

Universidad Nacional de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO ESCUELA DE GRADUADOS



“ Diseño y Evaluación de Experimentos para el Aprovechamiento de la Energía Solar ”

—————:o:—————

T E S I S

Para optar el Grado de Magister en Ciencias, Mención en:

F I S I C A

—————:o:—————

Presentada por:

JORGE GUILLERMO UGARTE BERRIO

LIMA • PERU • 1980

INDICE

	Página
RESUMEN -----	
INTRODUCCION -----	2
II DISEÑO Y EVALUACION DE EXPERIMENTOS -----	6
11.1 MOVIMIENTO DEL SOL -----	8
11.1.1 Exp. N° Determinación de un eje pa ralelo al eje de rotación de la tie rra -----	15
11.1.2 Exp. N° 2 Determinación de la latitud de un lugar y de la declinación del sol -----	19
11.1.3 Exp. N° 3 Sombra del sol en un plano	21
11.2 RADIACION SOLAR -----	26
11.2.1 Exp. N° 4 Medición de la radiación - solar por fundición del hielo -----	27
11.2.2 Exp. N° 5 Medición de la radiación - solar por calentamiento del agua ---	31
11.3 CONSTRUCCION DE SOLARIMETROS -----	36
11.3.1 Exp. N° 6 Uso de la celda solar como solarímetro -----	37
11.3.2 Exp. N° 7 Construcción de un solarí- metro blanco y negro -----	44
11.3.3 Exp. N° 8 Medición de la radiación - directa y de la difusa -----	53
11.4 COLECTOR SOLAR PLANO -----	59
11.4.1 Exp. N° 9 Potencia utilizable de un colector plano -----	60
11.5 CARACTERISTICAS OPTICAS DE MATERIALES OPACOS	68
11.5.1 Exp. N° 10 Determinación de la absor tancia de una superficie -----	71
11.5.2 Exp. N° 11 Determinación de la emi- tancia de una superficie	80

II.6	CONVERSION FOTOVOLTAICA -----	84
11.6.1	Exp. N° 12 Construcción de una celda solar de silicio -----	85
11.6.2	Exp. N° 13 Características de la celda solar -----	88
III	FORMACION DE UNA INFRAESTRUCTURA HUMANA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR -----	93
IV	CONCLUSIONES -----	101
	BIBLIOGRAFIA -----	104

RESUMEN

La presente tesis consta de cuatro capítulos, relativos al aprovechamiento de la energía solar.

En la introducción, partiendo de la premisa de que el petróleo está en vías de extinción se muestra como alternativa de solución el uso de la energía solar.

En el segundo capítulo, se diseñan y evalúan trece experimentos diversos, relacionados con la energía proporcionada por el sol.

Los primeros experimentos son relativos al movimiento aparente del sol. Después se determina la intensidad de la radiación solar por medio de experimentos sencillos y por medio de solarímetros desarrollados durante la tesis; luego se determinan la potencia y eficiencia de un colector solar plano, se miden absortancias y emitancias de superficies diversas y finalmente se construye una celda fotovoltaica de silicio monocristalino analizándose sus curvas características.

En el tercer capítulo se señalan algunas acciones que deben tomar las universidades, para iniciar la formación de una infraestructura humana para el aprovechamiento de la energía solar.

Termina el presente trabajo con algunas conclusiones que se han obtenido en el desarrollo de la tesis.

INTRODUCCION

Al ritmo actual de consumo, al petróleo le quedan apenas 30 o 40 años de vida. Aproximadamente igual al gas natural y 200 años de vida al carbón.

Debido al agotamiento, la extracción del petróleo se está volviendo cada vez más difícil. Se le busca bajo el mar o en sitios inhóspitos con el consiguiente aumento de costos.

Como las fuentes de combustibles fósiles parecían ilimitadas, no ha existido una planificación para encontrar nuevas técnicas que permitan la obtención de otras fuentes de energía.

