}$) y alrededor del 49% en el rango del infrarrojo.

La energía total incidente sobre una superficie es mayor que los valores dados arriba. Consiste no solamente de la componente directa considerada sino que también de la componente difusa, comprendiendo la radiación que ha sido dispersada por constituyentes de la atmósfera y redirigida hacia la superficie como se ve en la Fig. 1.2.

La radiación difusa representa una fracción significativa del total particularmente a alturas solares muy bajas, donde puede ser tanto como la mitad. Es difícil estimarla con mucha precisión. La distribución de energía de la radiación difusa es ligeramente desviada hacia longitudes de onda más cortas, comparadas con las de la radiación directa, debido en gran parte a la fuerte dispersión por los

constituyentes atmosféricos al final del espectro.

1.9 Radiación Diurna y Anual.

Para hacer una primera evaluación del valor económico de la radiación solar, se necesita estimar la energía total recibida sobre una superficie, digamos en un día o en un año. Para hacerlo, debemos sumar la energía recibida directamente, a lo largo de una trayectoria cuya dirección y masa cambia con el día, junto con la contribución difusa.

La precisión con las cuales estos cálculos puedan ser hechos, está mayormente afectada por variaciones en las condiciones atmosféricas, polución, niebla, capas de nubes y algunos factores más. Estos factores en general, sirven para reducir la componente directa por absorción y dispersión, pero la dispersión puede realzar la componente difusa considerablemente. Con un cielo completamente nublado, por ejemplo, toda la radiación que alcanza la superficie terrestre es difusa.

La mejor forma de obtener los valores que se requieren, hace necesario medir la intensidad sobre largos períodos de tiempo en muchos lugares. Ya un número de estaciones meteorológicas a través del mundo, guardan un continuo registro de la intensidad sobre una superficie horizontal, registrando una cantidad conocida como insolación (Radiación Solar).

1.10 Radiación Solar sobre Planos Inclinados.

En los últimos años la demanda de información por los usuarios de la energía solar ya no se limita solamente a radiación solar sobre una superficie horizontal. Los arquitectos requieren conocer la radiación solar en fachadas situadas en las diferentes orientaciones cardinales.

Los ingenieros requieren no solamente radiación en planos no perpendiculares, sino en planos inclinados con diferente orientación. La solución de este problema geométrico requiere de cierta intuición física, pues la mayor restricción la da el hecho de que la radiación solar, en particular la difusa, no es homogénea ni isotrópica. En consecuencia, al transformar flujos incidentes en superficie horizontal se deberá corregir por isotropía y heterogeneidad del campo de radiación.

El flujo de radiación^{5/} solar sobre una superficie inclinada depende esencialmente del ángulo de inclinación y la orientación como fue mostrado y resuelto por Kondratiev hace algún tiempo. En lo que sigue se verá una versión modificada dada por Coffari.

La irradiancia (W m^{-2}) de la radiación solar directa se calcula para superficies con orientaciones distintas por

^{5/} Ignacio Galindo. Solar Radiation Information for Energy Technologist. pp. 4-5.

$$B'(\beta, \gamma) = I'_m \cos \theta \quad 1.11$$

Donde I'_m es la irradiancia de la radiación solar directa en superficie terrestre sobre una superficie perpendicular a el rayo con una masa óptica m , θ es el ángulo al cual los rayos solares caen sobre una superficie dada.

El coseno de el ángulo de incidencia de los rayos solares se calcula a partir de la ecuación:

$$\cos \theta = \sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \cos \alpha \cos (\gamma_s - \gamma) \quad 1.12$$

Donde α es la elevación solar, β es el ángulo de inclinación de la superficie en relación a el plano horizontal. γ_s y γ son el acimut del sol y del plano, respectivamente. El ángulo de orientación γ está definido como la distancia angular desde el norte verdadero a la proyección de la perpendicular al plano inclinado sobre el plano horizontal. Por ejemplo: Positivo hacia el Oeste y negativo hacia el este. (Ver Fig. 1.7).

La inclinación β de la superficie con respecto al plano horizontal se toma como positivo mirando al sur y negativo hacia el norte.

Obviamente para una superficie horizontal $\beta = 0$ y para una superficie vertical $\beta = -90^\circ$ (Norte). Ya que $\beta = \beta(\phi, \delta, w)$ i. c. ϕ latitud, δ declinación solar y w el

ángulo horario, entonces la expresión (1.11) puede ser evaluada para cualquier superficie $S(\beta, \gamma)$.



CAPITULO II

TECNICAS DE MEDICION DE LA RADIACION SOLAR

2.1 Introducción.

Mediante la radiometría solar se determinan las magnitudes instantáneas o integradas de la radiación solar global, directa, difusa que incide sobre una superficie a distintos ángulos.

Existe una cantidad de dispositivos que miden la intensidad de la radiación solar, cada uno de ellos cumpliendo una función específica.

Se tiene instrumentos que miden la radiación directa, global, la radiación con el lejano infrarrojo, etc; instrumentos para investigación básica o para utilización con fines prácticos.

Tendrán importancia especial en este trabajo, el estudio de las técnicas de medición de radiación solar, utilizando Piranómetros y Pirheliómetros que miden la intensidad de la

radiación solar global y directa, respectivamente.

La información obtenida con estos instrumentos, tiene interés general en distintas áreas, tales como Biología, Medicina, Arquitectura, Ingeniería, Física, etc.

2.2 Radiación Solar. Características Generales.

2.2.1 Características Generales.

- a) Es una forma de energía, que para captarla requiere de superficies relativamente extensas.
- b) Su intensidad es variable. Aunque predecibles dentro de ciertos límites, las variaciones de la radiación solar no son controlables.
- c) Es intermitente. Sólo está disponible en horas del día, y debe contarse con algún sistema de almacenamiento, si se desea aprovecharla en horas de la noche o en días muy nublados.

2.3 Factores que Afectan la Intensidad de la Radiación Solar sobre una Superficie.

En general hay dos que se consideran como fundamentales:

- A. El número de horas-sol.
- B. El ángulo de Incidencia.

- El número de horas-sol, es el tiempo que dura la iluminación solar, expresado en horas.

- El ángulo de Incidencia, se refiere a la elevación solar α .

Cada uno de estos factores depende directamente o indirectamente de condiciones tales como: latitud, configuración orográfica, época del año, nubosidad, altitud, contaminación atmosférica y otros, los cuales se discutieron en el Capítulo I.

2.4 Balance Energético al nivel del Suelo.

Este balance representa la cantidad de energía solar - aprovechable al nivel del suelo, que podríamos designar como radiación útil (Fig. 2.1). Esta radiación solar varía, - tanto de un punto a otro, como de un momento a otro.

De esta radiación solar útil, sólo se aprovecha continuamente menos de un 1% en el proceso de fotosíntesis de - las plantas; el resto, aunque disponible, no es aprovechada por el hombre, salvo en cantidades limitadísimas.

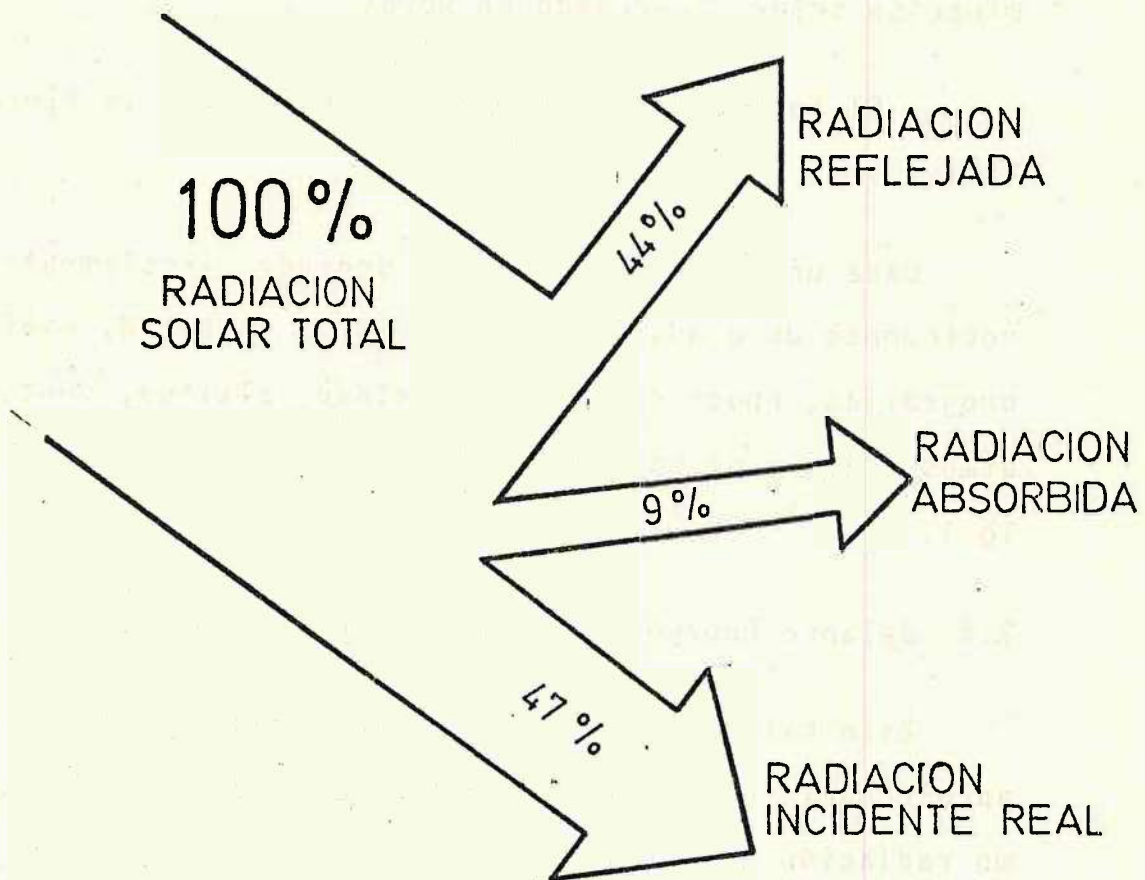


Figura 2.1 Balance Energético.

2.5 Aparatos de Medición.

Entre los instrumentos que miden la radiación solar tenemos:

Para medir las horas-sol: Heliómetro.

Para medir la Radiación Solar Global: Piranómetro.

Para medir la Radiación Solar Directa: Pirheliómetro.

2.6 Mediciones de Radiación Solar Directa y Global.

2.6.1 Pirheliómetros de Incidencia Normal.

Los Pirheliómetros^{1/} de incidencia normal se utilizan para medir la intensidad de la componente directa de la radiación solar global sobre una superficie normal a la dirección de los rayos. Tales mediciones se aplican directamente para enfocar colectores que utilizan solamente la componente directa de la radiación solar. Son también extremadamente útiles para calcular el monto de la radiación solar global disponible, para colectores fijos inclinados, cuando no se tiene disponible mediciones de radiación solar sobre superficies inclinadas.

El Pirheliómetro de incidencia normal consiste de:

1. Un elemento sensor de la radiación.
2. Un tubo colimador.
3. Un mecanismo seguidor del sol.

Un esquema simplificado se muestra en la Fig. 2.2

^{1/} J. E. Kreider y F. Kreith. pp. 2.18-2.21

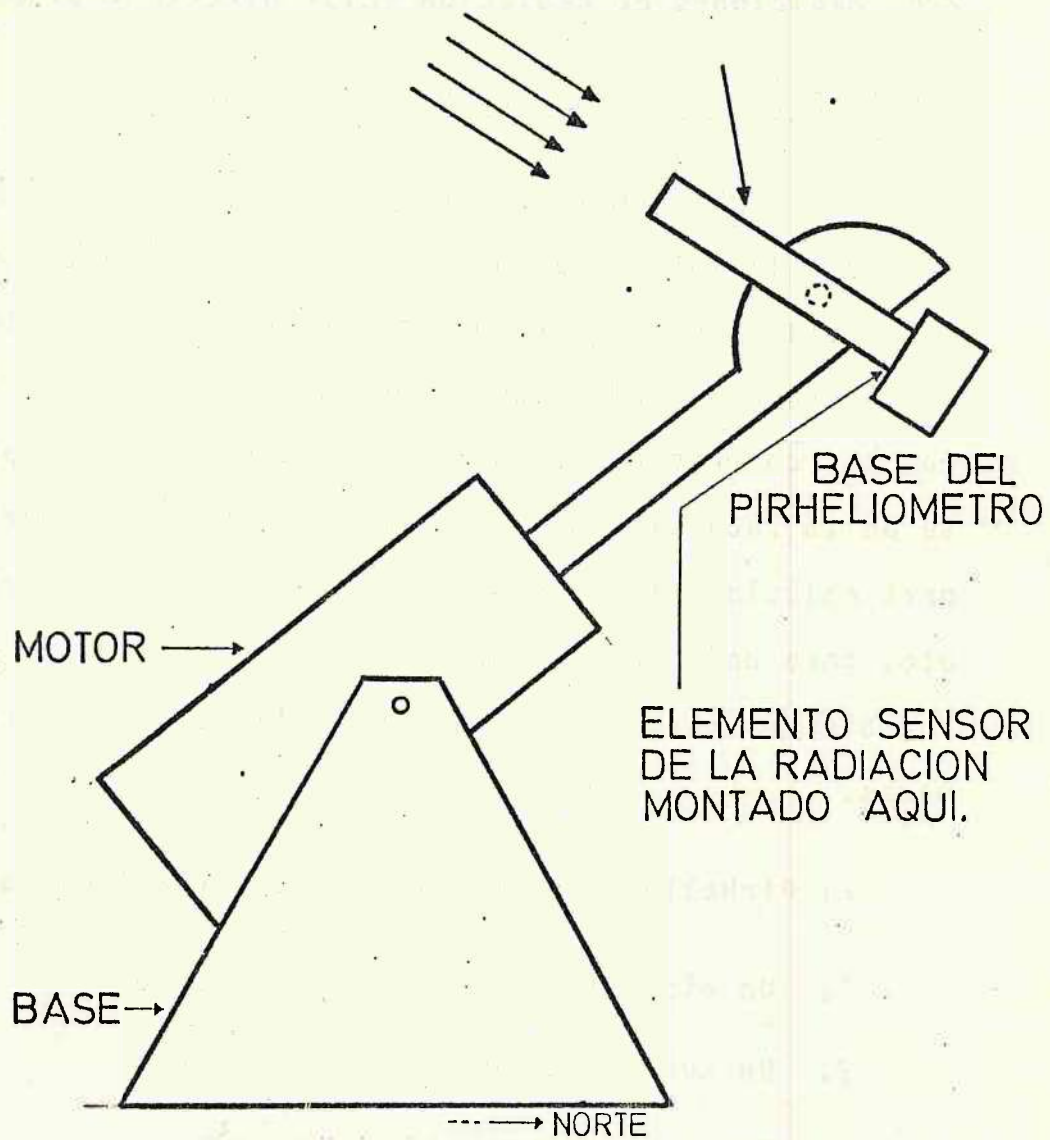


Fig 2.2 Diagrama esquemático de un pirheliómetro de incidencia normal y su montura seguidora del sol.

El tubo colimador sirve para limitar la energía solar que alcanza el sensor de radiación. En la práctica, los pirheliómetros en su mayoría, permiten la entrada de radiación que alcanza a llegar con una apertura de 5.7° , aún cuando el disco solar subtiende un arco de 0.5° . Así que, las mediciones de la "radiación solar directa", usualmente incluye alguna radiación de cielo claro, esta radiación circunsolar representa no más del 5% de la lectura del instrumento. Fig. 2.3.

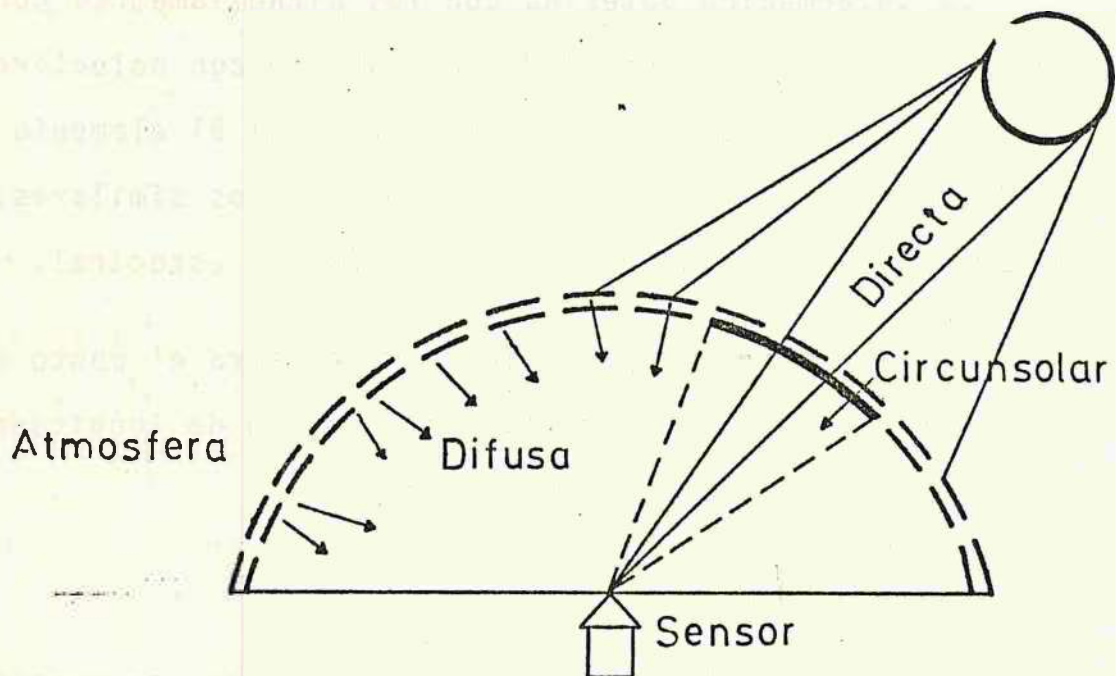


Figura 2.3 Componentes de la Radiación Solar Directa, Difusa y Circunsolar.

El elemento sensor de la radiación es generalmente una termópila o un fotodetector (celda solar). Cada uno tiene sus ventajas de acuerdo a los fines específicos de uso.

El sensor de termópila es un "receptor negro" en el sentido que es igualmente sensitivo a todas las longitudes de onda de la radiación. De manera tal que, las mediciones hechas con un sensor de radiación tipo termópila son útiles para diseñar colectores de energía solar que utilizan receptores que no dependen de la longitud de onda de la radiación solar; esto incluye a todos los colectores solares térmicos.

La información obtenida con los pirheliómetros con fotodetectores es más apropiada para su uso con colectores solares fotovoltaicos. Esto es correcto, si el elemento sensor y el colector son dispositivos fotovoltaicos similares, o sea dispositivos que tienen la misma respuesta espectral.

En este caso, el pirheliómetro registra el monto de energía solar disponible en la misma región de longitudes de onda donde el colector es sensible.

2.6.2 Piranómetro.

El tipo de instrumento que ha sido usado más ampliamente para mediciones de radiación solar global sobre la superficie terrestre es el piranómetro. Mide la radiación global -

incidente con un ángulo $2\pi r$ y es colocado en posición horizontal. En una posición inclinada mide la intensidad de la radiación solar global sobre una superficie inclinada; en este caso, incluye la porción de la radiación difusa de la parte de la tierra que el piranómetro ve.

La importancia de los piranómetros yace en el hecho que la radiación solar global que miden, es del mismo tipo de radiación que incide sobre un colector solar de placas planas.

Los Piranómetros son similares a los Pirheliómetros. Consisten de un elemento sensor bajo una cubierta transparente. (Fig. 2.4).

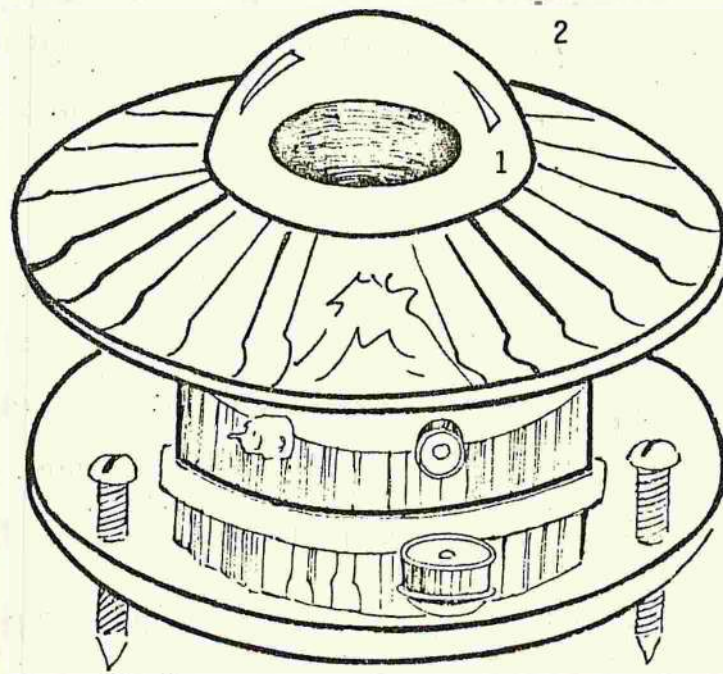


Fig. 2.4 Piranómetro Construido.