La energía nuclear, a pesar de la gran esperanza que significó para la humanidad en su aprovechamiento pacífico, actualmente ocupa sólo una pequeña parte de la producción de la energía, no obstante el tiempo transcurrido desde el inicio.

Los reactores nucleares, necesitan grandes cantidades de agua para su enfriamiento. Para satisfacer un consumo futuro deberán estar ubicados en las orillas de los grandes ríos. La temperatura del agua se elevará, poniendo en peligro la vida de los peces.

El problema de la deposición final de los residuos queda sin resolver. Estos radioisótopos tienen una vida de más de 100,000 años.

Otro problema, que aún no se ha presentado será el ocasionado por el desmonte de las centrales nucleares, cuando hayan terminado sus servicios. No sería conveniente dejar estos monumentos como un peligro latente para las generaciones futuras.

La energía hidroeléctrica es considerada por muchos como

la forma más atractiva de la energía. Las centrales hidro-eléctricas son limpias, necesitan relativamente poco cuidado, no ocasionan polución y a menudo pueden incrementar el valor recreativo de la zona donde se encuentren ubicados.

En Europa y Norte América una parte importante del potencial hidroeléctrico ya está explotado. En cambio en Africa Central, América Central y Sud-América el potencial hidro-eléctrico disponible es elevado.

El uso de la energía solar a escala industrial representará una innovación en la historia de la humanidad.

Potencialmente la energía solar que llega a la tierra es capaz de satisfacer la demanda de energía del mundo.

El consumo mundial de energía en 1972 corresponde a la energía solar recibida en 22000 Km^2 de la superficie terrestre (0.005% del área de la superficie de la tierra), en el mismo período.

Para el hombre es beneficioso el uso de la energía solar. El equilibrio térmico de la tierra no se altera.

La conversión de energía solar en electricidad no beneficiará solamente a los países desarrollados, sino especialmente a los países económicamente atrasados, en los cuales se producirán profundos cambios estructurales. Los países atrasados son precisamente los que más energía solar reciben durante el año.

En el Perú, debido a sus condiciones geográficas: cercanía al ecuador y la altitud de gran parte del país, originan poca absorción de la radiación solar en la atmósfera. La radiación solar está muy por encima del promedio mundial.

Usando tecnología artesanal, se han construído calentadores de agua, secadores de alimentos y cocinas solares.

Para muchos puntos del país la energía hidro-eléctrica no ofrece solución satisfactoria, debido a la falta de caídas de agua o al costo elevado de cables de alta tensión y de transformadores eléctricos. Con el uso de la energía solar, en dichas zonas, es posible obtener refrigeradores solares (costa y selva), calentadores solares (tres regiones) secadores solares (tres regiones).

También es posible la construcción de "casas solares" (en las tres regiones), con diseños arquitectónicos adecuados, sin aumentar mucho el costo de construcción normal y con el uso de materiales de la región.

Debe Incentivarse el uso de la energía solar, formando una infraestructura humana, apoyando proyectos de investigación, proyectos de desarrollo industrial y proyectos de implementación de tecnología artesanal, ahora, sino mañana será demasiado tarde.

El final de este siglo será un período de enorme incremento en la producción de energía solar. Esta se convertirá en el principal elemento de la economía de muchos países.

Los costos actuales de utilización de la energía solar, todavía no son competitivos con las fuentes convencionales. Sin embargo es razonable esperar que el tiempo para conseguir energía solar sea más o menos corto y menos costoso de lo que fue la energía nuclear.

La utilización de la energía solar es quizás el mayor desafío afrontado por la humanidad. Una vez conseguido marcará un avance histórico, ya que la energía solar es incontaminante e inagotable.

La solución del problema es difícil, costoso y demorará tiempo.

Como un pequeño aporte para el inicio de dicha solución, desarrollo en la tesis los siguientes puntos:

- a) Diseño y evaluación de experimentos sencillos para conocimiento del movimiento del sol, radiación solar, colectores solares y transformación fotovoltaica.
- b) Formación de una infraestructura humana en el Perú, para uso de la energía solar.