1. Elemento Sensor. 2. Cubierta Transparente

CAPITULO III

CALIBRACION DE INSTRUMENTOS DE RADIACION

3.1 Principios Generales de Calibración.

3.1.1 Introducción.

Las mediciones de irradiancia deben de ser confiables, esto sólo se logra si los aparatos de medición están debidamente calibrados.

Esta sección contiene una descripción de la importancia en la determinación de los estándares, la definición de estándar absoluto, y lo que se conoce como proceso de calibración.

3.1.2 Estándar.

En el empleo de los métodos^{1/} para obtener el mejor valor medido, el estándar (patrón) juega un papel preponderante en el proceso de medición y en el factor de confianza

^{1/} David S. Luppold. Precision dc. Measurement Standards pp. 38 - 39.

en el valor resultante. Debido a que es necesario hacer mediciones en muchas de las actividades diarias, la metrología (Ciencia de la Medición) está trabajando a una gran escala. Literalmente esto implica millones de instrumentos, un régimen de medición y estándares con una jerarquía definida que aseguren la validez de las mediciones.

3.1.3 Estándar Absoluto.

En el problema de la determinación de los valores absolutos y contra los cuales el estándar primario de referencia puede ser comparado, surge la cuestión de la fundamentación en el concepto de estándar absoluto.

No existe duda que el valor de un estándar puede ser definido como un número arbitrario, algún objeto estable o un evento físico repetible, pero además la cantidad (física) y sus relaciones con otras cantidades debe ser considerada en la toma de decisiones. Debido a su conveniencia y porque pueden ser medidas con gran precisión, las cantidades de masa, longitud y tiempo han sido definidas arbitrariamente. Las unidades de resistencia, corriente, etc., han sido derivadas de estas cantidades definidas, por una serie de experimentos absolutos, los cuales nos llevan a valores absolutos^{2/}

^{2/} Los resultados de los experimentos han sido llamados valores absolutos porque relacionan las unidades a cantidades definidas.

de resistencia y corriente, etc., exclusivamente en términos de masa, longitud y tiempo.

3.1.4 Proceso de Calibración.

Dándose cuenta de la posibilidad de desviaciones en los valores de los estándares una gran cantidad de naciones han llevado a cabo una continua serie de comparaciones e intercomparaciones de estándares con respecto a un estándar - primario de referencia. Este es un proceso de lo que se conoce como calibración^{3/}.

La calibración absoluta se da cuando se comparan los valores obtenidos con un estándar primario, con los valores de una escala absoluta (Diagrama 1) para garantizar la estabilidad del estándar primario y la confiabilidad de los valores con el obtenido.

Se puede establecer una jerarquía en el proceso de calibración de la siguiente manera. Ver Diagrama N° 1.

^{3/} David S. Luppold. . 2p. Cit. pp.

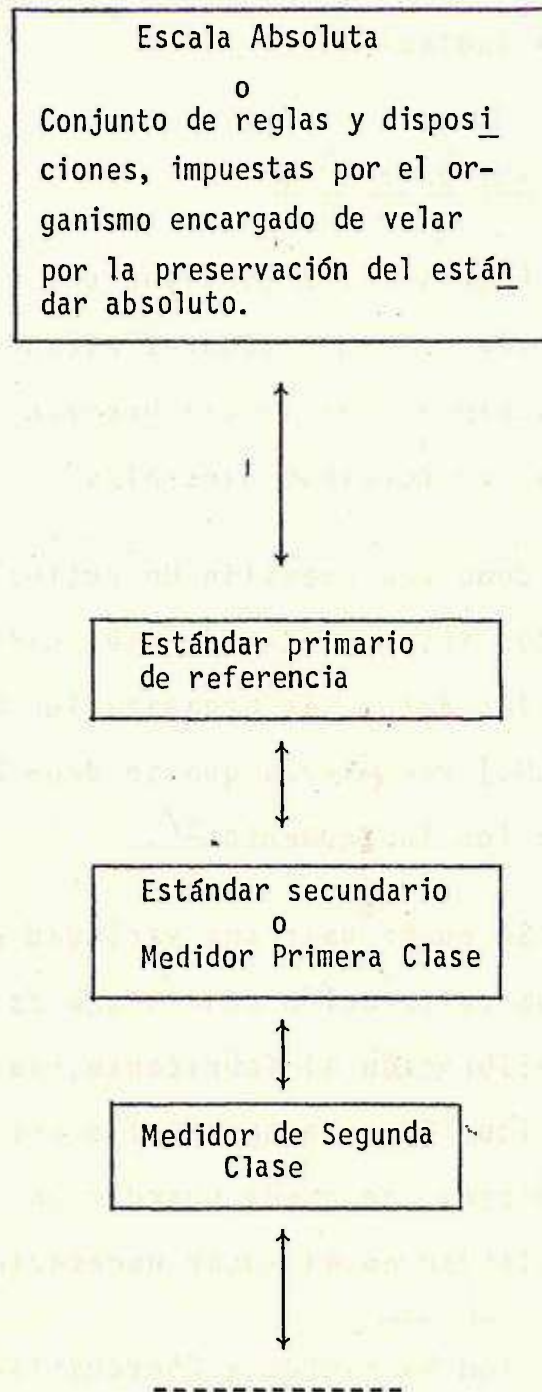


Diagrama N° 1. Jerarquía en el Proceso de Calibración.

3.2 Principios Generales para Calibración de Instrumentos de Radiación.

3.2.1 Introducción.

Esta sección contiene una especificación exacta, clasificación de los medidores estándar de radiación solar, y una descripción de la calibración de pirheliómetros y piranómetros en términos generales.

Como una cuestión de rutina y mantenimiento preventivo de los instrumentos de radiación, a fin de asegurar calidad en los datos, la Organización Meteorológica Mundial -- (O.M. M.) recomienda que se debe hacer una calibración anual de los instrumentos^{4/}.

Se puede usar una variedad de métodos para llevar a cabo una calibración anual, una es enviar el instrumento para recalibración al fabricante, la segunda calibrarlo con una institución gubernamental o privada que se ocupe de ello y por último, se puede guardar un instrumento de referencia para calibrar en el lugar necesario.

^{4/} William Dickinson y Chereminisoff (Ed.) Solar Energy - Technology Handbook Parte A. Pág. 187.

3.2.2 Clasificación de los Equipos de Medición.

La O. M. M. ha establecido^{5/} los límites exactos para cuatro tipos de radiómetros, en este caso para los Pirheliómetros y Piranómetros, con algunos instrumentos como ejemplo tenemos:

A. Pirheliómetros.

1. Pirheliómetro de referencia estándar.

1.1 Pirheliómetro por compensación de Ångstrom.

1.2 Pirheliómetro disco de plata.

1.3 Radiómetro de cavidad.

2. Pirheliómetro de Primera Clase.

2.1 El Pirheliómetro New Eppley.

3. Pirheliómetro de Segunda Clase.

3.1 El Moll Gorezynsky.

B. Piranómetros.

1. Piranómetros de Primera Clase.

1.1 Piranómetro de Termopila Selecta.

^{5/} A. A. Sayigh, Solar Energy Engineering. pp. 415-416.

2. Piranómetro de Segunda Clase.

2.1 Piranómetro Eppley Modelo 8-48.

3. Piranómetro de Tercera Clase.

3.1 Robitzsch bimetalico.

3.2.3 Escala Pirheliométrica Estándar de 1956.

Las primeras mediciones de radiación solar fueron realizadas con instrumentos calibrados contra el pirheliómetro de flujo de agua. El pirheliómetro de flujo de agua de Abbot era esencialmente un calorímetro que medía la insolación absolutamente, midiendo la elevación de la temperatura de un flujo de agua destilada controlado precisamente, el cual -- transporta el calor solar absorbido por un cono metálico ennegrecido, localizado en el fondo de un tubo largo. Aparentemente el uso de este estándar disminuyó con la creciente confianza que se tuvo en el pirheliómetro de disco de plata y en el pirheliómetro de Ångström. Las escalas de radiación de estos dos instrumentos no concordaban debido a pequeños errores sistemáticos.

En 1956 una conferencia internacional de radiación en Davos, Suiza, recomendaba la adopción de una nueva escala, la

escala Pirheliométrica internacional (IPS), 1956. Se concluyó que las mediciones hechas de acuerdo a la escala - Smithsoniana (Pirheliómetro disco de plata), de 1913, deberían reducirse en 2.0% mientras que las mediciones hechas con la escala Ångström en 1899 debería ser incrementadas - por 1.5%. (Ver Machado, 1982 para una discusión más detallada).

En 1970 en la tercera comparación internacional de - pirheliómetros organizada por la O.M.M. en el Observatorio de Davos en Suiza, dos nuevos radiómetros fueron introducidos por Kendall y Bridahl (1970) y Gersh (1971).

Ambos instrumentos usan un recipiente tipo cavidad y son calibrados por substitución de potencia eléctrica.

Al comparar estos dos instrumentos con los 28 Pirheliómetros de compensación Ångström y los tres pirheliómetros Smithsonianos, había una diferencia significativa de $1.8 \pm 0.4\%$. Estos datos ilustran el hecho que no se puede tener todavía una escala pirheliométrica absoluta.

3.2.4 Estándar Piranométrico Internacional.

La O.M.M. ha llevado a cabo algunas intercomparaciones entre pirheliómetros estándar nacionales e internacional

les, pero no ha llevado a cabo similares intercomparaciones entre Piranómetros estándar. Fué hasta hace poco en 1971 - que se llevó a cabo una intercomparación entre Piranómetros estándar bajo la dirección de la Sociedad internacional de energía solar (ISES). Los resultados de estas comparaciones de 21 piranómetros estándar en operación, provenientes de institutos meteorológicos a través del mundo son detallados por The Kaekara (1972).

El mayor problema a ser resuelto era la selección de el estándar a ser adoptado y contra el cual los piranómetros deberían ser comparados.

"Fué sobre la base del conocimiento de la estabilidad de las relaciones entre los piranómetros estándar de el Laboratorio Eppley, el USA National Weather Services (NWS) y el Canadian Atmospheric Environmental Service... que se acordó recomendar la adopción de una media Norte Americana".

Este valor fué el promedio de tres piranómetros específicos que fueron manufacturados por los laboratorios Eppley y eran de tipo similar.

Como en los pirheliómetros, todavía falta mucha investigación a fin de desarrollar un piranómetro absoluto.

3.2.5 Instrumentos Estándar.^{6/}

El instrumento primario estándar para la calibración de instrumentos de radiación solar es el radiómetro absoluto. Algunas versiones de este instrumento son el PACRAD - (Kendall y Berdahl, 1970), el ACR (Willson, 1973), el PMO - (Brusa y Frohlich, 1975) y el HF (Laboratorio Eppley, 1977), a los cuales podemos agregar instrumentos absolutos del laboratorio de Física de Japón o el del Instituto Meteorológico Belga (CROM). Estos son pirheliómetros con ángulos de apertura cercanos a los 5°. La precisión de este instrumento, es decir, la habilidad para reproducir la escala de irradiación total ha mostrado ser de $\pm 0.5\%$ (Kendall y Berdahl, 1970; Willson, 1972; WRCP, 1976; y Flowers et al. 1979).

Si no se dispone de un radiómetro, se puede utilizar un pirheliómetro secundario de referencia tal como el instrumento Ångström de compensación, el disco de plata (Smithsonian) (o el Linke Feussner, o un Eppley NIP con compensación por temperatura) siempre que éste haya sido recientemente calibrado (dentro de un año) con un radiómetro absoluto.

La precisión de las calibraciones realizadas con un pirheliómetro secundario de referencia dependerá de la pre -

6/ O.M.M. Meteorological Aspects of the utilization of Solar Radiation as an energy source.

cisión de este instrumento.

Actualmente, no se dispone de un radiómetro absoluto con un campo de visión de 180° que sirva como piranómetro - estándar.

3.2.6 Calibración Pirheliométrica.

La calibración de los pirheliómetros secundarios de referencia o pirheliómetros de rutina se hace mediante comparación directa con un radiómetro absoluto.

Las mediciones simultáneas con el instrumento estándar y el de prueba deberán hacerse por períodos de dos a tres horas diariamente durante dos o tres días. Las lecturas del voltaje de salida del instrumento de prueba y la radiación del instrumento estándar deberán hacerse cada $1/2$ ó 1 minuto. Dividiendo el voltaje entre la radiación medida se obtiene el valor de calibración del instrumento de prueba. Los datos deberán colectarse en segmentos de 10 a 30 minutos, promediados para cada día, los promedios diarios deberán, a su vez, ser promediados para obtener el valor final de calibración. Los segmentos de tiempos menores proveerán datos sobre la variabilidad de la calibración.

Si el pirheliómetro en comparación no tiene ángulos

de aperturas similares, el efecto de la turbiedad atmosférica introducirá errores en la calibración (para evaluación de este efecto, ver Ångström y Rodhe, 1966).

Si el pirheliómetro de prueba es del tipo de celda solar, deberán realizarse comparaciones con ángulos de elevación de 30°. Esto es para asegurar la variación en la sensibilidad de la celda solar al cambiar la calidad espectral de la luz solar al incrementarse el camino óptico.

En un centro, en donde se realizan calibraciones regularmente, es recomendable mantener un grupo de dos o tres pirheliómetros secundarios los cuales se incluirán en cada calibración. Estos servirán como controles para detectar alguna inestabilidad o irregularidad en el instrumento estándar.

3.2.7 Calibración Piranométrica.

Debido a que hoy en día no se dispone de un piranómetro absoluto, mediante un proceso de selección, basado en calibraciones con sombreado y pruebas de laboratorio, deberá seleccionarse un piranómetro de referencia. Las pruebas de laboratorio se refieren principalmente a la respuesta a la temperatura y la respuesta cosenoidal. Un piranómetro

tro de referencia deberá ser preferiblemente aquél de termopila totalmente ennegrecida con un error por temperatura despreciable y un error pequeño en la respuesta cosenoidal.

En el método de calibración del piranómetro de referencia mediante la transferencia de la calibración por sombreado, de un radiómetro absoluto, se realizan mediciones simultáneas con el piranómetro y el radiómetro absoluto o un pirheliómetro constante de calibración conocida. En intervalos regulares se interpone un disco entre el sol y el piranómetro. La geometría de la sombra deberá tal que subtienda un ángulo cercano a los 5° con el piranómetro; por ejemplo, un disco con 87 mm. mantenido a 1 m. del piranómetro. El valor de la componente vertical de la radiación directa se obtiene con el piranómetro formando la diferencia con mediciones separadas de la radiación global (directa+ difusa) y la difusa. El valor (en unidades de voltaje) de la componente vertical medido por el piranómetro se divide por el valor de la componente vertical de radiación obtenida del radiómetro absoluto, es decir, la directa multiplica por el seno de el ángulo de la elevación solar. Las calibraciones con sombreador deberán efectuarse para una variedad de alturas solares con objeto de determinar la sensibilidad instrumental con relación a este parámetro. Durante la calibración,

deberá operarse también un segundo piranómetro no sombreado, éste medirá la radiación global. Con objeto de estimar la porción del voltaje que hubiera registrado el sensor a prueba, se harán las razones de los voltajes de los dos piranómetros. Esto último es necesario pues el tiempo de sombreado para piranómetros termoeléctricos es de 4 - 5' y la recuperación total requiere de 2 - 3'.

Las calibraciones con sombreado se recomiendan únicamente para piranómetros de referencia. La calibración de piranómetros de rutina se hace por comparación con el piranómetro de referencia. No es recomendable hacer calibraciones con sombreado para instrumentos cuya sensibilidad dependa de la longitud de onda.

3.2.8 Calibración por Comparación con un Piranómetro de Referencia.

Como todos los instrumentos de medición, los instrumentos de radiación deben ser calibrados inicialmente, y ser chequeados regularmente.

La calibración y el control deberían, por supuesto, cubrir la unidad completa de radiación. (Sensor e integrador o registrador) bajo las condiciones actuales de operación. Fuera de un examen del método a ser utilizado para

controlar los instrumentos de medición eléctrica, parece a apropiado darle énfasis a la posible importancia del efecto que puedan presentar sobre las mediciones, los conductores que conectan el sensor al milivoltímetro.

En esta unidad, solamente consideraremos la calibración del sensor de radiación conocido como piranómetro.

La técnica de calibración piranométrica preferida actualmente está basada en comparaciones llevadas a cabo en el exterior (en el campo). En este procedimiento el instrumento bajo prueba y el de referencia son operados al mismo tiempo por un período de aproximadamente dos semanas en el mismo lugar. Los valores de calibración diarios para el instrumento a prueba se obtienen usando el período completo de la luz diaria; el valor final de la calibración es el promedio de los valores diarios. Días con períodos prolongados de lluvia, nieve o bajo nubosidad no se incluyen en el promedio final.

El promedio final, representa, sin embargo una variedad de condiciones para cielo claro y nublado, dichas condiciones serán probablemente comparables a aquellas bajo las cuales el instrumento será usado. Un piranómetro con termopila completamente elegida y de primera clase (un -

Eppley modelo PSP) sirve como instrumento de referencia, incluyendo otros piranómetros en todas las calibraciones, que sirvan como control para detectar cambios en los instrumentos de referencia.

El uso de piranómetros de control se recomienda en todas las calibraciones de piranómetros aún cuando solamente un piranómetro esté siendo calibrado.

La principal ventaja de el método de calibración exterior, es que todos los tipos de piranómetros están referidos a un instrumento de referencia único (cuya calibración ha sido obtenida directamente a partir de un radiómetro absoluto) bajo condiciones de irradiancia reales. La principal desventaja es que el medio ambiente no está sujeto a control y por consiguiente, las calibraciones incluyen todas las características instrumentales del aparato de referencia y el de prueba, las cuales son influenciadas por el medio ambiente. Por consiguiente, para las calibraciones exteriores, el instrumento de referencia debe tener errores despreciables y deben de conocerse sus características. Para calibraciones tanto interiores como exteriores, las características del instrumento bajo prueba deberían de ser conocidas.

3.3. Calibración en una Red de Estaciones.

Si el piranómetro de la red de estaciones es usado principalmente para las mediciones de irradiación diaria, usar el método anterior sección 3.2.8 ; o sea solamente es necesario comparar (si es posible, en diferentes épocas del año y en días con diferentes nubosidad. Ejemplo: Cielo claro, cielo nublado) con un piranómetro, con características conocidas y de precisión y que tenga un integrador estable y confiable.

La calibración de los instrumentos que forman una red debería hacerse al menos una vez cada dos años o, preferiblemente, una vez al año, y después de que ocurra algún incidente, o aún después de que el instrumento haya sido movido.

La unidad de referencia debe ser también controlada antes y después de cualquier programa de calibración para la red. Es solamente por estos métodos que se pueden llevar a cabo mediciones en la red que sean consistentes y homogéneas, y los cuales sean comparables dentro de un porcentaje (de tres a cinco por ciento en instrumentos con un buen mantenimiento). Como una regla general, cuando los factores de calibración del mismo piranómetro, determinados en dos prue-

bas sucesivas, no difieren en más de un tres por ciento, se puede utilizar el factor previo.

3.4 Calibración Inicial y Control de Rutina.

La mayor parte de los piranómetros son suministrados junto con el certificado de calibración de el fabricante. Sin embargo, en el caso de piranómetros para uso rutinario, se hace necesario comprobar estos valores, solamente para estar seguros que se adaptan a la escala de mediciones provistas por la escala nacional de referencia pirheliométrica en uso en la red de estaciones. En todo caso, el fabricante a menudo lleva a cabo las calibraciones usando fuentes artificiales de luz cuya composición espectral difiere de la radiación solar, y las calibraciones deben ser por consiguiente hechas con precaución.

Así, se recomienda siempre que el factor de calibración de un nuevo instrumento sea controlado, después de instalado y ajustar si es necesario el nivel, pero desecharlo si su sola apariencia indica que no se encuentra en buenas condiciones. (Pintura negra, demasiado brillante o deslustrada; superficie receptora, no plana, etc.).

CAPITULO IV

CARACTERIZACION DEL SOLARIMETRO CONSTRUIDO EN EL DEPARTAMENTO DE FISICA

4.1 Introducción.

4.1.1 Caracterización.

La caracterización de un solarímetro es una de las fases más importantes previas al proceso de medición de radiación solar global, a fin de garantizar una constante de calibración que de validez a las medidas hechas con el instrumento.

La caracterización incluye; la determinación de la constante de calibración, un análisis de la linealidad entre la intensidad de la radiación solar global recibida por el solarímetro y su señal de salida (f.e.m.) en milivoltios, y el cálculo de la constante de tiempo o tiempo de respuesta.

4.1.2 Método de Calibración.

Se utilizó el método de comparación para determinar la constante de calibración del solarímetro " K_A " y su lineali-

dad, analizando los datos por medio de dos técnicas, las -
cuales se describirán a continuación.

A. Técnica de ajuste por el método de mínimos cuadrados^{1/}. A esta técnica le llamaremos T1.

1. Curva de Calibración. Se elaboró una curva de calibración de la f.e.m. de salida del solarímetro a calibrar como función de la irradiancia medida con el piranómetro estándar, ajustando a la mejor recta.
2. Constante de Calibración. La pendiente de esta recta, será el valor más probable de la constante de calibración "K_A". Conocida "K_A" y la f.e.m. generada por el solarímetro, se puede calcular la irradiancia mediante la relación

$$G = \frac{L}{K_A} \quad \text{2/} \quad (4.1)$$

Donde "L" es la lectura en m.v. de la f.e.m. generada por el solarímetro y "G" la irradiancia a calcular.

1/ W. Aldama, A. Valera. Diseño y construcción de un Solarímetro tipo Termopila de alta Eficiencia y Economía. pp. 44-45.

2/ M. Machado, Construcción de un Solarímetro. p. 80.

3. Linealidad. Se determinó mediante el coeficiente de correlación r .^{3/}

B. Técnica de lectura de áreas bajo la Curva de Radiación Global. Esta técnica la llamaremos T2. Se encuentra descrita en la sección 4.3.

4.1.3 Modificaciones al Diseño Original.^{4/}

El Solarímetro construido en el Departamento de Física, fué modificado dos veces posteriormente. A continuación se presenta la nomenclatura que se utilizará para su identificación posterior y las modificaciones respectivas.

1. Solarímetro Original. Al cual se le llamará "Solar 0" es el solarímetro construido en el Departamento de Física, corresponde al diseño original.
2. Primera Modificación. La termopila de hierro constantán de 20 termocuplas del Solar 0, se cambió - por una de cobre constantán de igual calibre y longitud. El cambio de la termopila se debió principalmente a que la de hierro constantán se oxidaba rápidamente debido a la exposición del Solar 0 al medio ambiente. A esta primera modificación se le llamará "Solar 1".

^{3/} Texas Instruments. Calculator Decision Making Source Book. p. 3-4.

^{4/} M. Machado. Op. Cit. pp.52-75.

3. Segunda Modificación. La pintura negra de la superficie del Solar 1 es una mezcla de carbón finamente molido, agua, alcohol y pegamento Borden, se sustituyó por una deposición de negro de ocote.^{5/} La superficie bajo la cual están las puntas frías de la termopila se pintó de blanco.

La ventaja de usar negro de ocote es: fácil aplicación, esto es que el material en combustión despidе humo que se adhiere fácilmente a la superficie en la cual se desea depositarla, grano fino, tiene un pegamento resinoso que permite una buena adherencia, bajo costo y una absorción de aproximadamente 0.95. En cambio, la pintura anterior se deterioraba fácilmente, despegándose de la superficie del sensor. A esta versión se le llamará "Solar 2".

4.1.4 Proceso de Caracterización.

Las tres versiones: Solar 0, Solar 1 y Solar 2 fueron calibrados, utilizando la técnica 1(T1), determinándose la constante de calibración respectiva K_{A0} , K_{A1} , K_{A2} , además - de la linealidad en cada caso.

Como una forma alternativa de determinar K_{A1} se utili-

5/ Ocote. Material Combustible proveniente de una variedad del pino del mismo nombre.

zó la técnica 2 (T2).

La versión Solar 2, fué la única que se caracterizó completamente, esto es, se le determinó su constante de calibración K_{A2} , su linealidad (r) y su constante de tiempo o tiempo de respuesta (τ) sección 4.4. Lo anterior se debió al hecho que, de las versiones Solar 0 y Solar 1, solamente se tenían los registros de radiación solar global, a partir de las cuales no se podía calcular el tiempo de respuesta.

4.1.5 Registro de Gráficas.

Las gráficas de radiación solar global fueron registradas en un trazador de gráficas con función de milivoltímetro Hewlett Packard de 2 canales, modelo 7132A, previamente calibrado. En las gráficas registradas la traza A - corresponderá al Piranómetro estándar y la B al que se construyó.

4.1.6 Equipo Estándar.

Como equipo estándar para calibrar el Solar 0, se utilizó un Piranómetro Eppley, modelo 8-48, número de serie - 19570, con una constante de calibración $K_E = 11.68 \times 10^{-3} \frac{\text{m.v}}{\text{w-m}^{-2}}$.

Para el Solar 1 y el Solar 2 se utilizó un Piranómetro Eppley modelo 8-48, número de serie 23569, con una constante de calibración $K_E = 9.45 \times 10^{-3} \frac{\text{m}\cdot\text{V}}{\text{W}\cdot\text{m}^2}$.

Ambos piranómetros estándares tienen una incertidumbre de $\pm 1\%$ en la lectura de irradiancia en el rango de 0-1400 w/m^2 .

4.2 Caracterización del Solar 0.

4.2.1 Constante de Calibración y Linealidad.

De la versión Solar 0 se determinó la constante de calibración, K_{A0} y la linealidad r , utilizando la técnica 1(T1).

A. Curva de Calibración.

Se utilizaron los datos registrados en la Tabla IV.1 que corresponden a la gráfica de radiación solar global del día 30 de julio de 1982; desde las 8:00 a 11:00 a.m. (Fig. 4.1), para la elaboración de la curva de calibración Fig. 4.2.

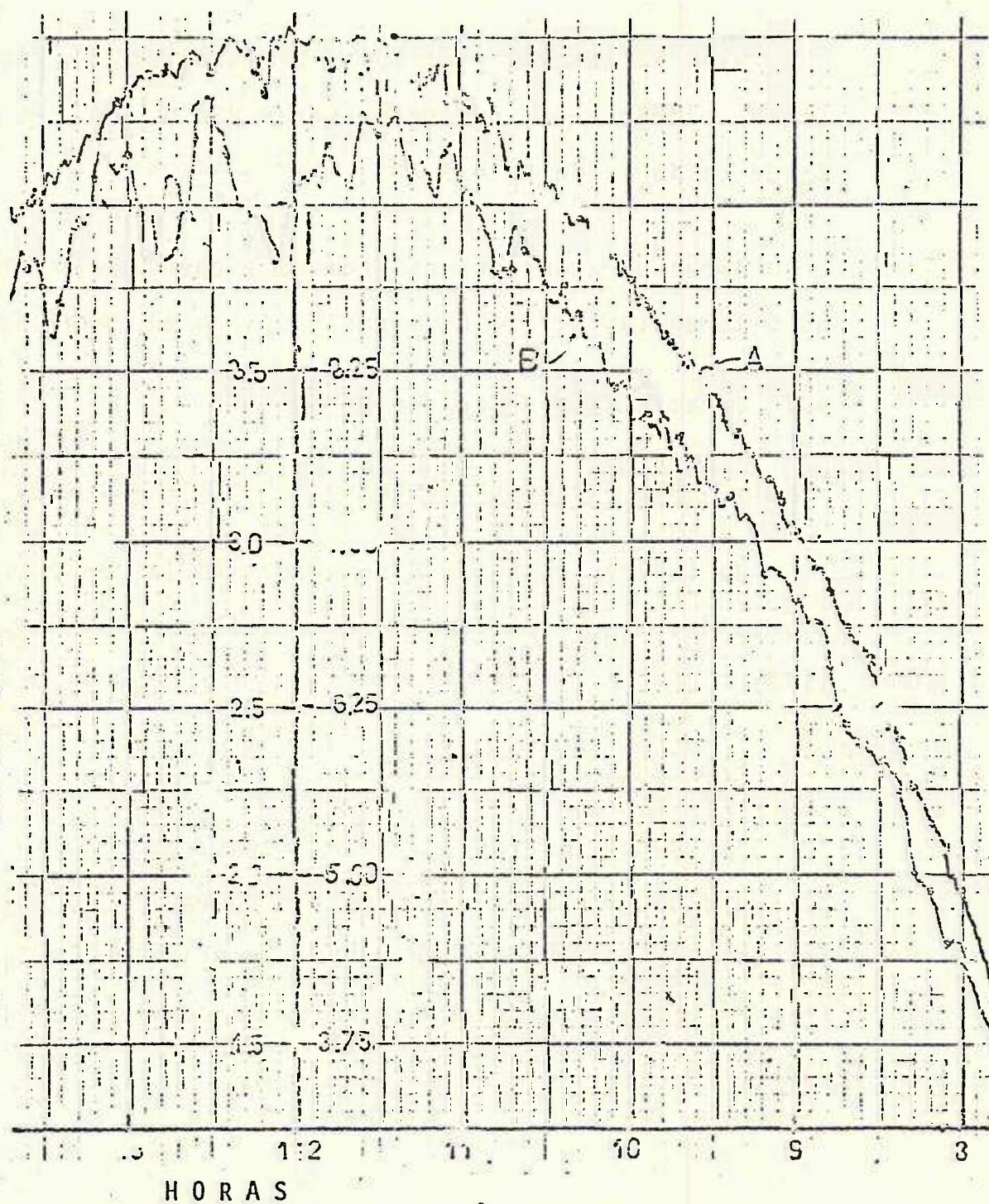


Fig. 4.1 Gráficas de la fem generada por los Pyranómetros, la traza A corresponde al Pyranómetro estándar y la traza B al que se construyó.

Datos tomados el 30 de julio de 1982.

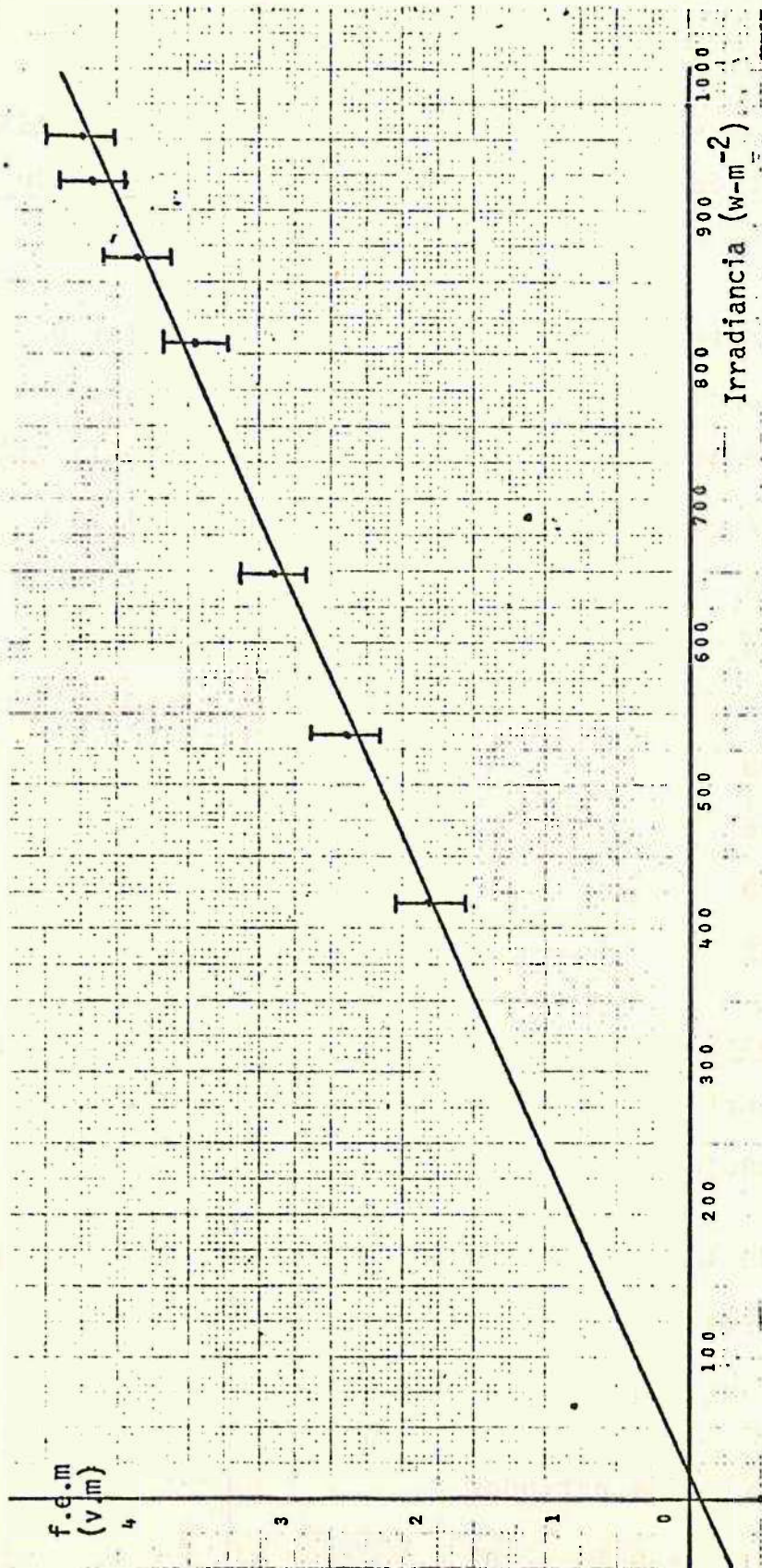


Fig. 4.2 Gráfica obtenida de datos provenientes del Solar 0 y del Eppley. Tomada el día 30 de julio de 1982, 8:00a.m.-12:00m.

$$m_0 = 4.52 \frac{\text{m.v.}}{\text{w-m}^{-2}} \times 10^{-3}$$

$$S_m = 0.10 \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{w-m}^{-2}}$$

$$b = -0.07 \text{ m.v}$$

$$S_b = -0.07 \text{ m.v}$$

$$r = 0.997$$

Tabla IV.1 Valores de Irradiancia y f.e.m, provenientes de mediciones realizadas el 30 de julio de 1982.

Piranómetro Estándar	Solar 0
Irradiancia	f.e.m.
$W\ m^{-2}(\pm 1\%)$	m.v ($\pm 2\%$)
417	1.80
535	2.40
648	2.90
738	3.22
808	3.45
866	3.85
920	4.17
952	4.25

B. Constante de Calibración. " K_A " El valor de la constante de calibración como se dijo antes es la pendiente de la recta.

Así, de la curva de calibración de la Fig. 4.2 la pendiente es igual a

$$M_o = 4.52 \times 10^{-3} \frac{m.v}{W-m^{-2}}$$

la desviación estándar

$$S_m = 0.10 \times 10^{-3} \frac{m.v}{W-m^{-2}} .$$

El error instrumental

$$E_i = 3\%.$$

Siendo entonces el valor de la constante de calibración

$$K_{AO} = M_o \pm \Delta K_{AO}. \quad (4.2)$$

Donde $\Delta K_{AO} = S_M + E_i.$

Al sustituir en la Ecuación 4.2 los valores correspondientes se obtiene la constante de calibración que se buscaba

$$K_{AO} = (4.52 \pm 0.23) \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w-m^{-2}}.$$

C. Linealidad. Para determinar la linealidad se calculó el coeficiente de correlación, siendo:

$$r = 0.997.$$

4.3 Caracterización del Solar 1.

4.3.1 Introducción.

Para la determinación de la constante de calibración del Solar 1, se utilizaron las Técnicas T1 y T2 ya descritas en 4.1.2, la linealidad se determinó utilizando solamente T1.

4.3.2 Determinación de la Constante de Calibración K_{A1} ,
utilizando la Técnica T2.

1. Lectura de las cartas de radiación global de los -
días 27, 28 y 29 de marzo de 1984.

- a. Las gráficas aparecen medidas en intervalos de 1 hora, pero a su vez cada intervalo tiene 10 - divisiones, a cada una de las cuales llamaremos d1.
- b. La ordenada de la gráfica proveniente del solarímetro a prueba tiene un valor máximo de 1.5 m.v. con 100 divisiones, cada una de las cuales la llamaremos d2, o sea $d2 = 0.015 \text{ m.v./división}$.
- c. La escala de la gráfica de radiación global proveniente del Eppley, tiene un máximo de 15 m.v. - con 264 divisiones, o sea a cada división le corresponde 0.056 m.v.
- d. Se calculó el área bajo la curva de radiación solar global por hora, con un programa^{6/} que se detalla en el Anexo 1. Tabulándose los resultados en la Tabla IV.2.

^{6/} Ver Anexo 1.

- e. Con los valores obtenidos de las áreas bajo la curva de radiación solar global por hora, se procedió a encontrar el valor de la constante de calibración K_{A1} mediante la relación^{7/}

$$K_{A1} = K_E \frac{A_1}{A_2} .$$

A1: Area bajo la curva de radiación solar global por hora del Solar 1.

A2: Area bajo la curva de radiación solar global por hora del Eppley.

- f. El valor de la constante de calibración K_{A1} por hora se tabuló en la Tabla IV.3
- g. Se calculó el valor promedio \bar{K}_{A1} y su incertidumbre absoluta.

^{7/} Ver Anexo 2.

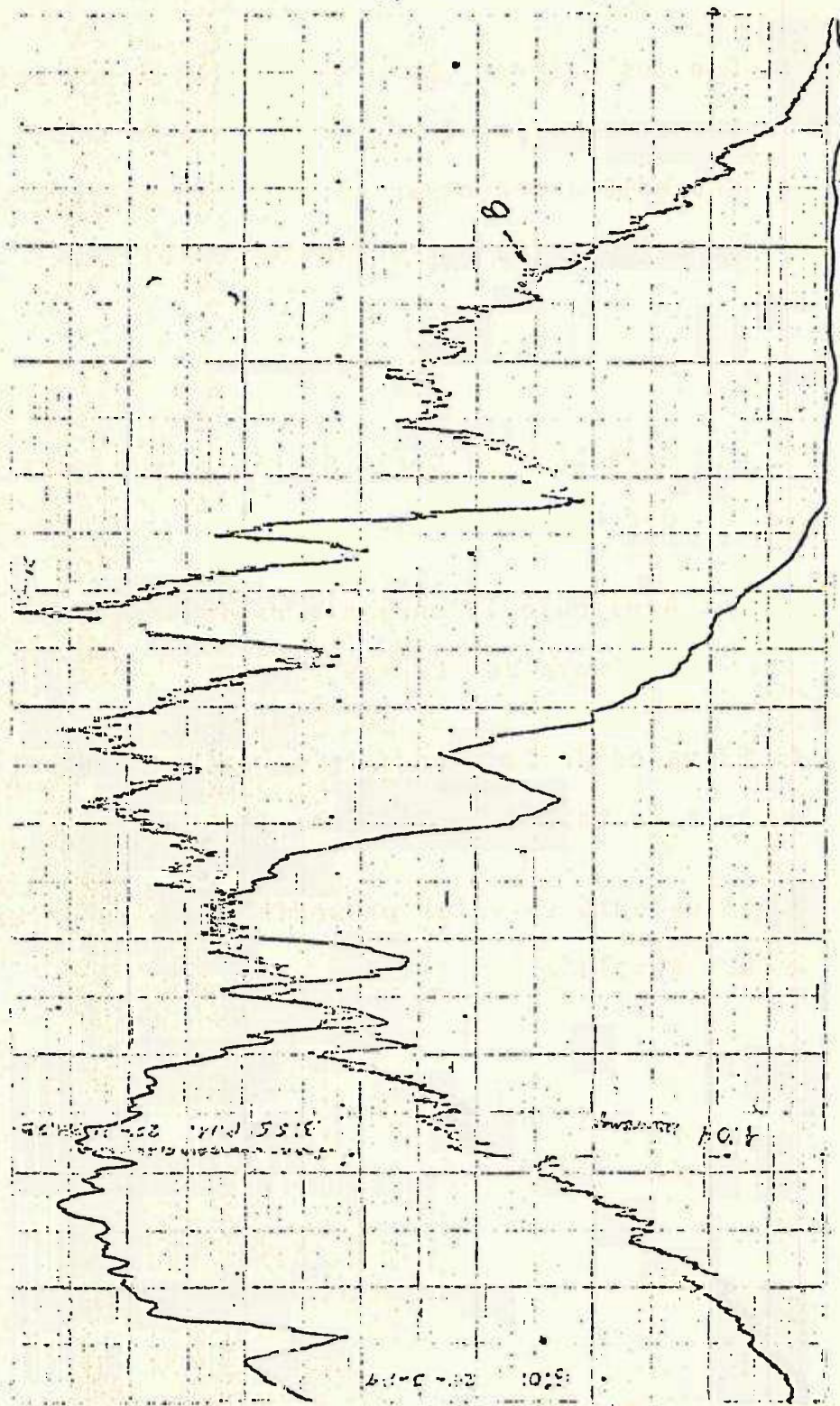


Fig. 4.3 Gráfico de Radiación Solar Global (m.v.) 27-III-84
Prov. del Solarfmetro. 6:00 am-6:00pm.