II DISEÑO Y EVALUACION DE EXPERIMENTOS

En este capítulo se muestran numerosos experimentos que pueden servir para la preparación básica del personal humano necesario para el aprovechamiento de la energía solar.

Las características de los experimentos mostrados son.

- Bajo costo.
- Simples y de profundo contenido del fenómeno físico que se trata de explicar.
Pueden ser realizados en cualquier universidad, o en algunos casos en colegios del país.
- Los equipos construídos, pueden ser fácilmente reproducidos.

La serie de experimentos mostrados están agrupados en la forma siguiente:

- Movimientos del Sol (2.1) El Sol es el astro más importante de nuestro sistema planetario y la fuente de inagotable energía. Desde muy antiguo sus movimientos son conocidos por el hombre.
Sin embargo, muchos profesionales no conocen las características de sus movimientos durante el día y durante el año

Se realizan experimentos para la determinación de:

- eje paralelo al eje de rotación de la tierra.
- norte geográfico.
latitud del lugar y declinación del Sol.
- Radiación Solar (2.2) El conocimiento y la determinación del valor de la potencia radiante en un punto de la tierra es un dato indispensable para el estudio y utilización de la energía solar en dicho punto.

En el Perú se dispone de algunos datos aislados de la radiación solar.

Se realizan dos "métodos caseros" para la determinación de la radiación solar.

Se han construido dos solarímetros que pueden medir directamente el valor de la radiación solar. Con un aditamento también construido conocido con el nombre de "faja de sombra", es posible la medición de radiación difusa total o directa.

- Colectores (2.3) Con este experimento realizado en un colector pequeño de 40 x 40 cm, se muestra el fundamento del funcionamiento de los calentadores de agua y secadores solares, así como la determinación de la eficiencia y potencia máxima utilizable del colector.
- Características ópticas de materiales opacos (2.4) Los cuerpos casi negros tienen algunas propiedades características, con referencia a su comportamiento frente a la radiación solar.

Los experimentos nos muestran la forma de determinar la absorptancia y la emisividad de un cuerpo. De esta forma podremos encontrar las características de pinturas opacas, para su uso en los colectores solares

Conversión fotovoltaica (2.5) La serie de experimentos se concluye con la construcción de una celda solar de silicio y la determinación de sus características. eficiencia y potencia máxima.

11.1 MOVIMIENTO DEL SOL

Esfera Celeste. Es una esfera imaginaria de radio indefinido, sobre la cual parecen estar situados los cuerpos celestes.

El observador en la tierra es el centro de la esfera celeste.

En la Fig 2-1, el zenit es Z. El plano que pasa por O, perpendicular a OZ es el plano del horizonte. Corta a la esfera celeste en un círculo máximo NAS llamado horizonte celeste o simplemente horizonte.

Sea PQ un eje paralelo al eje de rotación de la tierra. P se llama polo Norte celeste o simplemente polo Norte. Q es el polo Sur.

El círculo máximo que pasa por Z y por P se llama círculo vertical principal o meridiano.

Sea X, la posición de una estrella en la esfera celeste, en un momento dado.

El ángulo $\text{AOX} = h$, medido en el arco AX, se llama altura de la estrella. La distancia zenital es el valor del arco XZ. Se tiene: $\text{XZ} = z = 90^\circ - h$.

El azimut de la estrella es el ángulo formado entre el meridiano y el círculo vertical que pasa por X o sea $a = \text{arco NA}$. La posición de una estrella, en cualquier instante puede ser determinada por su altura y su azimut.

Si llamamos ϕ , la latitud del lugar, entonces $\phi = \text{arc PN}$.