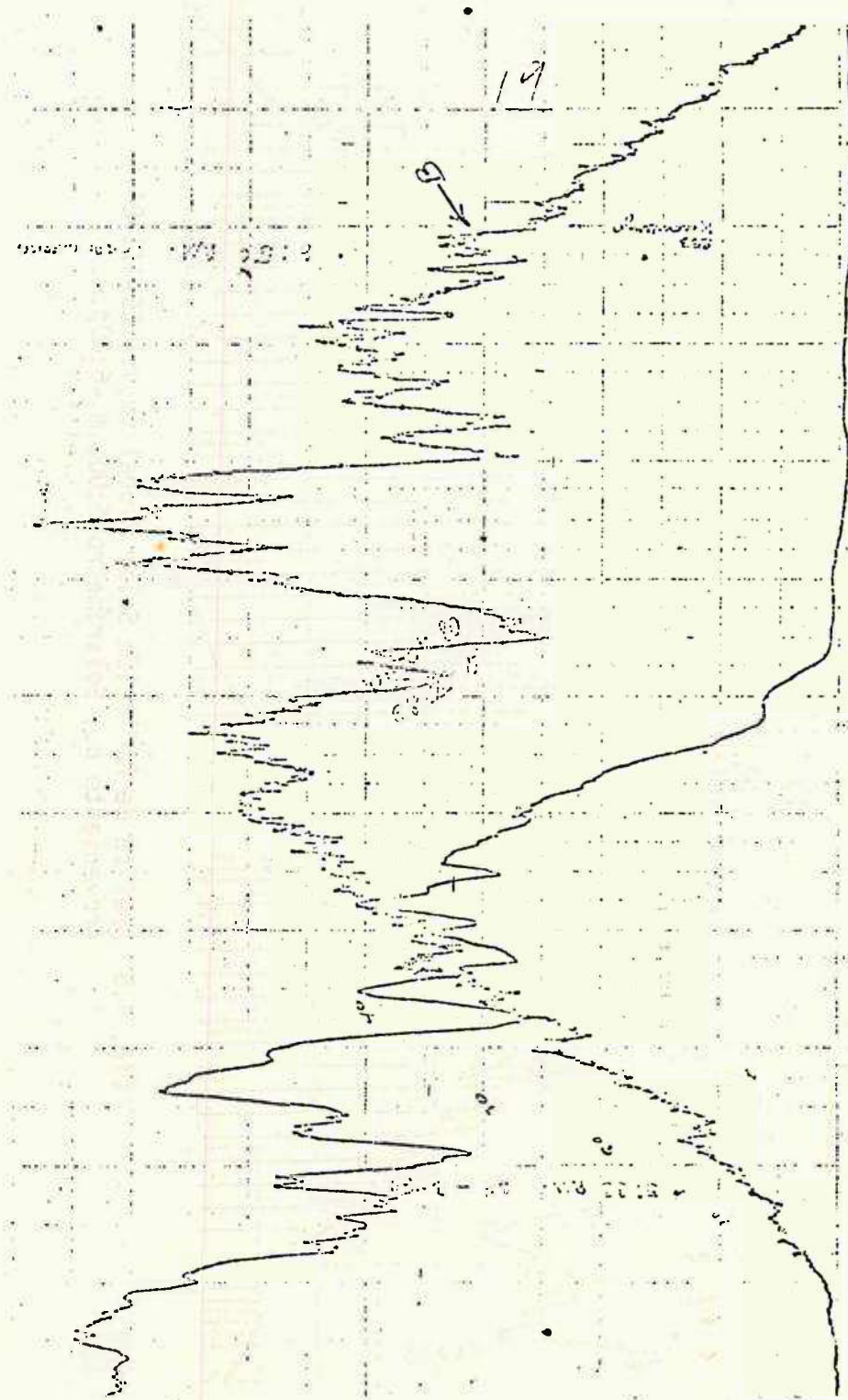


Fig. 4.4 Gráfico de Radiación Solar Global (m.v.) 28-III-84
proveniente del Solarímetro 6:00 a.m.-6:00 p.m.

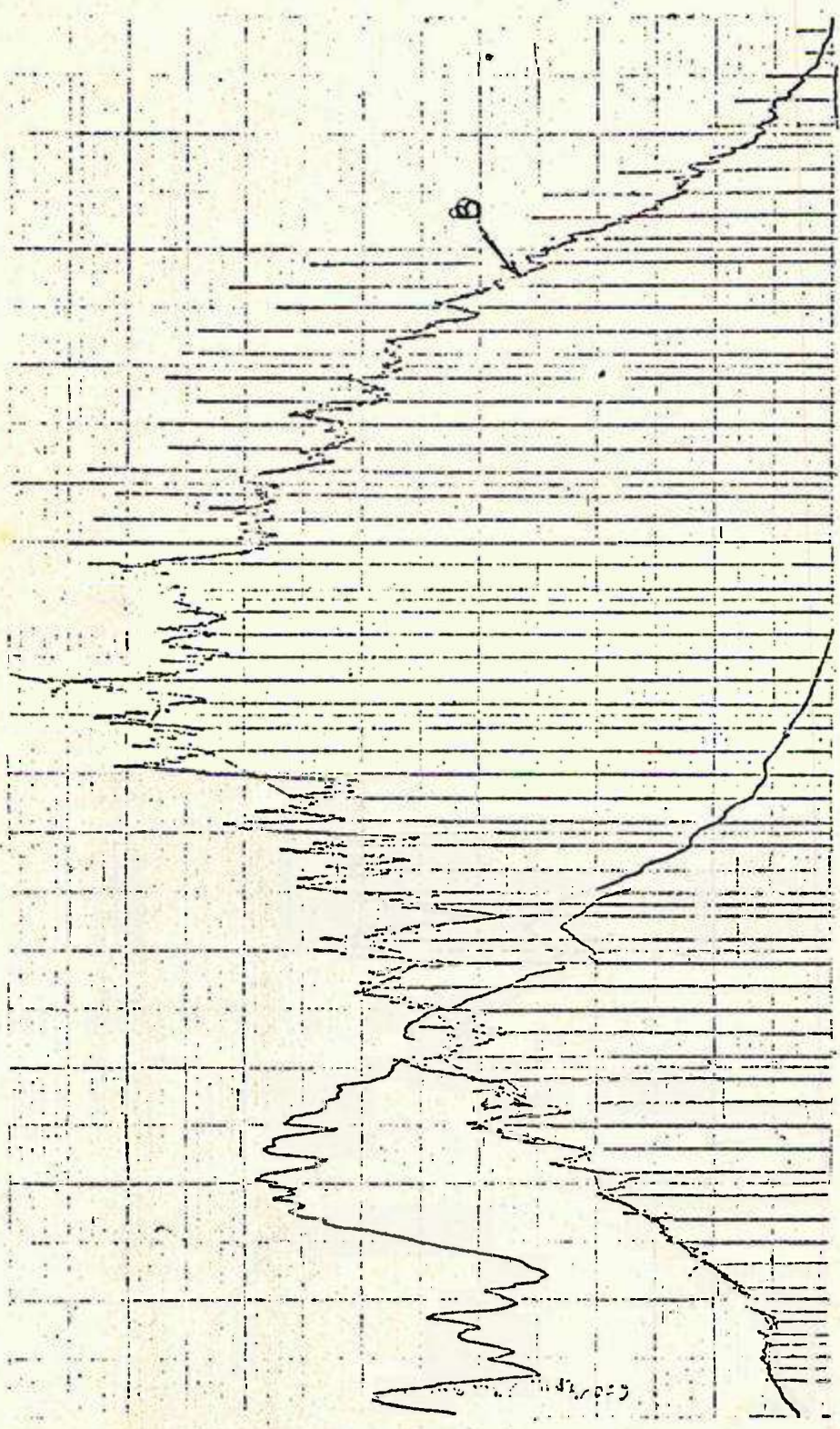


Fig. 4.5 Gráfica de Radiación Solar Global (m.v.) 29-III-84
proveniente a-1 Solarímetro 6:00a.m.-6:00p.m.

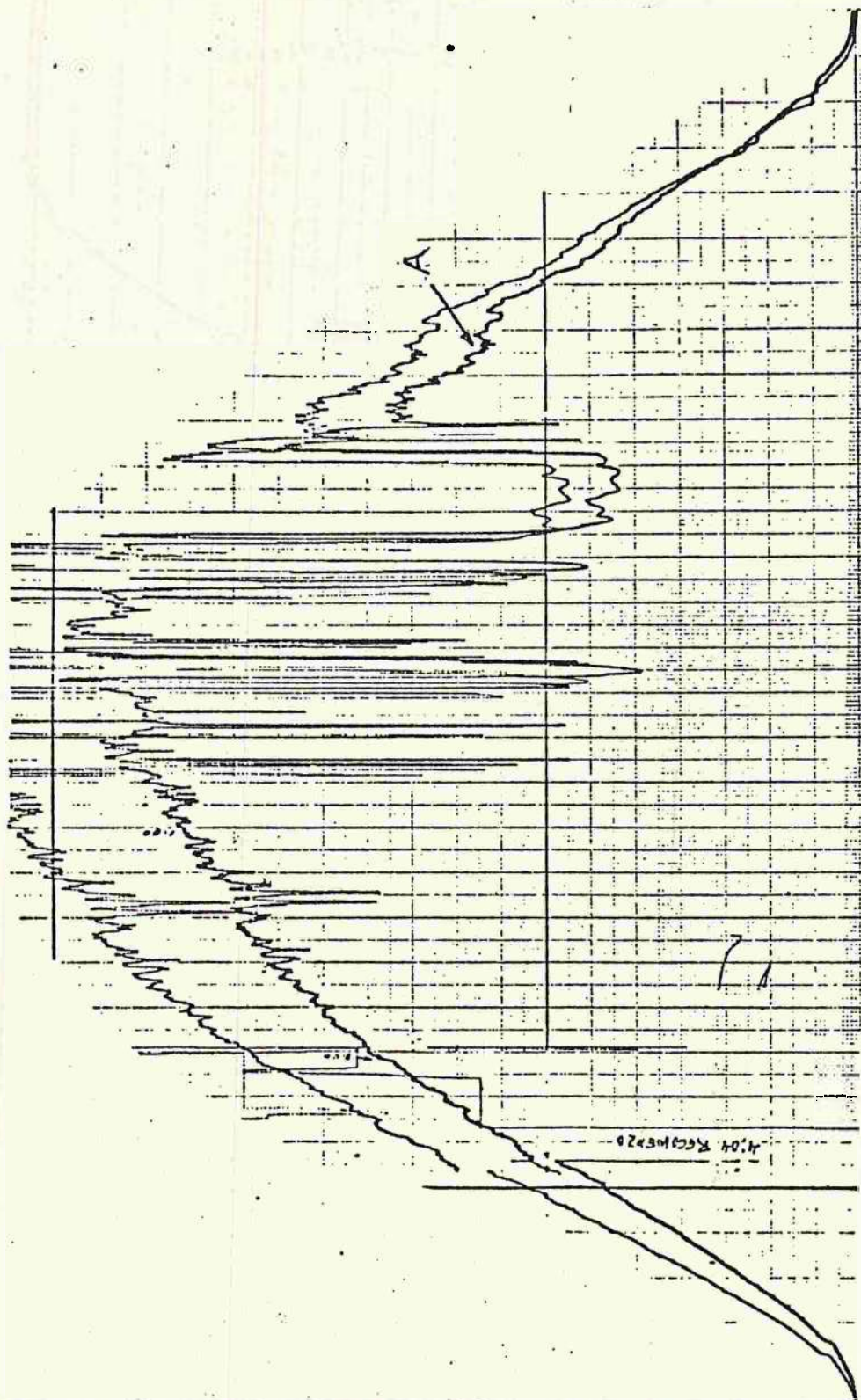


Figura 4.6 Gráfica de Radiación Solar Global (m.v.).
Proveniente Piranómetro Eppley. 27-III-84

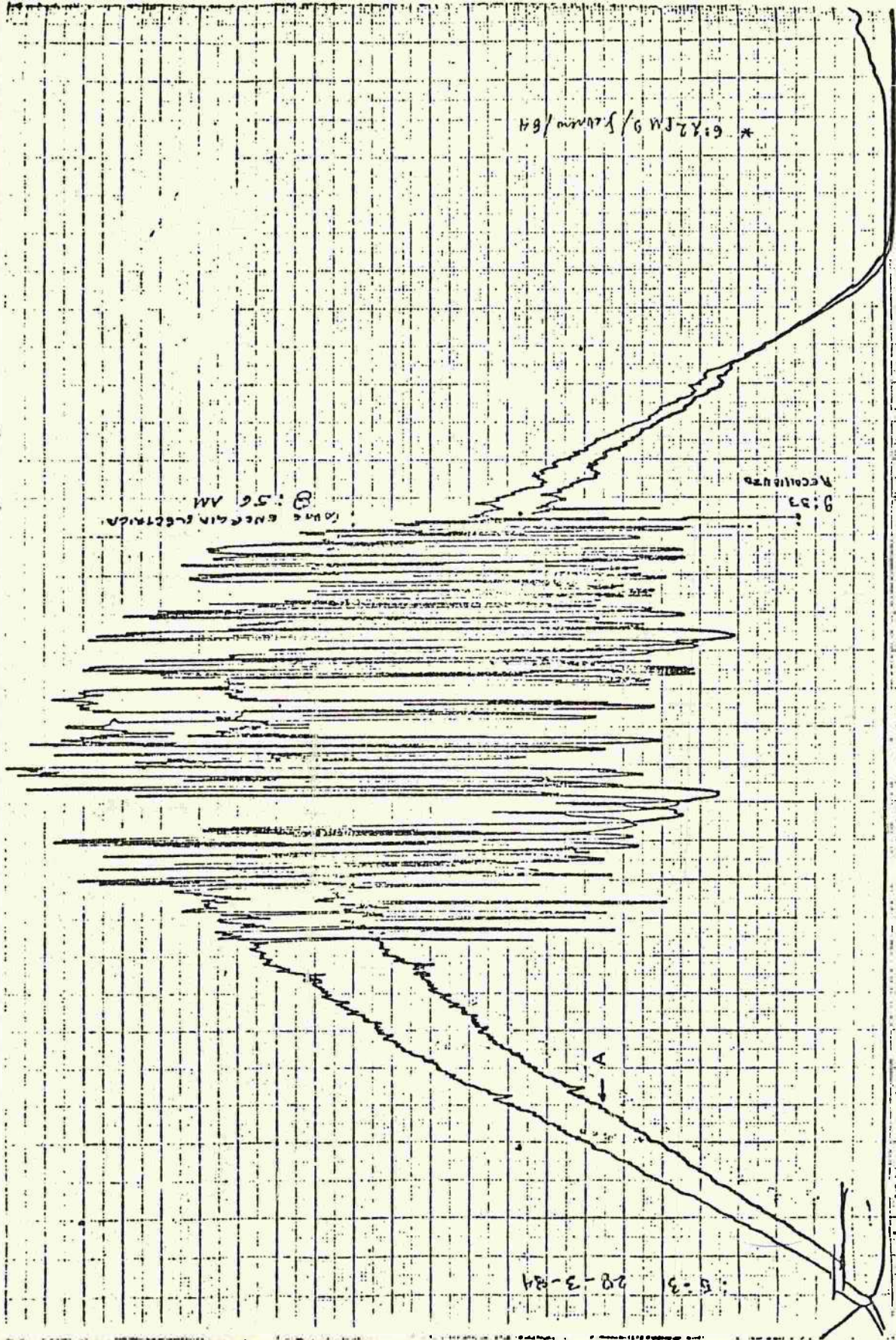


Fig. 4.7 Gráfico de Radiación Solar Global (m.v.).
 Proveniente del Eppley. 28-III-84.
 Hora: 6:00 a.m. - 6:00 p.m.

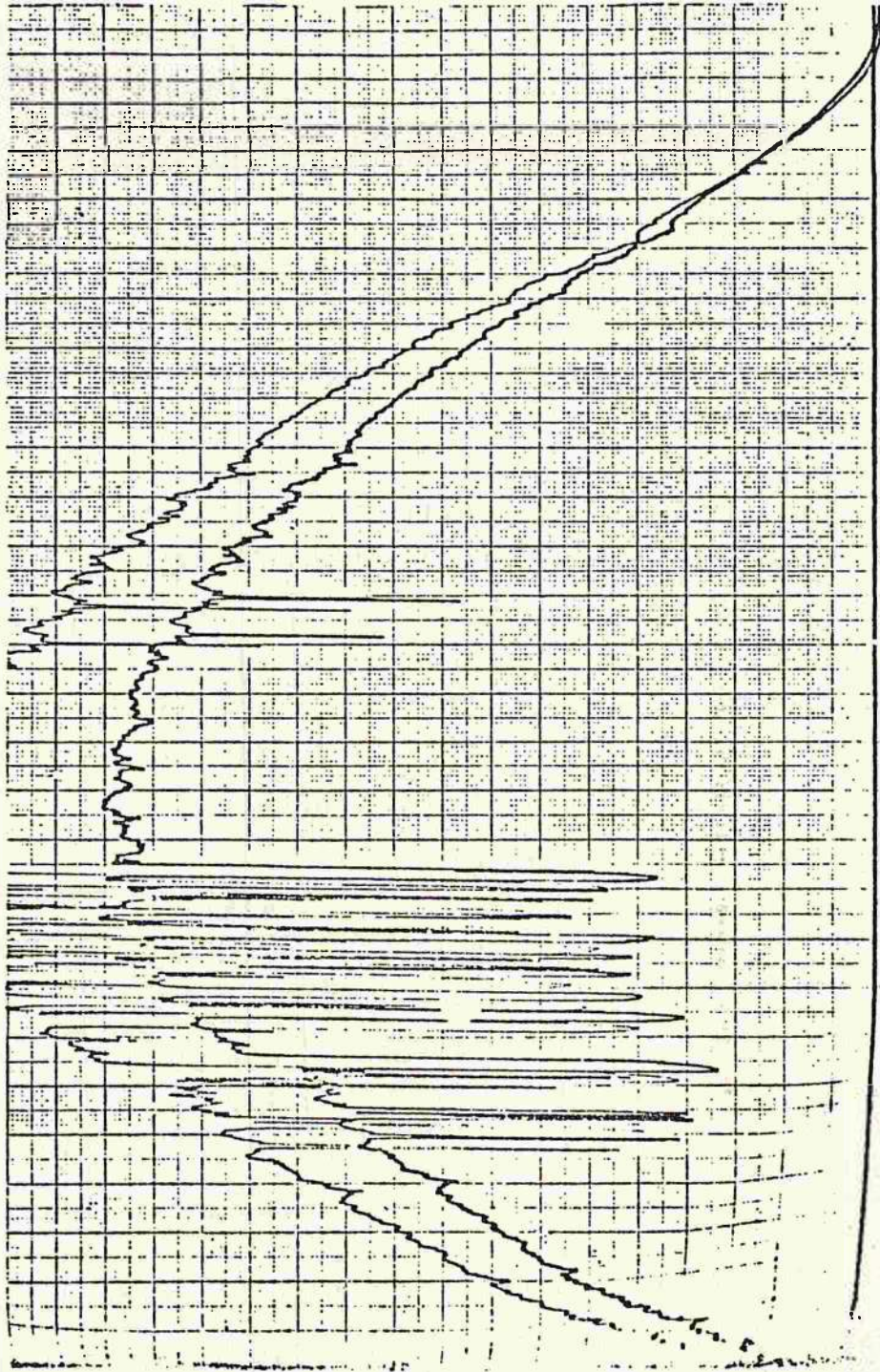


Figura 4.8 Gráfico de Radiación Solar Global (m.v.)
Proveniente del Eppley. 29-III-84. Hora: 6:00 a.m. - 6:00 p.m.

4.3.3 Siguiendo el Método antes descrito se obtuvieron los datos que aparecen en la Tabla IV.1.

Tabla IV.2 Resultados de las Mediciones de Areas bajo las Curvas de Radiación Solar. Fecha 27, 28 y 29 de Marzo/1984

Piranómetro Eppley Modelo 8-48			
Hora	Fecha		
	29-III-84 Area 1(d ²)	28-III-84 Area 2(d ²)	27-III-84 Area 3(d ²)
1:00-2:00 p.m. <u>4/</u>	-	-	556.00
2:00-3:00 p.m. <u>4/</u>	-	451.56	481.96
3:00-4:00 p.m.	322.34	324.09	347.53
4:00-5:00 p.m.	167.38	168.23	199.56
Solarímetro a Prueba (Características no determinadas)			
Hora	Fecha		
	29-III-84 Area 1(mm ²)	28-III-84 Area 2(mm ²)	27-III-84 Area 3(mm ²)
1:00-2:00 p.m.	415.00	455.60	537.80
2:00-3:00 p.m.	361.50	450.65	455.40
3:00-4:00 p.m.	288.10	331.70	(Sin datos)
4:00-5:00 p.m.	166.00	183.10	190.50

4(4)/ En los días en los que no se pudo coleccionar datos, fué debido a que las gráficas para las horas correspondientes, tenían variaciones bruscas, lo que hacía difícil el cálculo del área.

4.3.4 Un resumen de los valores de " K_{A1} " encontrados se muestran en la Tabla IV.3.

Tabla IV.3 Resultado del Cálculo de la Constante de Calibración usando la Técnica de Comparación por Áreas.

Hora	27-III-84	28-III-84	29-III-84
	$K_{A1} \times 10^{-7}$ volts/watts m^{-2} .		
1:00-2:00 p.m.	9.14		
2:00-3:00 p.m.	8.93	9.43	
3:00-4:00 p.m.		9.67	8.44
4:00-5:00 p.m.	9.02	10.28	9.37
Promedio Total			9.3

$$\bar{K}_{A1} = (9.3 \pm 0.8) \times 10^{-7} \frac{\text{volt.}}{\text{watts-m}^{-2}}$$

\bar{K}_{A1} : Constante de Calibración promedio.

4.3.5 Determinación de la Constante de Calibración " K'_{A1} " y de la Linealidad " r'_1 " utilizando la técnica T1.

A. Curva de Calibración. Se utilizaron los datos leídos en los registros de las Figuras 4.4, 4.5, 4.7, 4.8; los cuales se colectaron en la Tabla IV.4. Las curvas de calibración se muestran en las Figuras 4.9 y 4.10.

Tabla IV.4 Registro de los datos de Irradiancia y f.e.m. provenientes del estándar y del Solar 1.