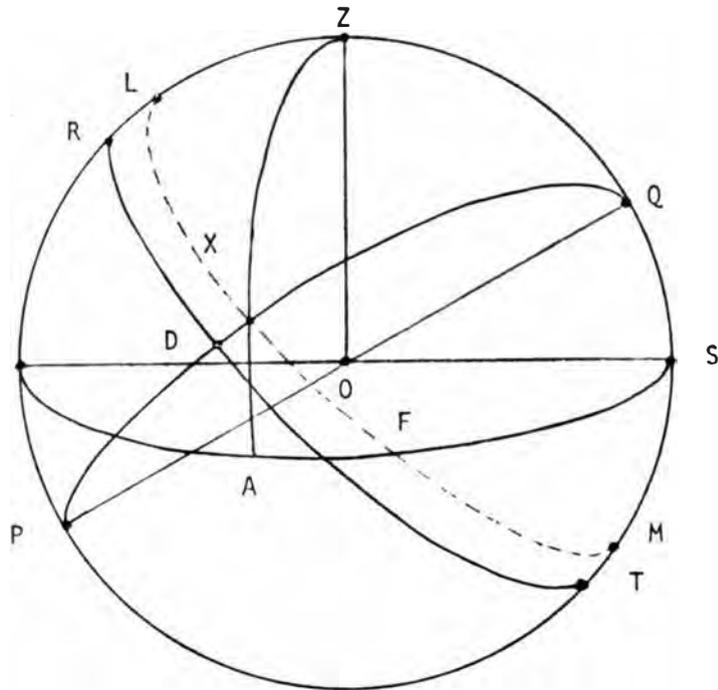


Fig. 2.1 Esfera Celeste

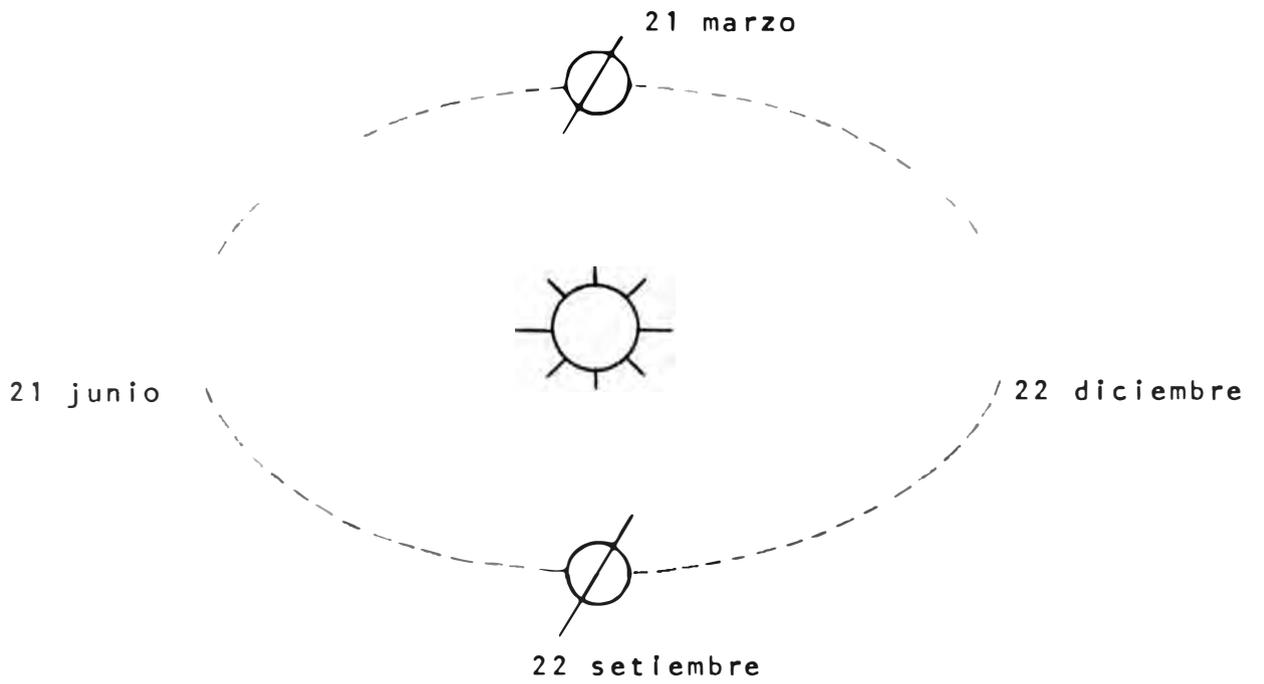


Fig. 2.2 Orbita de la Tierra

El círculo máximo RT, perpendicular al eje PQ, es el ecuador celeste, paralelo al ecuador terrestre.