<u>Estándar Irradiancia $W m^{-2} (\pm 1\%)$</u>	<u>Solar 1 f.e.m. m.v. ($\pm 2\%$)</u>	<u>Estándar Irradiancia $W m^{-2} (\pm 1\%)$</u>	<u>Solar 1 Irradiancia $W m^{-2} (\pm 2\%)$</u>
837	0.71	125	0.07
724	0.65	287	0.15
634	0.57	347	0.25
518	0.52	556	0.39
393	0.40	668	0.52
268	0.27	756	0.59
144	0.16	818	0.64
		880	0.75
		949	0.86
		986	0.94

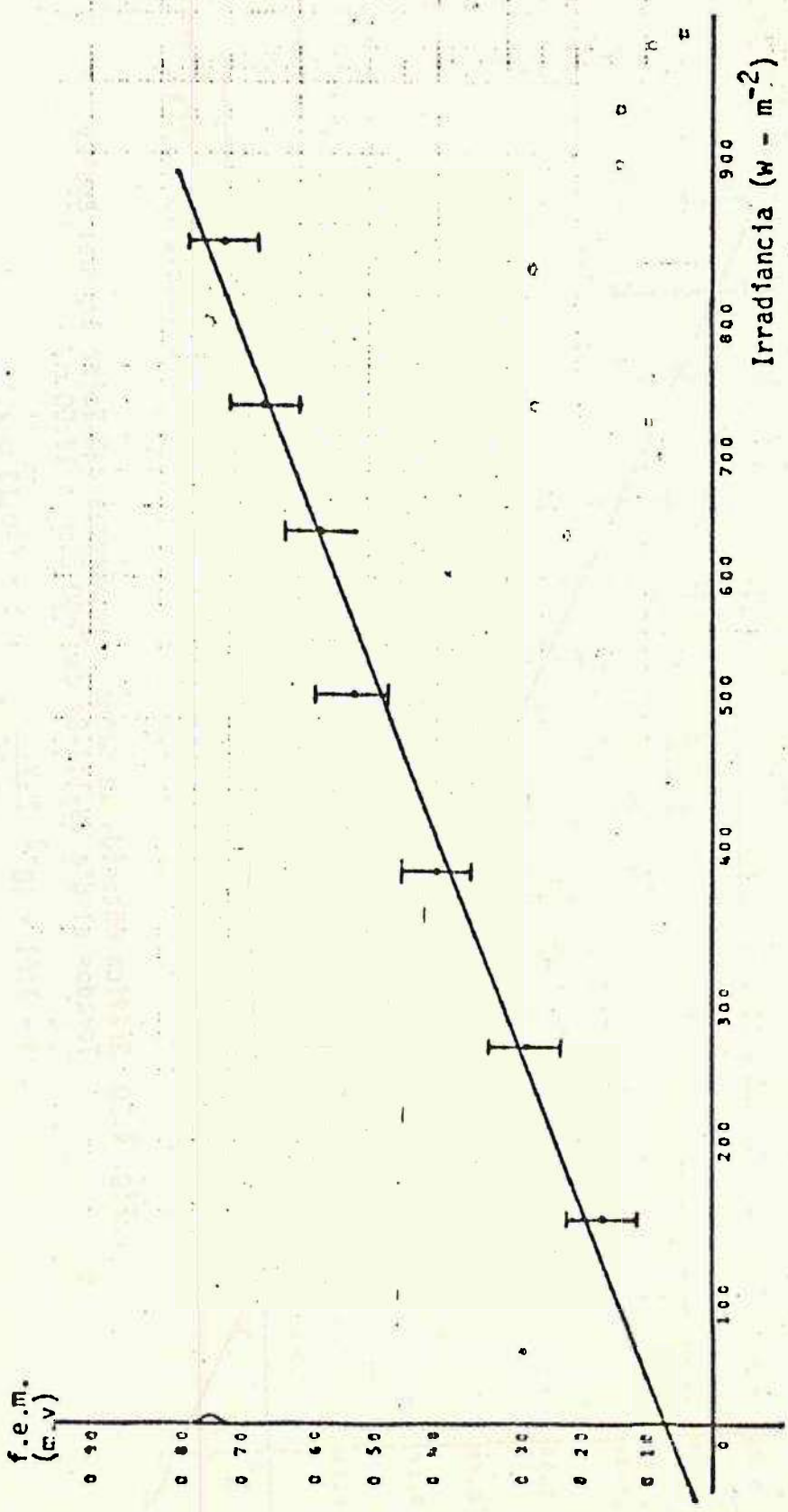


Fig. 4.9 Gráfica obtenida de datos provenientes del Solar 1 y del Eppley. Tomada el día 28-III-84. Hora: 7:00 am-5:00 pm.
 $m = (0.80 \pm 0.03) \times 10^{-3} \frac{m.V.}{W-m^{-2}}$; $b = (0.07 \pm 0.02) m.V.$
 $r = 0.993$

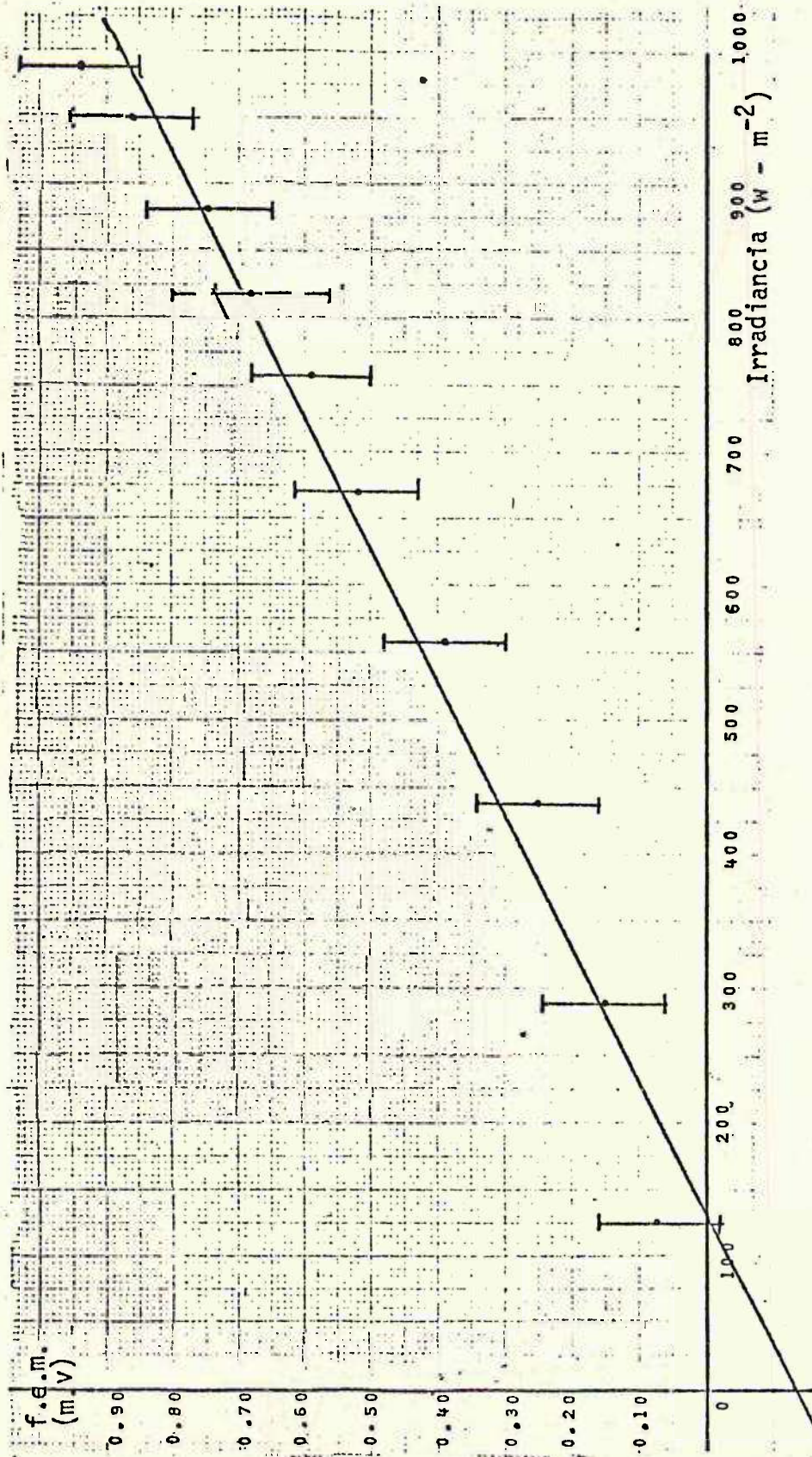


Fig. 4.10 Gráfica obtenida de datos provenientes del Solar 1 y del Eppley. Tomados el día 29-III-84 de 7:00 a.m. a 12:00 m.

$$m = 1.01 \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{W-m}^{-2}} \quad b = (-0.13 \text{ m.v.})$$

$$S_m = 0.06 \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{W-m}^{-2}} \quad S_b = -0.13 \text{ m.v.}$$

B. Constante de Calibración y Linealidad. El valor de las constantes de calibración K'_{A1} y K''_{A1} calculadas para los días 28 y 29 de marzo de 1984, Figuras 4.9, 4.10, se hizo según lo expuesto en 4.2.1, siendo tabulados los datos en la Tabla IV.9.

C. Linealidad. Se calculó para los días 28 y 29 de marzo de 1984. Ver Tabla IV.9.

4.4 Caracterización del Solar 2.

4.4.1 Determinación de la constante de Calibración y la Linealidad bajo condiciones de Laboratorio y de Campo. Utilizando la Técnica T1.

A. Constante de Calibración y Linealidad bajo condiciones de laboratorio.

La caracterización bajo condiciones de laboratorio, tiene la ventaja que puede ser reproducida en igualdad de condiciones, para un control de las características físicas del instrumento, o para detectar los cambios que pueda experimentar como resultado de nuevas modificaciones.

1. Curva de Calibración.

- Se utilizó como fuente de luz un bombillo de 400 w.
- Ambos solarímetros se colocaron horizontalmente.
- La distancia del bombillo a los solarímetros fué de 23.5 cms.
- A fin de obtener distintos valores de la radiación incidente, se varió la corriente a través del circuito por medio de un VARIAC, variando el voltaje de 40 a 80 voltios, obteniéndose los resultados - que se muestran en la Tabla IV. 5.
- La curva de calibración se muestra en la Fig. 4.12.

2. Constante de Calibración y Linealidad.

Se calcularon según lo expuesto en 4.2.1. Ver Tabla IV.9, donde K_{A2} : Constante de calibración bajo condiciones de laboratorio.

B. Constante de calibración y Linealidad bajo condiciones de Campo.

1. Curva de Calibración. Los datos fueron leídos de - las gráficas de radiación solar para los días 21, - 22, 28 de junio de 1984, Figuras 4.13, 4.14 y 4.15.

Los datos se tabularon en las Tablas IV.6, IV.7 y IV.8. Las gráficas de las curvas se muestran en Figuras 4.16, 4.17 y 4.18.

2. Constante de Calibración y Linealidad. El valor más probable por día de la constante de calibración y la linealidad se determinó según lo expuesto en 4.2.1. Los valores se reportan en la Tabla IV.9, donde K_A^1 , K_A^2 , K_A^3 son los valores de las constantes de calibración para los días 21, 22 y 29 de junio, respectivamente.

4.4.2 Determinación de la Constante de Tiempo.

- A. La importancia de la constante de tiempo es que nos da una idea aproximada del tiempo de respuesta del dispositivo, puesto que si se expone el aparato a una radiación constante (igual a la que se determinó para las 12 meridiano) durante un tiempo igual a la constante de tiempo (τ) y luego se suprime toda la radiación; el tiempo necesario para toda la variación (hasta que regrese a la temperatura ambiente) será muy próximo a 2τ .

La constante de tiempo o tiempo de respuesta se define como el tiempo necesario para que la tempera-

tura del disco alcance un 63% de la variación máxima.

B. El tiempo de respuesta se determinó experimentalmente de la siguiente manera:

- Se expuso el solarímetro perpendicularmente a la radiación solar, a las doce meridiano del día 12 de agosto de 1984, su señal de salida se registró en un graficador Hewlett Packard, N° 7132A.
- La curva bajo incidencia se muestra en la Fig. 4.12. *agosto*
- Se verifica^{8/} que la relación entre la señal de salida V (m.v.) y el tiempo t es:

$$V = V_{\text{máx}}(1 - e^{-t/\tau}).$$

- De la Fig. 4.11, $V_{\text{máx}} = 0.97$ m.v. En consecuencia τ es el tiempo transcurrido hasta que el voltaje de salida alcance un valor de $V = 0.97 \times 0.63 \text{ v} = 0.61 \text{ v}$. De la gráfica de la Fig. 4.11 el tiempo transcurrido para que se alcance 0.61 v es de 330 seg. *71*

^{8/} J. Roberto Torres C. Construcción de un Solarímetro blanco-negro (Pyranómetro) pp. 383-386.

Tabla IV.5 Lecturas de Irradiancia y f.e.m. bajo condiciones de Laboratorio.

<u>Lectura Variac. (Voltios)</u>	<u>Lectura Eppley (m.v.)</u>	<u>Eppley W - m⁻² (1%)</u>	<u>Lectura Solar 2 m.v (2%)</u>
43.3	1.30	138	0.17
45.0	1.40	149	0.19
54.7	1.50	159	0.21
56.5	1.90	201	0.24
60.0	2.20	233	0.28
65.7	2.50	264	0.31
75.0	3.20	338	0.40
80.0	3.80	402	0.44

Tabla IV.6 Lecturas de Irradiancia y f.e.m. 21-IV-84 .

Fecha:

<u>Eppley Irradiancia W - m⁻² (1%)</u>	<u>Solarímetro (V.2) f.e.m. m.v (2%)</u>
36	0.15
73	0.17
110	0.21
153	0.25
245	0.34
288	0.43
331	0.42
380	0.50
423	0.54
466	0.62
564	0.70
606	0.75
656	0.80
729	0.90
747	0.89
729	0.88

Tabla IV.7 Lecturas de Irradiancia y f.e.m. 22-VI-84 .

Fecha:

Eppley Irradiancia		Solarímetro v.2 f.e.m.		Eppley Irradiancia		Solarímetro v.2 f.e.m.	
W - m ⁻² 1%		m.v (2%)		W - m ⁻² (1%)		m.v (2%)	
889		0.05		582		0.62	
119		0.08		625		0.71	
165		0.12		665		0.74	
220		0.16		698		0.86	
257		0.20		726		0.88	
315		0.23		760		0.94	
356		0.30		809		0.97	
393		0.38		821		0.94	
448		0.45		845		1.00	
490		0.49		876		1.08	
533		0.55		925		1.10	
				938		1.21	

Tabla IV.8 Lecturas de Irradiancia f.e.m. 28-VI-84.

Fecha:

<u>Eppley Irradiancia $W - m^{-2}(1\%)$</u>	<u>Solarímetro f.e.m. m.v (2%)</u>	<u>Eppley Irradiancia $W - m^{-2}(1\%)$</u>	<u>Solarímetro v.2 f.e.m. m.v (2%)</u>
24.3	0.03	551	0.61
42.3	0.05	564	0.66
55.0	0.06	601	0.71
85.7	0.10	674	0.74
116	0.12	717	0.76
159	0.15	748	0.83
202	0.19	784	0.88
289	0.26	809	0.93
312	0.34	834	0.98
448	0.45	913	1.05
496	0.55	944	1.05
		913	1.22

4.5 Presentación de los Valores calculados de las constantes de calibración del Solarfmetro en sus diversas versiones.

Tabla IV.9 Resultado Final del Proceso de Caracterización.

Hora	Fecha	Versión	Constante de Calibrac. $\frac{m \cdot V}{W \cdot m^2}$	Incertidumbre %	Const. Calib. Promedio	Factor Correlac.
8:00-11:30 a.m.	30-VIII-82	K _{A0}	4.52 x 10 ⁻³	5.2	4.52x10 ⁻³	- 0.997
1:00-5:00 p.m.	27- III-84	K _{A1}		8.4	0.93x10 ⁻³	
	28- III-84					
	29- III-84					
2:00-5:00 p.m.	28- III-84	K _{A1} ⁱ	0.8 x 10 ⁻³	6.2	0.90x10 ⁻³	- 0.993
7:00-12:00 m.	29- III-84	K _{A1} ⁱⁱ	1.01x 10 ⁻³	8.9		- 0.998
		K _{A2}	1.03x 10 ⁻³	8.8		- 0.996
		K _{A2} ⁱ	1.08x 10 ⁻³	4		- 0.998
2:00-6:00 p.m.	21- VI-84	K _{A2} ⁱⁱ	1.35x 10 ⁻³	5.9	1.19x10 ⁻³	- 0.993
6:00-11:00 a.m.	22- VI-84	K _{A2} ⁱⁱⁱ	1.15x 10 ⁻³	6.1		- 0.997
6:00-11:00 a.m.	28- VI-84	K _{A2} ⁱⁱⁱⁱ				

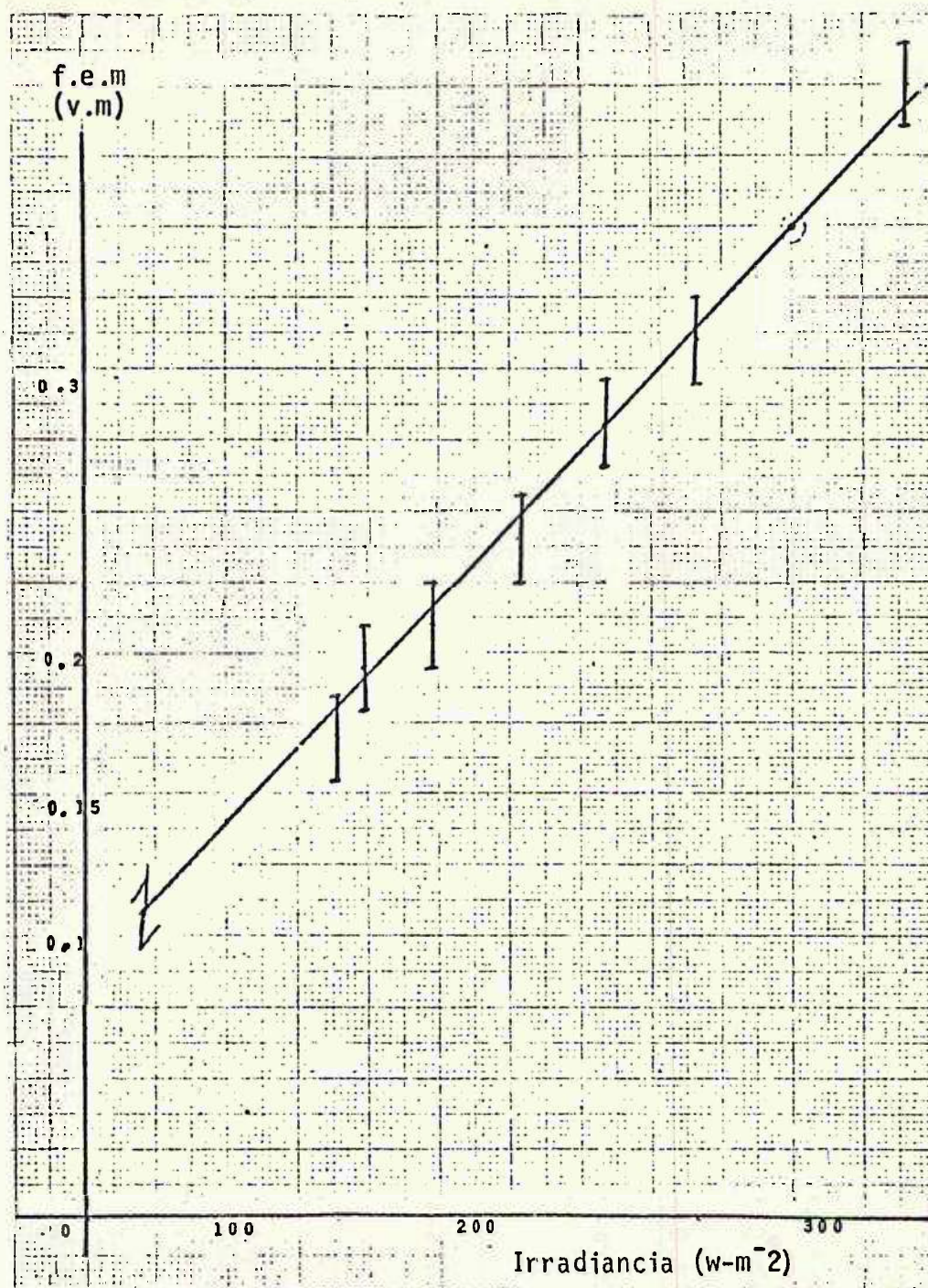


Fig. 4.11 Curva de Calibración obtenida bajo condiciones de Laboratorio.

Solarímetro construido en el Depto. de Física.

$$m = (1.03 \pm 0.06) \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{w-m}^{-2}}$$

$$S_y = \pm 0.02 \text{ m.v.}$$

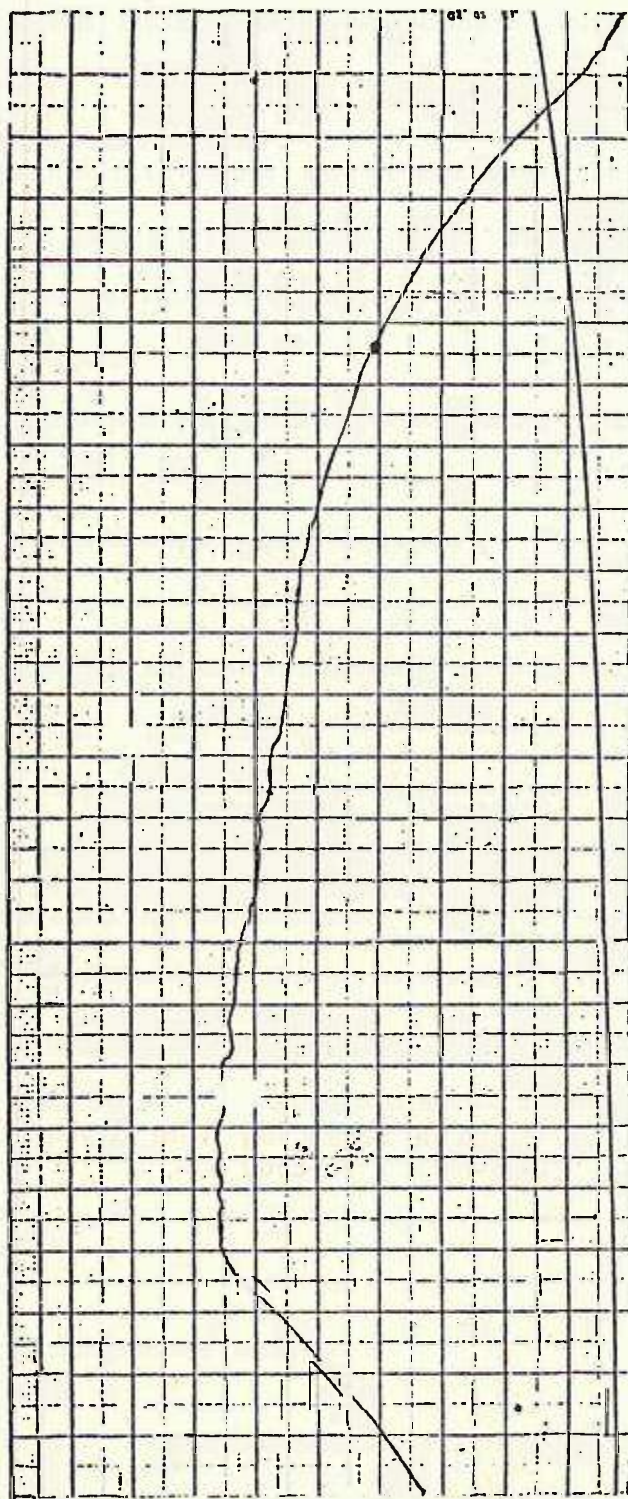


Fig. 4.12 Curva de radiación solar obtenida a las 12 m. para la determinación de la constante de tiempo τ .

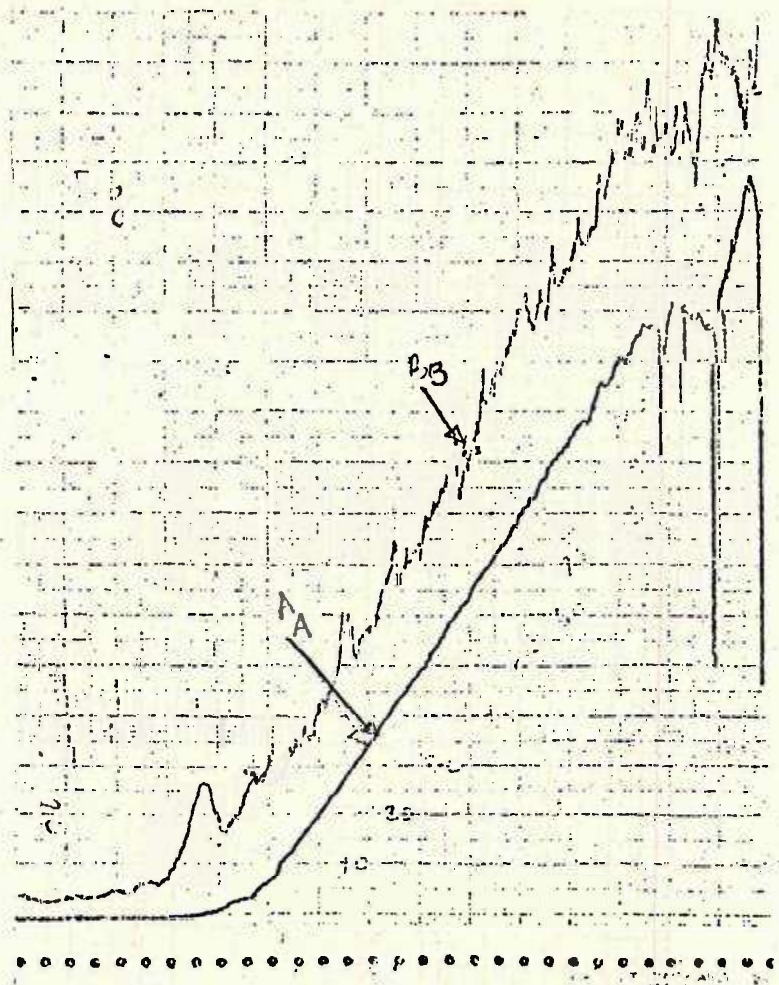


Fig.4.13 Gráfico de Radiación Solar Global para el día 21-VI-84. 2:00-6:00 p.m.

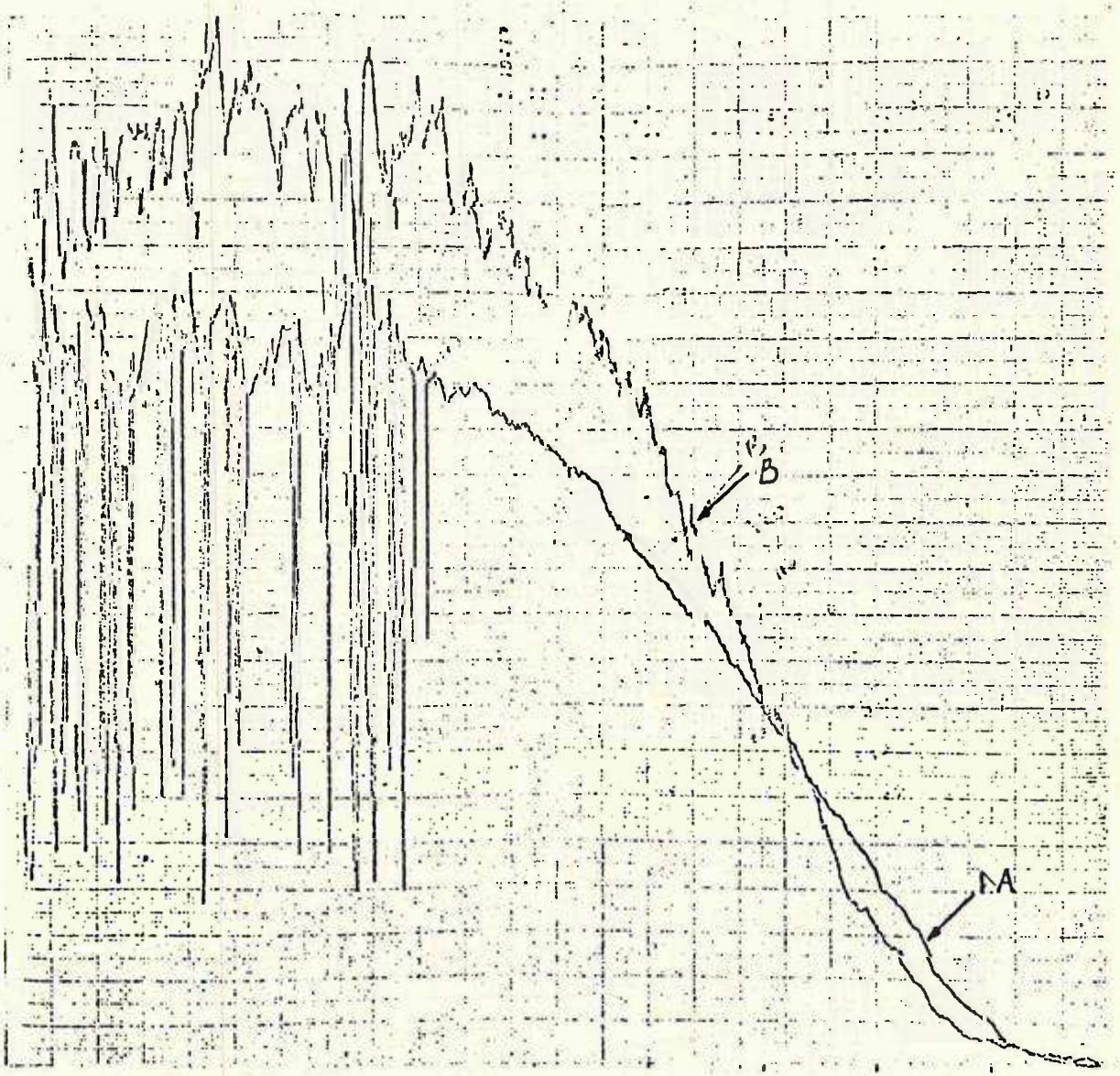


Fig. 4.14 Gráfica de Radiación Solar Global para el 22-VI-84. Hora: 6:00a.m.-12:00m.

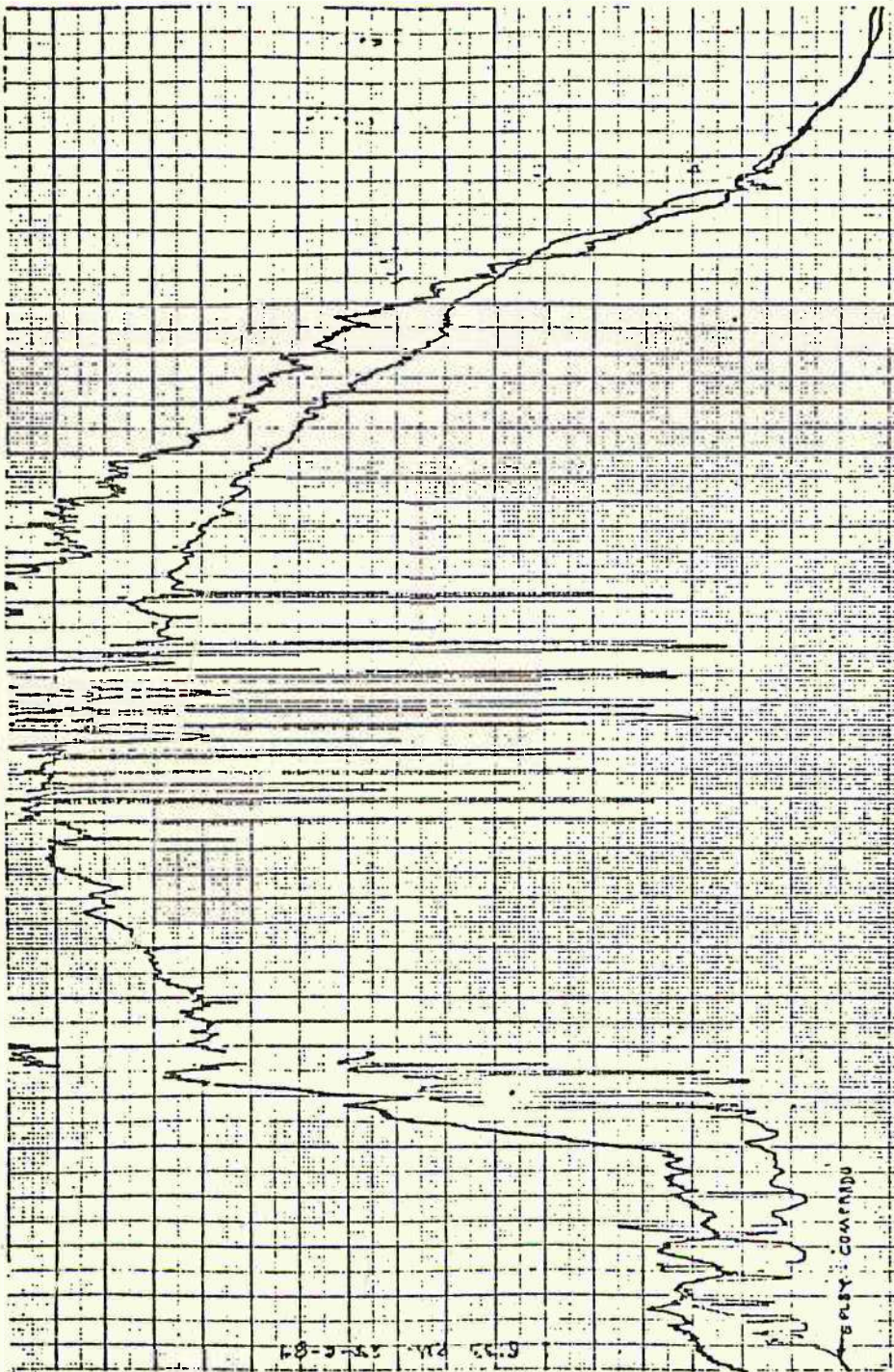


Fig. 4.15 Gráfico de Radiación Solar Global. 28-VI-84. Hora: 6:00am-12:00 m.

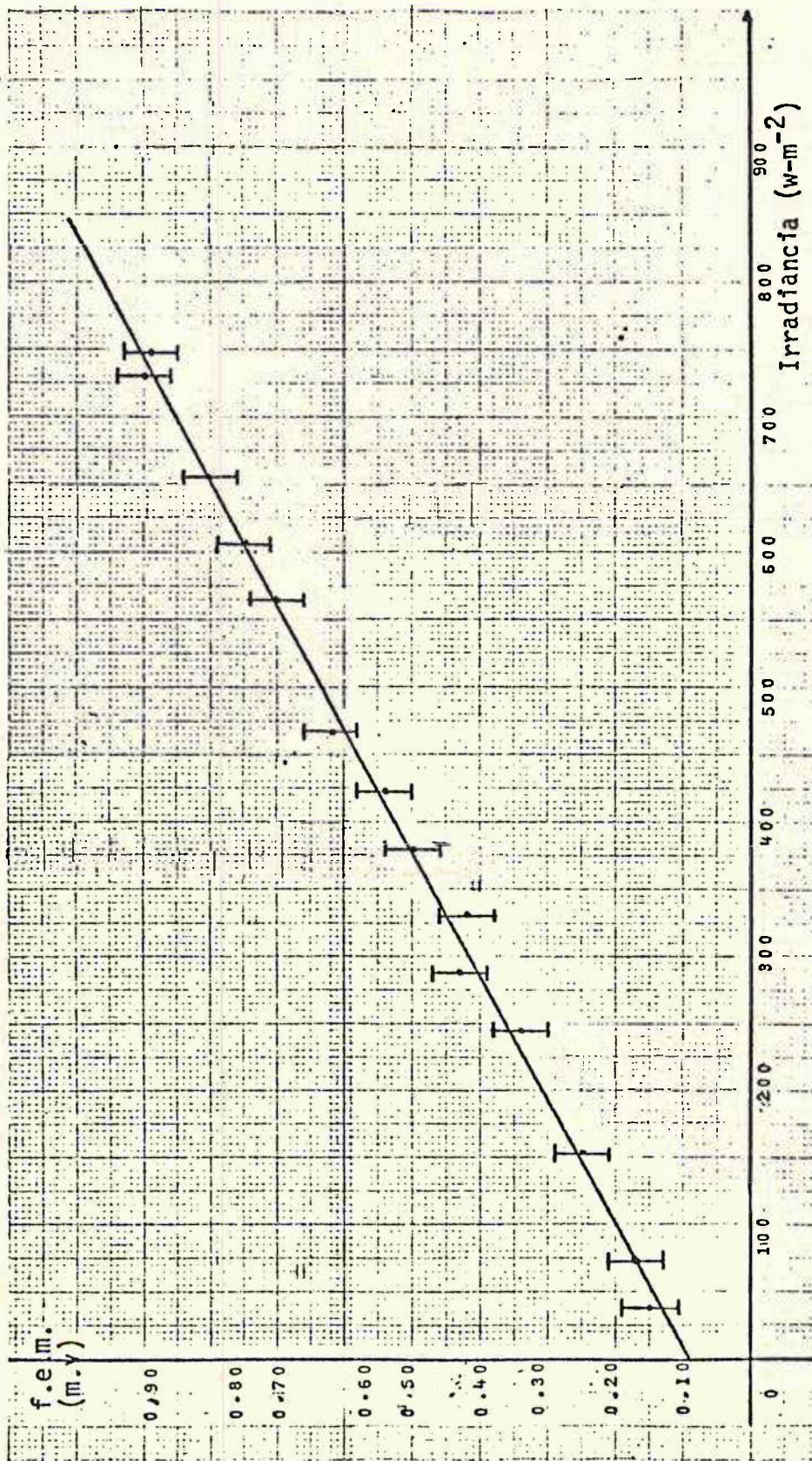


Fig. 4.16 Gráfica obtenida de datos provenientes del Solarímetro Versión 3 y del Eppley Patrón. Tomados el 21-VI-84. Hora: 2:00 a 6:00 p.m.

$$m = (1.08 \pm 0.01) \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{w-m}^{-2}} \quad ; \quad S_{mI} = 0.01 \frac{\text{m.v.}}{\text{w-m}^{-2}}$$

$$b = 0.092 \text{ m.v.}$$

$$r = 0.998$$

$$S_y = 0.012 \text{ m.v.}$$

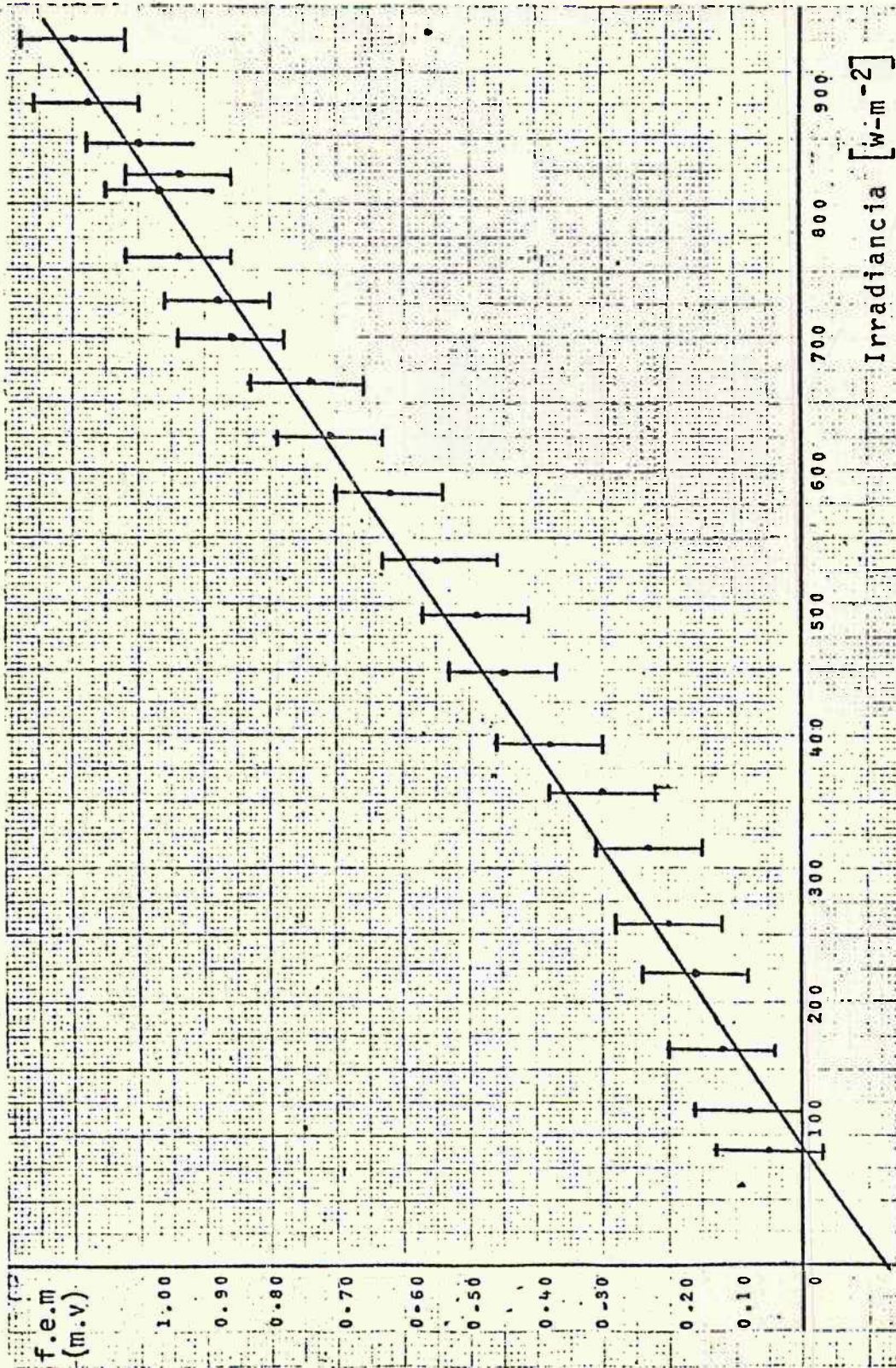


Fig. 4.17 Gráfica obtenida de datos provenientes del Solarímetro Versión 3 y del Eppley patrón. Tomados el 22-VI-84.