La rotación de la tierra origina el movimiento aparente de la estrella en el círculo menor LXM, paralelo al ecuador celeste.

El ángulo DOX = δ , se llama declinación de la estrella (definición similar a la definición de latitud de un punto en la superficie de la tierra).

La distancia de la estrella al polo Sur será $p = 90^\circ - \delta$.

Cuando la estrella está en L, se dice que está en su culminación (en su mayor altura). En F la estrella cruza el horizonte (ocaso). En M llega a su punto más bajo con respecto a la horizontal.

El ángulo ROD = t , se llama ángulo horario.

Orbita de la tierra. La tierra se mueve en torno del sol en órbitas elípticas, dando una revolución completa en un año. El eje de la tierra no es perpendicular al plano orbital de la tierra (eclíptica), en consecuencia, el plano del ecuador está inclinado con respecto al de la eclíptica en aproximadamente 23.5° .

La inclinación del eje polar y del ecuador con respecto a la eclíptica, origina las estaciones debido a la distinta inclinación con que inciden los rayos solares sobre las diferentes latitudes terrestres, produciéndose calentamiento desigual de las mismas. El eje de la tierra permanece paralelo a sí mismo durante la traslación (Fig 2.2).

El 21 de marzo y el 22 de setiembre, el sol pasa por el

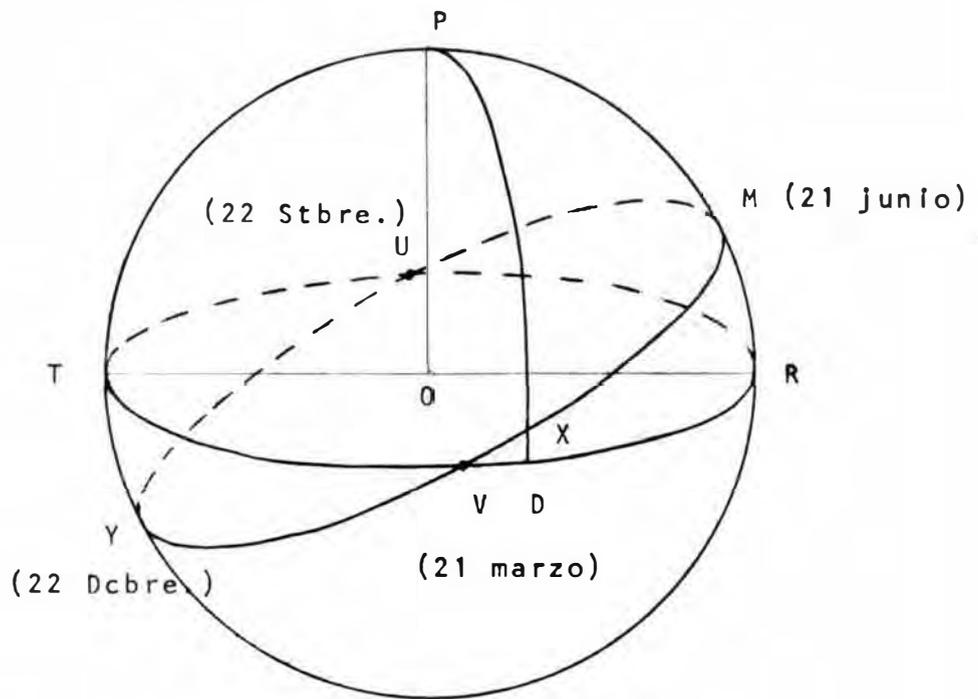


Fig. 2.3 Movimiento Anual del Sol

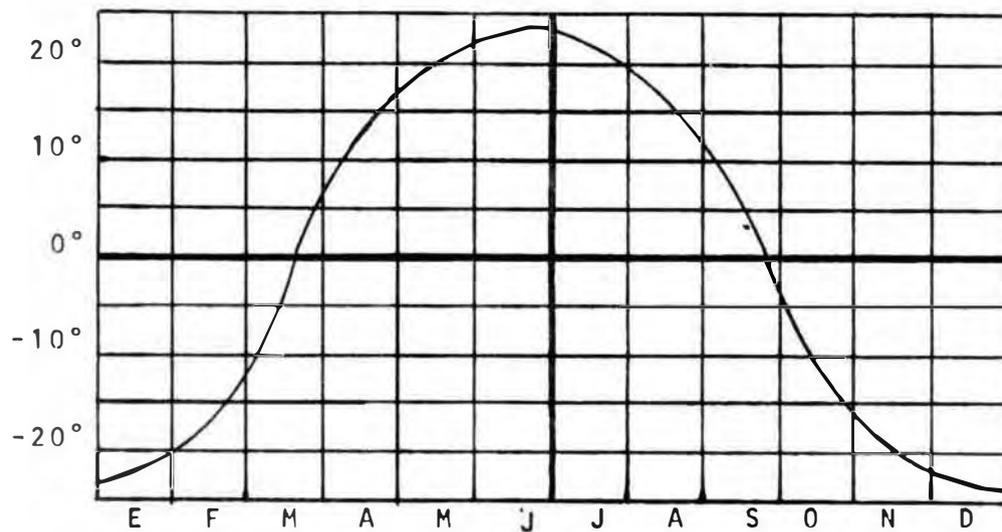


Fig. 2.4 Declinación del Sol

plano del ecuador. En todos los lugares de la tierra el día natural de luz es igual a la noche. Por esta razón estos dos puntos se llaman equinoccios.

Los puntos mas alejados corresponde al 21 de junio y 22 de diciembre. Toman el nombre de solsticios.