$$m = (1.35 \pm 0.04) \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{w}\cdot\text{m}^{-2}} ; S_m = 0.04 ; b = (-0.12 \pm 0.05)\text{m.v.}$$

$$S_y = 0.05 \text{ m.v.} \quad r = 0.993$$

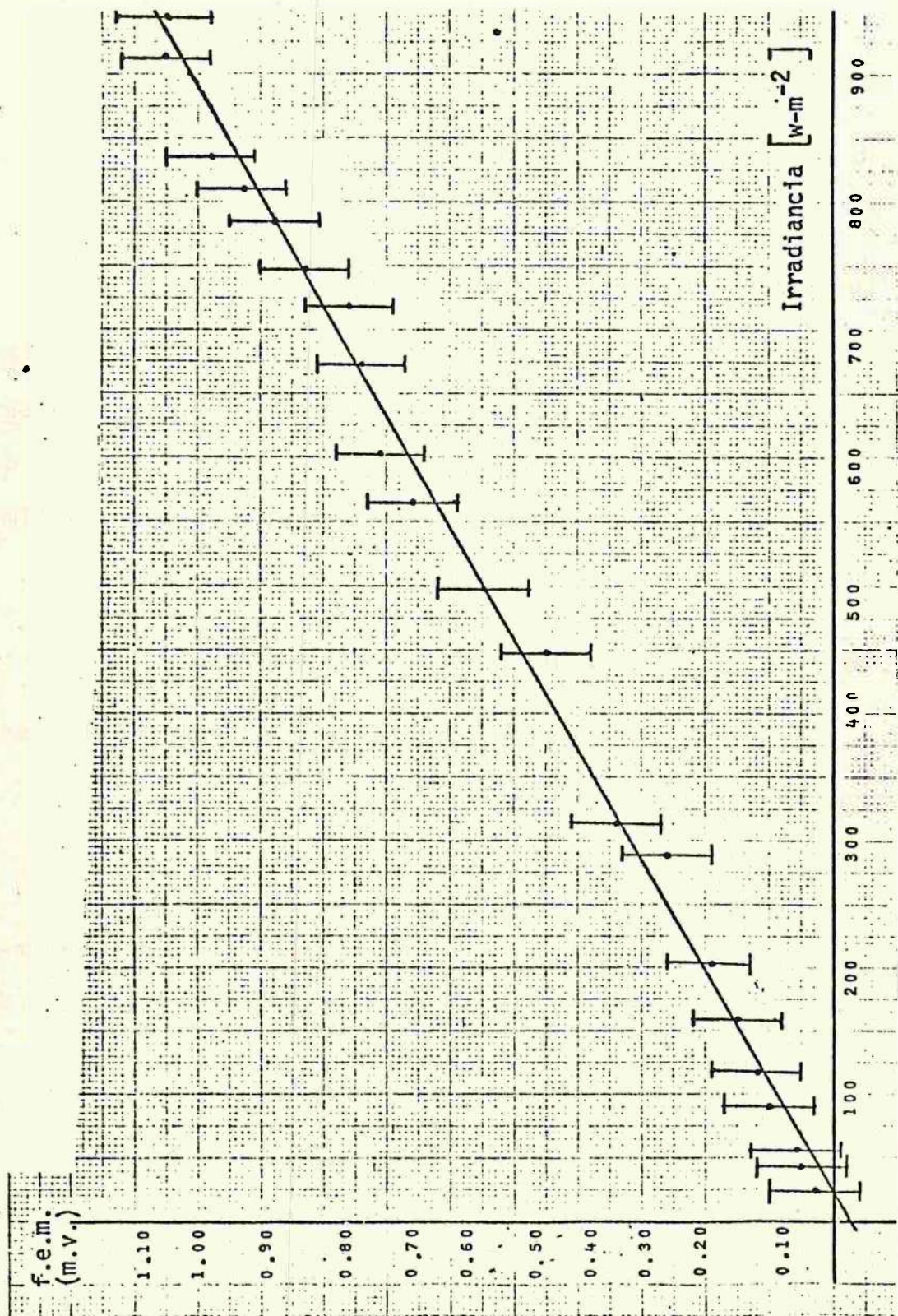


Fig. 4.18 Gráfica obtenida de datos provenientes del Solarímetro Versión 3 y del Eppley. Tomados el 28-VI-84. Hora: 6:00 a.m. - 12:00 m.

$$m = (1.15 \pm 0.03) \times 10^{-3} \frac{\text{m.v.}}{\text{w-m}^{-2}} ; b = (-0.02 \pm 0.05) \text{m.v.}$$

$$r = 0.997$$

CAPITULO V

CALCULO DE FLUJOS DE CALOR

5.1 Introducción.

El diseño y análisis de los sistemas que usan la radiación solar térmicamente requiere que se tenga un conocimiento de los fundamentos de la termodinámica y de los flujos de calor de cada uno de sus componentes con el objeto de optimizar la eficiencia de los sistemas.

En nuestro caso es importante determinar:

- a) La temperatura máxima de equilibrio que alcanza el disco sensor (para las 12 meridiano),y
- b) El tiempo de respuesta del solar 2.

Como resultado también de este cálculo se podrá determinar cuáles son los elementos que ocasionan más pérdidas de calor, para tomarse en cuenta en futuros diseños.

5.2 Transferencia de Energía Calorífica.^{1/}

El calor se transfiere de una región a otra, como re-

^{1/} ICAITI. Aplicaciones de la Energía Solar. pp 14-18.

sultado de la diferencia de temperatura existente entre ellos. Existen tres mecanismos distintos de transferencia de calor: Conducción, radiación y convección.

En muchas situaciones que se presentan en la naturaleza, el calor fluye mediante la combinación de más de uno de esos mecanismos, en forma simultánea. En la práctica, cuando uno de esos mecanismos predomina sobre los otros, al calcular la cantidad de calor transferido, se pueden obtener soluciones aproximadas si se desprecia el efecto de los otros mecanismos no dominantes y se considera sólo el que predomina en el proceso de transmisión de calor.

5.2.1 Conducción.

Es un proceso mediante el cual el calor fluye desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja, dentro de un medio (sólido, líquido o gaseoso) o entre medios diferentes en contacto físico directo.

5.2.2 Radiación.

Es un proceso por el cual fluye calor desde un cuerpo de alta temperatura a otro cuerpo con menor temperatura, y los cuales están separados por un espacio que, incluso puede ser el vacío. La importancia de la transferencia de calor por radiación se hace mayor conforme mayor sea la temperatura

del cuerpo más caliente. En las situaciones en que las temperaturas son próximas a la del ambiente, la transferencia de calor por radiación puede ser despreciada.

5.2.3 Convección.

Es un proceso de transporte de energía, causado por el movimiento de un fluido en contacto con un sólido. La convección tiene gran importancia como mecanismo de transferencia de energía entre una superficie absorbidora y un líquido o un gas.

La transferencia de energía por convección, desde una superficie, cuya temperatura es superior a la de un fluido que está en contacto con ella, ocurre en varias etapas. Primero, el calor fluirá por conducción desde la superficie, hacia las partículas adyacentes del fluido. La energía así transferida provoca un aumento de la temperatura de esas partículas; entonces, éstas se moverán hacia otra región del fluido en que haya menor temperatura; ahí se mezclarán con las partículas presentes, y les transferirán parte de su energía, aumentando así la temperatura de ellas.

El flujo, en este caso, es de masa y energía; realmente, la energía es almacenada en las partículas del fluido y transportada como resultado del movimiento de toda la masa del mismo.

Para su operación, este mecanismo no depende únicamente de la diferencia de temperaturas, y, por lo tanto, no está estrictamente de acuerdo con la definición de transferencia de calor. Sin embargo, el efecto neto es el de un transporte de energía, y puesto que éste ocurre en la dirección de un gradiente de temperatura, está clasificado como una forma de transferencia de calor, y es conocido como "flujo o transferencia de calor por Convección".

La transferencia de calor por convección se clasifica, de acuerdo con la causa que provoca el flujo, en convección libre y convección forzada. Cuando el movimiento del fluido tiene lugar exclusivamente como resultado de la diferencia de densidades causada por los gradientes de temperatura, se habla de Convección libre o natural. Cuando el movimiento del fluido es provocado por algún agente externo, tal como una bomba, un ventilador o un agitador, el proceso se conoce como convección forzada. La eficiencia de la transferencia de calor por convección depende, básicamente, de la mezcla del fluido.

5.3 Leyes Básicas de la Transferencia de Calor.

5.3.1 Conducción.

La relación básica para la transferencia de calor por conducción fué dada por el francés Fourier, en 1822. Esta-

bleció que la velocidad de transferencia de calor por conducción, Q_K , en un material, es igual al producto de tres cantidades:

$$Q_K \left[\frac{\text{cal}}{\text{seg}} \right] = KA \frac{\Delta T}{\Delta X}$$

Donde

- a) K: Conductividad térmica de material.
- b) A: El área a través de la cual fluye el calor por conducción, A. Esta área debe medirse perpendicularmente al flujo de calor.

5.3.2 Radiación.

La cantidad de energía en forma de calor que sale de una superficie radiante, depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie.

Un radiador perfecto, también llamado cuerpo negro, emite energía radiante desde su superficie con una velocidad de transferencia Q_r , dada por la ecuación:

$$Q_r \left[\frac{\text{cal}}{\text{seg}} \right] = A \sigma T^4$$

A : Area de transferencia de calor por radiación.

σ : Constante de Stefan Boltaman.

T : Temperatura absoluta.

Los cuerpos comunes no se comportan como el radiador perfecto mencionado, sino emiten radiación a menor rapidez que un cuerpo negro y se denominan "cuerpos grises". El cociente de la emisión de radiación de un cuerpo común entre la emisión de radiación de un cuerpo negro a la misma temperatura, es llamado la emitancia (ϵ) del cuerpo. Así, un cuerpo real, emite radiación con la rapidez dada por:

$$Q_r = \epsilon A \sigma T^4.$$

Como todos los cuerpos grises emiten radiación a un nivel de temperatura dado, lo que interesa es conocer el flujo neto de calor de un cuerpo a otro Q_r ($1 \rightarrow 2$), que ven dría dado por la relación

$$Q_r = A_1 \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) .$$

5.3.3 Convección.

La velocidad de transferencia de calor por convección, entre una superficie y un fluido, puede calcularse por la relación siguiente:

$$Q_c \left[\frac{\text{cal}}{\text{seg}} \right] = h_c \cdot A \Delta T.$$

En esta ecuación se tiene:

Q_c = Velocidad de transferencia de calor por convección.

A = Area de transferencia de calor.

ΔT = Diferencia de temperatura de la superficie y del fluido, en algún punto particular de éste (usualmente, lejos de la superficie).

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección.

La determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección es muy difícil, debido a que la convección es un fenómeno muy complejo. Existen técnicas disponibles para una determinación cuantitativa de h_c , y, algunos autores han preparado tablas con valores para estos coeficientes, para sistemas de agua, aire, etc.

5.4 Cálculo de los Flujos de Calor.

5.4.1 Radiación Total Incidente.

Se utilizó como valor de la radiación total incidente sobre el disco sensor, el valor de irradiancia promedio en nuestro país, calculado para el día 20 de abril de 1982 a las 12 meridiano^{2/}, por considerarse que en esta fecha la constante solar alcanza un valor próximo a su promedio.

$$P = 1.157 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{min.}}$$

^{2/} M. Machado op. cit. p. 56.

Siendo la energía recibida por el disco en la unidad de tiempo

$$Q_p = 1.27 \times 10^{-1} \frac{\text{cal}}{\text{seg}} .$$

5.4.2 Determinación de la Temperatura de Estabilización y de la Constante de Tiempo.

A. El disco sensor, está montado sobre un anillo aislante del calor, construido con fieltro de pelo de animal, - impregnado en pegamento blanco (EGA de Borden). Este aislante térmico tiene una conductividad térmica promedio K_f , en la base tiene adherida una placa de acrílico en la cual están montadas las termocuplas.

Considerando las fugas de calor por conducción, convección y radiación y tomando en cuenta la conservación de la energía, se tiene que la rapidez con que el disco sensor absorbe energía calorífica, menos las fugas por el aislante y el aire da como resultado la acumulación de calor en el disco. Es decir, la ecuación del balance energético viene dada por:

$$Q_p - (Q_c + Q_r + Q_f + Q_1 + Q_2 + Q_3) = mc \frac{dT}{dt} . \quad (5.1)$$

Donde

La pérdida de calor por convección del disco sensor

$$Q_c = Ah_c (T - T_A). \quad (5.2)$$

la pérdida de calor por radiación de la superficie negra

$$Q_R = A \epsilon \sigma (T^4 - T_A^4) \quad (5.3)$$

Siendo las pérdidas de calor por conducción.

A través del fieltro

$$Q_f = K_f S_f \frac{(T - T_A)}{\Delta X} \quad (5.4.a)$$

A través del conductor de cobre

$$Q_1 = K_1 A_1 \frac{(T - T_A)}{\Delta X_1} \quad (5.4.b)$$

A través del acrílico:

$$Q_2 = K_2 A_2 \frac{(T - T_A)}{\Delta X_2} \quad (5.4.c)$$

A través del constantan

$$Q_3 = K_3 A_3 \frac{(T - T_A)}{\Delta X_2} \quad (5.4.d)$$

Los valores de las constantes de las Ecuaciones 5.1 a la 5.4.d aparecen en la Tabla V.1.

TABLA V.1

Valores de las Constantes de la Ecuación del
Balance Energético para el Disco Sensor

<u>SIMBOLO</u>	<u>NOMBRE</u>	<u>VALOR</u>	<u>UNIDADES</u>
m	Masa del disco de cobre	31.10	grs.
c	Calor específico del cobre	0.093	$\frac{\text{cal}}{\text{gr}^{\circ}\text{K}}$
h	Coefficiente de Convección del aire	1.43×10^{-4}	$\frac{\text{cal-cm}^{-2}}{\text{seg}^{\circ}\text{K}}$
e	Emisividad del negro de ocote	0.95	"
σ	Constante de Stefan Boltzman	1.35×10^{-12}	$\frac{\text{cal-cm}^{-2}}{\text{seg}^{\circ}\text{K}^4}$
K_f	Conductividad del Fieltro	8.95×10^{-5}	$\frac{\text{cal-cm}^{-1}}{\text{seg}^{\circ}\text{K}}$
K_1	Conductividad del cobre	0.901	"
K_2	Conductividad del Acrílico	3.61×10^{-4}	"
K_3	Conductividad del constantán	0.0506	"
S_f	Area Cubierta por el fieltro	4.8	cm^2
A	Area del Disco Sensor	6.6	cm^2
A_1	Area Cubierta por el Conductor de Cu.	5.1×10^{-2}	cm^2
A_2	Area Cubierta por el acrílico	4.5	cm^2
A_3	Area Cubierta por el constantán	5.1×10^{-2}	cm^2
Δx	Espesor del fieltro	0.20	cm
Δx_1	Longitud del Alambre de Cobre	7.0	cm
Δx_2	Espesor deí Acrílico	0.20	cm
Δx_3	Longitud del Alambre de Constantán	7.0	cm
T_A	Temperatura Ambiente	300	$^{\circ}\text{K}$

B. La solución de la Ecuación 5.1 lleva a la ecuación diferencial de la forma

$$\frac{dT}{dt} = - a T + b. \quad (5.5)$$

Donde

$$a = \frac{Ah + 4A \epsilon \sigma T_A^3 + K_f \frac{S_f}{\Delta x} + K_1 \frac{A_1}{\Delta x_1} + K_2 \frac{A_2}{\Delta x_2} + \frac{K_3 A_3}{\Delta x_3}}{mc}. \quad (5.6.a)$$

$$b = a T_A + \frac{Q_P}{mc}. \quad (5.6.b)$$

y se ha utilizado la aproximación $(T^4 - T_A^4) = 4T_A^3(T - T_A)$.

La solución de 5.a Ec. 5.5 es:

$$T = \frac{b}{a} (1 - e^{-at}) \quad (5.7).$$

En la condición de equilibrio cuando $t \rightarrow \infty$

$T \rightarrow T_N$, entonces

$$T = \frac{b}{a} \quad (5.8).$$

T_N : Temperatura de estabilización. Temperatura máxima de equilibrio que alcanza el disco para las 12 meridianos del día considerado.

Otro dato importante que se puede obtener de la Ecuación 5.7 es el tiempo de estabilización térmica del disco, p_e

ro la estabilidad se alcanza para valores grandes de t . Por lo que definiremos "la constante de tiempo del aparato o tiempo de respuesta (τ), como el tiempo necesario para que la temperatura del disco alcance un 63% de la - variación máxima"; ésto se logra cuando:

$$a\tau = 1.$$

o sea:

$$\tau = 1/a. \quad (5.9).$$

C. Cálculo de las constantes a y b .

A partir de las Ecuaciones 5.6.a y 5.6.b se calcularon los términos que aparecen en ambas ecuaciones, tabulándose en la Tabla V.2.

Tabla V.2

Valores de los Términos que aparecen en las Ecuaciones 5.6.a y 5.6.b.

Constante	Valor ($\frac{\text{cal}}{\text{seg } ^\circ\text{K}}$)
Ah	9.46×10^{-4}
$4 A \epsilon \sigma T_A^3$	9.17×10^{-4}
$K_f \frac{S_f}{\Delta x}$	21.5×10^{-4}
$\frac{K_1 A_1}{\Delta X_1}$	66.3×10^{-4}

$$\frac{K_2 A_2}{\Delta X_2} = 79.5 \times 10^{-4}$$

$$K_3 \frac{A_3}{\Delta X_3} = 3.44 \times 10^{-4}$$

$$K_p \frac{A_2}{\Delta X_2} = 9.39 \times 10^{-4}$$

Con los datos de la Tabla V.2 se procedió a calcular a y b, obteniéndose los siguientes resultados:

$$a = 6.55 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{seg}} ; \quad m_e = 2.89 \frac{\text{cal.}}{\text{seg}}$$

$$b = 2.01 \frac{^{\circ}\text{K}}{\text{seg}}$$

- D. Determinación del tiempo de estabilización T_N y la constante de tiempo τ . Conocidos a y b.

Utilizando las ecuaciones 5.8 y 5.9 tenemos:

$$T_N = 307 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

$$\tau = 152 \text{ seg.}$$

CAPITULO VI

ANALISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Análisis de los Resultados.

En esta sección se presenta un análisis y discusión de los resultados de la caracterización del Solarímetro en sus distintas etapas, lo cual se hará en tres partes: linealidad, constante de calibración y constante de tiempo.

6.1.1 Linealidad.^{1/}

Para la determinación de la linealidad, se utilizó la técnica T1; calculando el coeficiente de correlación "r". En todos los casos tanto para el solar 0, 1 y 2 se obtuvo un valor de "r" cercano a la unidad, como se muestra en la Tabla IV.9, lo cual significa que la f.e.m de salida del solarímetro a prueba y la radiación solar incidente en la superficie del sensor tienen una alta relación lineal.

6.1.2 Constante de Calibración.

A. Los valores reportados para las constantes de calibración son los siguientes:

^{1/} Muñoz C., R. O. Guía para trabajos de investigación orientado a las ciencias. pp. 201-206.

Para el Solar 0.

$$K_{A_0} = 4.52 \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w-m} \pm 5.2\%$$

Solar 1.

$$\bar{K}_{A_1} = 0.93 \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w-m} \pm 8.4\% \quad (T_2)$$

$$\bar{K}'_{A_1} = 0.90 \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w-m} \pm 8.9\% \quad (T_1)$$

Solar 2. (T₁)

$$K_{A_2} = 1.08 \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w-m} \pm 8.8\% \quad (\text{Lab})$$

$$\bar{K}'_{A_2} = 1.19 \times 10^{-3} \frac{m \cdot v}{w-m} \pm 6.1\% \quad (\text{Campo})$$

Al comparar los valores de \bar{K}_{A_1} y \bar{K}'_{A_1} obtenidos para el Solar 1. Se observó que calculados mediante las dos técnicas T1 y T2 los valores obtenidos son muy próximos entre sí. Esto da validez al uso de cualquiera de las técnicas para la determinación de la constante de calibración

$$\frac{\bar{K}_{A_1}}{\bar{K}'_{A_1}} = 1.03$$

Al comparar K_{A_2} con \bar{K}'_{A_2} , se observa una diferencia en la magnitud de la constante y en la incertidumbre asociada

a cada una de ellas. (Ec. 6.2)

$$\frac{\bar{K}'_{A_2}}{\bar{K}_{A_2}} = 1.1 \quad (6.2)$$

La calibración en el Laboratorio se hizo utilizando luz artificial, de menor intensidad en un rango de 138-402 ($w - m^{-2}$) que la radiación solar en un rango de 500-1000 ($w - m^{-2}$) para calibración de campo, lo cual posiblemente influye en la diferencia de las magnitudes K_{A_2} y \bar{K}'_{A_2} como se muestra en la relación 6.2. La incertidumbre asociada al valor K_{A_2} calculada para condiciones de laboratorio es mayor - que la obtenida cuando se calcula \bar{K}'_{A_2} en condiciones de campo. Lo anterior se atribuye a que en la calibración en el laboratorio, solamente se pudo coleccionar pocos datos de em- Irradiancia, lo que influye directamente en la determinación de la incertidumbre.