Movimiento del sol. Relativo a la tierra el sol aparece moviéndose en la esfera celeste a lo largo de la ecliptica YVMUY (Fig 2.3). Los puntos V i U son los equinoccios, los puntos M y Y son los solsticios. En los equinoccios la declinación del sol es cero, en los solsticios es aproximadamente 23.5° . En el punto X, la declinación del sol es el arco DX. Debido a que la órbita de la tierra alrededor del sol no es círculo, la variación de la declinacion del sol no es uniforme. Su valor puede ser calculado aproximadamente por medio de la fórmula de Cooper (Ref. 1)

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

donde n es el día del año.

Gráficamente la variación de la declinación del sol de enero a diciembre, puede observarse en la Fig 2-4.

Debido al movimiento de rotacion de la tierra (1 revolución en 24 horas) el sol aparece moviendose de Este a Oeste en circunferencias perpendiculares al eje de la tierra.

La Fig 2-5, nos muestra, para un punto del hemisferio Sur de latitud \emptyset , los movimientos del sol en diferentes epocas del año.

El 22 de diciembre el sol recorre la circunferencia LFM, el 21 de junio la circunferencia L'F'M'.

En los equinoccios el sol recorre la circunferencia RT.

En H aparece el sol (salida del sol) por el horizonte, llega a su culminación en L y pasa por su ocaso en F (puesta del sol). El día de luz corresponde al tiempo que demora el sol en su trayectoria HLF. La noche corresponde a la trayectoria FMH.

En el otro solsticio, el día de luz (H'L'F') tiene menor duración que la noche (F'M'H').

En el caso de la Fig 2-5, el sol nunca pasará por el zenit del lugar. Para puntos de la tierra con latitudes menores a 23.5° , el sol pasará dos veces al año por el zenit del lugar.