Al comparar \bar{K}_{A_2} con \bar{K}'_{A_1} (obtenidas bajo condiciones de campo). Se encuentra que \bar{K}'_{A_2} es 1.3 veces \bar{K}'_{A_1} . Resultado que se atribuye principalmente al mayor coeficiente de absorción de la pintura negra del Solar 2 (Negro de ocote) (Unica modi- ficación que presenta el Solar 2 con respecto al Solar 1).

Si se compara K_{A_0} y \bar{K}'_{A_2} se encuentra que K_{A_0} es 3.8 ve-

ces K'_{A_2} , resultado que se atribuye a una disminución en el contacto térmico entre el disco sensor y las puntas de la termopila, para el Solar 2, lo cual afecta su señal de Salida. (Ver Anexo 3).

6.1.2 Constante de Tiempo.

Interesa que la constante de tiempo sea pequeña, ya que un valor grande como el reportado del experimento sección 4.4.2 donde $\tau = 330$ introduce error en el cálculo de la (radiación solar) energía total que llega a la superficie terrestre.

El valor de la constante de tiempo del Solarímetro es 330 veces más grande que la del estándar.

Al comparar la constante de tiempo del Solar 2 obtenida experimentalmente. (330 seg.) Con la calculada mediante el análisis de flujo de calor (152 seg). Se observa una discrepancia en la magnitud reportada en cada caso. Un análisis de las causas y los cálculos se presentan en el Anexo 3.

De la Ec. 5.9 y 5.6 a tenemos:

$$\tau = \frac{mC}{D}$$

Donde D' = Pérdida de calor total del sistema.

Si D' permanece constante y se tiene garantizado un buen sistema de aislamiento el elemento que introduce más influencia en la magnitud τ es la masa m del disco sensor.

CONCLUSIONES.

1. El objetivo de caracterizar un Piranómetro se ha cumplido, siendo las características principales del Solar 2 las siguientes:

- Constante de Calibración (K_{A_2}') $1.19 \times 10^{-3} \left[\frac{m \cdot v}{w \cdot m^{-2}} \right]$.
- Tiempo de respuesta (τ) 330 seg.
- Linealidad (r) 0.993.
- Incertidumbre $\pm 8.9\%$. Lo que cae dentro del rango de error estipulado para Piranómetros de campo (5 a 10)% .

2. En la calibración del Solar 2 bajo condiciones de laboratorio se reportó una Incertidumbre de $\pm 8.9\%$, lo que iguala a la de $\pm 8.9\%$ reportada bajo condiciones de campo. Aún cuando se esperaba tener una pequeña Incertidumbre al calibrar bajo condiciones de labora

torio no fué posible debido a que se tuvo problemas de carácter técnico. Pero ésto no le resta importancia al método de calibración en el laboratorio, ya que éste puede ser repetido bajo condiciones similares, detectando cualquier posible cambio en las características físicas del solarímetro a prueba.

3. Se cumplió con las recomendaciones de la O.M.M., las cuales basan la caracterización de los solarímetros en el método de comparación y el análisis de los datos por medio del método de mínimos cuadrados. Lo cual da validez a los resultados obtenidos.
4. El pequeño valor de la f.e.m del solarímetro aproximadamente 0.97 m.v., comparado con la f.e.m del estándar aproximadamente 12 m.v., no afecta en nada la validez de las mediciones con él realizadas. Aunque ocasione inconveniente de usar equipo especial para realizar las lecturas.
5. El valor de la constante de calibración \bar{K}'_{A_2} es aproximadamente 0.13 veces K_E . Esto puede ser resultado principalmente de la diferencia en las características físicas entre los dos solarímetros. Siendo algunas de éstas:

- Distinto número de termocuplas.
 - Calidad de la pintura negra del sensor.
 - El piranómetro estándar usa un regulador de la temperatura.
 - Calidad de los aislantes usados en cada caso.
6. En base al análisis del flujo de calor se pudo detectar que la masa del disco sensor influye en la constante de tiempo τ del Solar 2.
 7. La excesiva inercia térmica del disco sensor introduce error en las lecturas de la energía total extraídas de las gráficas de radiación solar global. Lo que lo inhabilita para diseño y construcción de equipo de precisión.
 8. Para el diseño y construcción de colectores solares planos o diseño en arquitectura, donde se pueden tener variaciones en la estimación de la energía que llega a una superficie en un monto de $\pm 20\%$, las lecturas de energía solar con el solarímetro son adecuadas.

RECOMENDACIONES.

1. Para futuras caracterizaciones, sería conveniente utilizar la técnica T1, ya que permite encontrar la constante de calibración y la linealidad, además de ser de muy fácil aplicación.

2. En base al análisis del flujo de calor se presentan las siguientes recomendaciones para la optimización del tiempo de respuesta y la diferencia de temperatura entre la superficie negra y la blanca.

A. Modificaciones del Solar 2.

A.1 Cambio del Disco Sensor.

Después de los análisis anteriores (6.1.2) se observa que la masa del elemento sensor es la que produce mayor efecto en el valor de τ , por lo que se propone cambiar por uno del mismo material (cobre), con un espesor de 0.1 mm. (tabletas para circuitos integrados) y el mismo radio. Con estas características del disco sensor las constantes a y b tendrán los valores

$$a = 3.5 \times 10^{-1} \text{ seg.}$$

$$b = 107 \text{ } ^\circ\text{K-seg.}$$

Los valores de la temperatura de estabilización y la constante de tiempo serán, respectivamente:

$$T_N = 307 \text{ } ^\circ\text{K} \text{ ;.}$$

$$\tau = 3 \text{ seg. ; } \Delta T = 7 \text{ } ^\circ\text{K} \text{ (Diferencia de temperatura).}$$

B. Cambio del Disco Sensor y de la Base de Acrílico del Solar 2.

En base al análisis de flujo de calor se observa que la mayor influencia en la temperatura de estabilización la presentaban las pérdidas del sistema como se puede ver a partir de las ecuaciones 5.6.b y 5.8, donde

$$T_N = \frac{b}{a}$$

$$T_N = \frac{a T_A + \frac{Q_p}{mc}}{a}$$

$$T_N = T_A + \frac{Q_D}{amc}$$

$$T_N = T_A + \frac{Q_D}{D} ; D: \text{Pérdida del sistema.}$$

Lo que elimina el factor $m c$ y deja solamente la influencia de las pérdidas por fugas de calor (Ver Anexo N° 3).

Se propone cambiar la base de acrílico por una base de perlita, material aislante de origen local con un valor de conductividad térmica^{2/}

$$K_p = 1.07 \times 10^{-4} \frac{\text{cal-cm}^{-1}}{\text{seg}^{\circ}\text{K}}$$

^{2/} Perlite Institute Inc. 45 West 45th Street. New York, N. Y. 10056 U.S.A.

y el disco sensor por uno de igual material (cobre) de 0.1 mm. de espesor y el mismo radio.

En base a estas características se obtienen los siguientes valores:

$$a = 2.26 \times 10^{-1} \frac{1}{\text{seg}}$$

$$b = 70.1 \frac{^{\circ}\text{K}}{\text{seg}}$$

lo que da un valor de $\tau = 4.5$ seg. y

$$T_N = 310 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

O sea si se tiene una mejoría en el sistema de aislamiento, aumenta la temperatura de estabilización lo que incide en un aumento en la señal de salida del solarímetro f.e.m, pero a su vez aumenta la constante de tiempo.

- C. Incrementar la señal de salida (f.e.m) aumentando el número de termocuplas en el sistema a fin de poder hacer mediciones de radiación solar global con equipo corriente.
- D. Calibrar anualmente los equipos de medición de radiación solar.

BIBLIOGRAFIA

1. ALDAMA, WILDER; VARELA, ANIBAL.

"Diseño y Construcción de un Solarímetro Tipo Termopila de alta eficiencia y economía".

Revista Peruana de Física. Vol. II N° 3. 1983.

2. ASTM.

"Manual on the use of thermocouples in temperatures"
1916, Races Street. Philadelphia, p.a. 19103. third printing, July 1979.

3. BRINKWORTH, B. J.

"Solar Energy for Man"

New York, John Wiley & Sons, 1972, X, 249 pp il.

4. DICKINSON, WILLIAM C., CHEREMINISOFF (Eds).

"Solar Energy Technology Handbook" Part A.

New York, Marcel Dekker Inc. Butterworth, 1980, IX, 882 p. il., 25.5 cm.

5. DUFFIE J. A., BECKMAN, W.A.

"Solar Energy of Thermal Processes".

New York, John Wiley & Sons, 1980.

6. GALINOO, I.

"Solar Radiation Information for Energy Technologist"

México, Inst. Geofis. U.N.A.M. 1983. 13 p. il.

7. ICAITI.
"Aplicaciones de la Energía Solar".
San Salvador, ICAITI-ROCAP, 1983, 90 p. il.
8. KREIDER, J. F., KREITH, I.
"Solar Energy Handbook".
New York, Mc Graw-Hill Inc., 1981, X, il.
9. LUPPOLD, DAVID S.
"Precision of Measurements and Standards".
Menlo Park-California. Addison-Wesley Inc. 1969.
VIII. 251 pp, il.
10. MACHADO, MAURICIO.
"Construcción de un Solarímetro".
Tesis. San Salvador, Departamento de Física, Universidad de El Salvador. 1982, 111 pp. il, 28 cm.
11. Mc DANIELS, D. K.
"The Sun".
New York, John Wiley & Sons. 1980 XI. 271 pp. il.
12. RIVEROS, H. G., ROSAS, LUCIA.
"El método científico aplicado a las ciencias experimentales".
México, Editorial Trillas, Septiembre 1982, 164 pp.
il. 23 cms.

13. SAYIGH, A. A. M. (Ed.)
"Solar Energy Engineering".
San Francisco, Academic Press, 1977. XX, 506 pp. il.
14. WEAST C. ROBERT (Ed.)
"Handbook of Chemistry and Physics".
52^{na} Edition. The Chemical Rubber Co.
15. W. M.O.
"Meteorological Aspects of the utilization of Solar
Radiation as an Energy Source, Geneva Secretarial of
the World Meteorological Organization, 1981, 284 pp.
il. 27.3 cms.

ANEXO N° 1

PROGRAMA PARA LA DETERMINACION DE AREAS POR
EL METODO DEL TRAPECIO EN UNA CALCULADORA

HP-41C

01*LBL "SOLAR"	20 ST+ 08	38 STOP
02*LBL A	21 RCL 09	39*LBL B
03 PRX	22 RCL 08	40 RCL 06
04 STO 00	23 X=Y?	41 ST- 04
05 RCL 05	24 GTO "B0"	42 RCL 07
06*	25 GTO "HE"	43 STO 02
07 STO 01	26*LBL "HE"	44 1
08 RCL 02	27 CLX	45 ST- 08
09 STO 07	28 CLA	46*LBL F
10 +	29 ARCL 10	47 STO 02
11 2	30 ARCL 08	48 STOP
12/	31 PROMPT	49*LBL "80"
13 RCL 03	32*LBL D	50 ADV
14*	33 0	51 SF 12
15 ST+ 04	34 STO 01	52 RCL 04
16 STO 06	35 STO 04	53 PRX
17 RCL 01	36 STO 07	54 CF 12
18 STO 02	37 STO 08	55 ADV
19 1		56 .END.

ANEXO 2

DEDUCCION DE LA ECUACION PARA DETERMINAR " K_A "

La lectura " L " en milivoltios de un piranómetro se puede expresar mediante la relación:

$$L = K G \quad (A.2.1)$$

G : $\left[\frac{W}{m^2} \right]$ Medida de radiación global incidente.

K : Constante de Calibración.

Para Eppley

$$L_E = K_E G. \quad (A.2.2)$$

Para el Solarímetro a calibrar

$$L_A = K_A G. \quad (A.2.3)$$

Sustituyendo G de (A.2.3) en (A.2.2) tenemos:

$$\frac{L_E}{L_A} = \frac{K_E}{K_A} \quad (A.2.4)$$

o sea

$$K_A = K_E \frac{L_A}{L_E} \quad (A.2.5)$$

Pero esta es una relación puntual (A.2.5)

Si multiplicamos A.2.2 y A.2.3 por d_1 tendremos:

$$\frac{L_E \times d_1}{L_A \times d_1} = \frac{K_E}{K_A} \quad (\text{A.2.6})$$

que nos lleva a una relación de las áreas bajo la curva de radiación solar.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{K_E}{K_A} \quad (\text{A.2.7})$$

$$\boxed{K_A = \frac{A_2}{A_1} K_E} \quad (\text{A.2.8})$$

ANEXO N° 3

CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR EN LOS ELEMENTOS QUE INTERACTUAN CON EL DISCO SENSOR

Se hará por 2 métodos:

1. Análisis de Flujo de Calor, en base a los resultados de la Sección 6.1.2
2. Calculada a partir de τ , obtenida experimentalmente.

Los valores que se muestran en la Tab. V.2 son representativos de la magnitud de las pérdidas de calor que se dan en los elementos, ya que para calcular las pérdidas por flujo de calor solamente se multiplican por la diferencia de temperatura, ésto motivó a considerar dichos valores como un índice de las pérdidas del sistema, agrupándose los términos de acuerdo a su mayor o menor influencia en las pérdidas llamaremos:

- D1: Pérdidas en el sistema por convección, radiación y conducción en el constantán.
- D2: Pérdidas por conducción en el cobre, acrílico y fieltro.

D : Pérdidas totales.

A.3.1 Análisis de Flujo de Calor. Se hará considerando que los resultados del Capítulo VI muestran que no existe un buen contacto térmico entre el disco sensor y las termocuplas, disminuyendo dichas pérdidas en un 75% - del valor original.

$$A.3.1.1 \quad D_1 = Ah + A\epsilon\sigma T_A^3 + K \frac{A_3}{\Delta x_3} = 2.207 \times 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{seg} \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$A.3.1.2 \quad D_2 = \frac{K_f S_f}{\Delta x} + \frac{1}{4} \left[K_1 \frac{A_1}{\Delta x_1} \right] + K_2 \frac{A_2}{\Delta x_2} = 117.6 \times 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{seg} \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$A.3.1.3 \quad D = 13.96 \times 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{seg} \text{ } ^\circ\text{K}}$$

A.3.2 Cálculo de la pérdida total D' a partir de datos experimentales. Se utilizará la Ecuación 5.9

$$\tau = \frac{1}{a} \quad ; \quad a = \frac{D'}{mc} .$$

para $\tau = 330 \text{ seg.}$ (Capt. IV).

$$m = 31.10 \text{ grs} \quad ; \quad c = 0.093 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \text{ } ^\circ\text{K}}$$

$$a = \frac{1}{\tau} .$$

$$D' = \frac{mc}{\tau} . .$$

$$D' = 8.76 \times 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{seg} \text{ } ^\circ\text{K}}$$

A.3.3 Análisis de los resultados y discusión. Debido a la discrepancia entre el valor de τ obtenido experimentalmente (330 seg.) y el reportado por el análisis de flujo de calor (152 seg.), se decidió revisar la influencia que tienen las pérdidas de calor en los distintos elementos que interactúan con el disco sensor.

A fin de encontrar una justificación a la discrepancia entre dichos valores.

Se logró controlar que la pérdida de calor reportada para la termocupla de cobre era muy grande ya que se calculaba como el valor máximo de flujo de calor a través del conductor, pero el análisis de la relación de las constantes de calibración para el Solar 0 y el Solar 2 muestran que $K_{A_0} = 3.8 K'_{A_2}$.

Esto motivó a sospechar que no existía buen contacto térmico entre el disco sensor y las termocuplas de cobre constantán, ya que en el rango de temperaturas de funcionamiento del disco sensor 300-314 °K las termocuplas de hierro constantán y cobre constantán reportan valores de f.e.m próximos entre sí^{1/}. Esto nos lleva a concluir que las pérdidas a través de la ter-

^{1/} ASTM Manual on the use of thermocouples in temperatures.

mopila de cobre constanteⁿ deberían disminuir en la misma proporción en que lo hace \bar{K}'_{A_2} . En base a esto se calculó de nuevo la constante de tiempo, obteniéndose un valor para τ de 207 seg. (Ver Anexo N° 4), - lo que disminuyó la diferencia con $\tau = 330$ seg. Dejando solamente pendiente de revisión las pérdidas de calor a través del acrílico y del fieltro, lo cual no se pudo verificar debido a que solamente tenían valor de la conductividad térmica reportados de tablas^{2/} y que posiblemente no se ajustaban a los verdaderos valores de conductividad térmica para dichos materiales.

2/ Robert C. Weast., Ed. Handbook of Chemistry and Physics E-5.

ANEXO N° 5

LISTA DE TABLAS

CAPITULO IV.

- Tabla IV.1 Valores de Irradiancia y f.e.m provenientes de mediciones realizadas el 30 de julio de 1982.
- Tabla IV.2 Resultados de las mediciones de áreas bajo las curvas de radiación solar. Fecha: 27, 28 y 29 de marzo de 1984.
- Tabla IV.3 Resultado del cálculo de la constante de calibración usando la técnica de comparación por áreas.
- Tabla IV.4 Registro de los datos de irradiancia y f.e.m provenientes del estándar y del Solar 1.
- Tabla IV.5 Lecturas de Irradiancia y f.e.m bajo condiciones de Laboratorio.
- Tabla IV.6 Lecturas de Irradiancia y f.e.m 21-VI-84.
- Tabla IV.7 Lecturas de Irradiancia y f.e.m. 22-VI-84.
- Tabla IV.8 Lecturas de Irradiancia y f.e.m. 28-VI-84
- Tabla IV.9 Resultado final del proceso de caracterización.

CAPITULO V

Tabla V.1 Valores de las constantes de la ecuación del -
balance energético para el disco sensor.

Tabla V.2 Valores de los términos que aparecen en las -
ecuaciones 5.6.a y 5.6.b.

ANEXO N° 4

Determinación de la constante de tiempo (τ) utilizando los resultados del Anexo N° 3, sección A.3.1, del tiempo de estabilización y de la diferencia de temperatura entre el disco sensor y la placa pintada de blanco, a partir de los resultados del Anexo N° 3, secciones A.3.1 y A.3.2.

A.4 Constante de tiempo y tiempo de estabilización.

A.4.1 Constante de Tiempo (τ).

Se calculará, utilizando la ecuación 5.9

$$\tau = \frac{1}{a}$$

se obtiene

$$\tau = 207 \text{ seg.}$$

A.4.2 Tiempo de estabilización y diferencia de temperatura (Sección A.3.1), utilizando las ecuaciones 5.8, 5.6.a y 5.6.b tenemos:

$$T_N = T + \frac{Q_p}{D}$$

$$T_N - T_A = 9.1 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (Diferencia de temperatura)}$$

$$T_N = 309.1 \text{ }^\circ\text{K} \text{ (Temperatura de estabilización)}$$

$$T_N = 36.1 \text{ }^\circ\text{C.}$$

B.4 Tiempo de estabilización y diferencia de temperatura utilizando el resultado de la sección A.3.2 (Anexo -- N° 3).

De la ecuación 5.8 se encontrará la diferencia de temperatura.

$$T_N - T_A = \frac{Q_p}{D}$$

$$T_N - T_A = 14.5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\Delta T = 14.5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_N = 314.5 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_N = 41.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\tau = 330 \text{ seg}$$

ANEXO N° 6

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO FIGURA

- 1.1 Espectro de Radiación Solar.
- 1.2 Radiación Solar Global, Directa y Difusa.
- 1.3 Diagrama de la Orbits Terrestre alrededor del Sol.
- 1.4 Movimiento aparente del sol a una latitud ϕ en el hemisferio septentrional.
- 1.5 Trayectoria aparente del sol en distintas latitudes y estaciones.
- 1.6 La Ley del Coseno: El efecto del ángulo solar sobre la cantidad de radiación (Irradiancia que llega a un colector).
- 1.7 Relación de la radiación incidente sobre una superficie inclinada.
- 1.8 Long. de la trayectoria del rayo en la atmósfera
- 1.9 Efecto del paso a través de la atmósfera de la radiación solar.
- 2.1 Balance Energético.
- 2.2 Diagrama esquemático de un Pirheliómetro de Incidencia normal y su montura seguidora del sol.

- 2.3 Componentes de la radiación solar directa, difusa y circunsolar.
- III 1. Jerarquía en el proceso de calibración.
- IV 4.1 Gráfica proveniente del Solar 0 - Eppley.
4.2 Curva de Calibración Solar 0 - Eppley.
4.3 Gráfica de radiación-Solar 1.
4.4 Gráfica de radiación-Solar 1.
4.5 Gráfica de radiación-Solar 1.
4.6 Gráfica de Radiación-Eppley
4.7 Gráfica de radiación-Eppley
4.8 Gráfica de radiación-Eppley
4.9 Curva de Calibración-Solar 1
4.10 Curva de Calibración-Solar 1.
4.11 Curva de Calibración-Solar 2.
4.12 Gráfica de Radiación determinación de la constante de tiempo-Solar 2.
4.13 Gráfica de radiación-Solar 2.
4.14 Gráfica de radiación-Solar 2.
4.15 Gráfica de radiación-Solar 2.
4.16 Curva de calibración-Solar 2.
4.17 Curva de calibración-Solar 2.
4.18 Curva de calibración-Solar 2.