Los rayos del sol que llegan a un punto de la tierra describen en torno de la tierra un cono de ángulo LQ , cuyo valor será. $LQ = 90^\circ - \delta = p =$ distancia del sol al polo Sur (Fig 2-5).

Al pasar por un orificio los rayos solares reproducen el semi-cono (Fig 2-6).

En un papel colocado perpendicularmente al eje de rotación de la tierra, es posible marcar la trayectoria del sol, a escala reducida. Para inclinaciones diferentes del papel, la curva formada por los rayos del sol, será una cónica.

Debido al diámetro del sol (1.39×10^9 mts) a su distancia a la tierra (1.5×10^{11} mts), los rayos del sol no llegan paralelos entre sí a la tierra sino bajo un ángulo de $32'$.

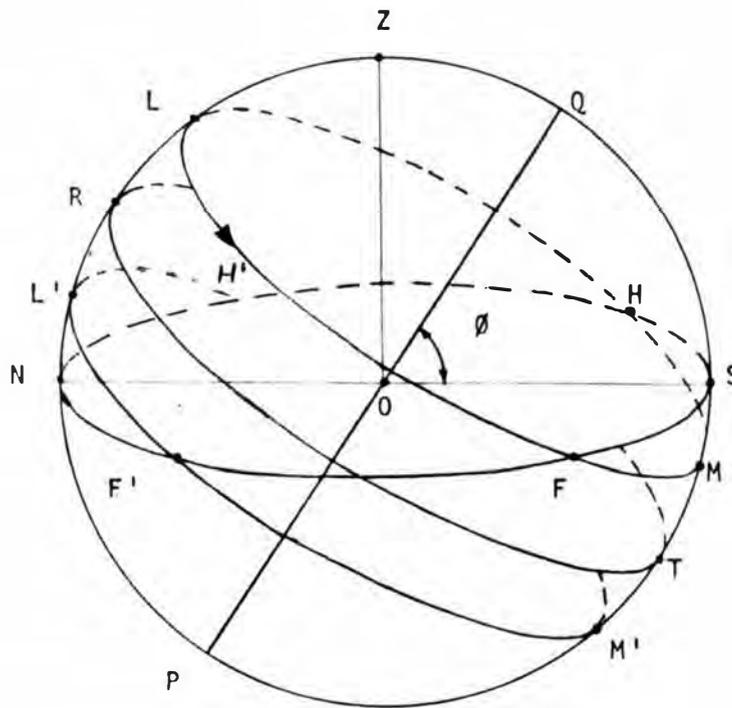


Fig. 2.5 Movimiento diario del Sol

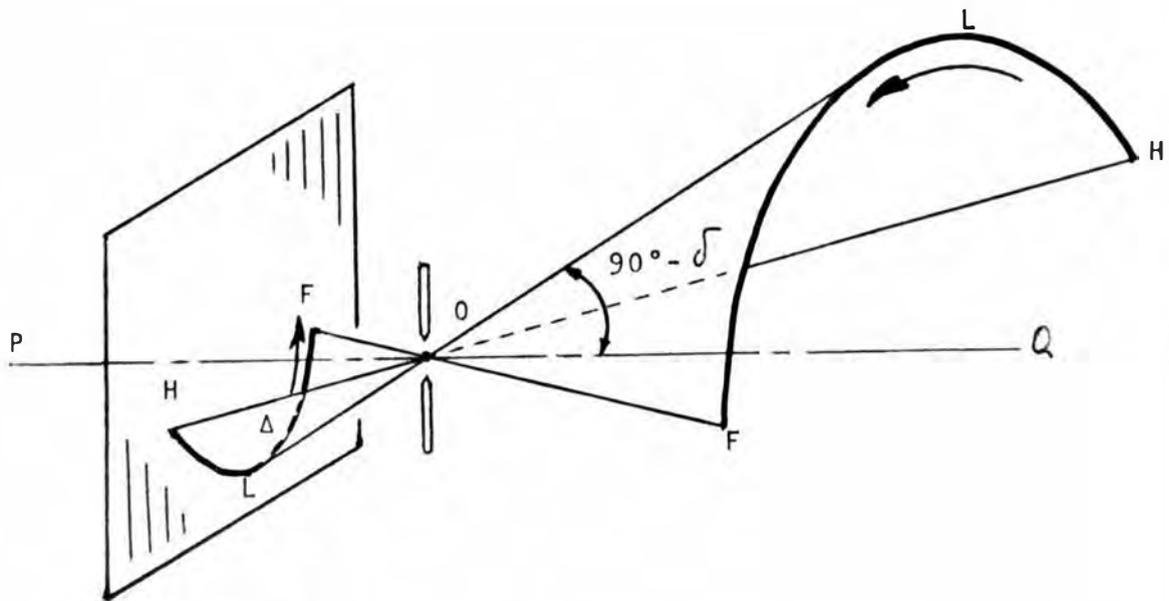


Fig. 2.6 Imagen de la trayectoria solar

11.1.1 Experimento No. 1. Determinación de un eje paralelo al eje de rotación de la tierra

En forma rápida es posible determinar la dirección del Norte por medio de una brújula. Sin embargo, una brújula apunta hacia el Norte magnético y hay una diferencia de algunos grados, llamado "declinación magnética" que varía de lugar a lugar, entre el Norte geográfico y el Norte magnético.

En forma más precisa la determinación del Norte geográfico fue determinado por el Ing. Alejandro Aquije, Profesor del D. A. de Topografía de la UNI, en el patio adyacente al Laboratorio de Energía Solar de la UNI, en la forma siguiente (Ref. 2):

a) Declinación del sol, obtenidos del Anuario publicado por la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. Para el día 15 de enero de 1980 fecha de determinación del Norte geográfico, los valores correspondientes del Anuario, para las dos horas más cercanas a la realización de las lecturas, son:

GMT	Hora Peruana	Declinación del sol
20 Hs	15 Hs	21° 09.7' Sur
21 "	16 "	21° 09.2'

b) Latitud del lugar. Se conoce la latitud de un pilar de concreto ubicado en la playa de estacionamiento adyacente al Departamento de Topografía (-12° 01'28"). Además por cada 31 mts en la dirección Norte Sur la latitud varía aproximadamente en 1". La latitud calculada para la ubicación de la estaca fue de: $\phi = -12^\circ 01'15''$ (latitud Sur).

c) Altura del sol. Se midió directamente con un teodolito.

En la Fig 2.1, el triángulo esférico a resolver es el QZX, en el cual:

ángulo ZQX = a = azimut del sol

ZX = z = 90° - h = distancia zenital del sol

QX = 90° - δ

QZ = 90° - φ

Para calcular el azimut, usamos el teorema de los cosenos:

$$\cos(90^\circ - \delta) = \cos(90^\circ - \phi) \cos z + \sin(90^\circ - \phi) \sin z \cos a.$$

$$\sin \delta = \sin \phi \cos z + \cos \phi \sin z \cos a$$

$$\text{Despejando: } a = \cos^{-1} \frac{\sin \delta - \sin \phi \cos z}{\cos \phi \sin z}$$

Conociendo el azimut del sol es posible determinar con una rotación adecuada del teodolito la dirección Sur a partir de la estaca (materialización del eje vertical del teodolito).

d) Mediciones efectuadas. Con el fin de corregir errores instrumentales del teodolito, y de tener un menor error se efectuaron seis mediciones de la altura del sol y sus correspondientes ángulos horizontales con lectura directa del teodolito y seis mediciones con lectura inversa.

Temperatura = 32°C

Posición	Hora legal	Ang. Horiz. sol	Ang. Vert. sol	Ang. Horizontal referencia
D				216 07" 47"
				36 07' 47"
	15 ^h 24 ^m 39 ^s	11° 34' 44"	314° 32' 38"	
	25 ^m 43 ^s	36' 16"	17' 36"	
	26 ^m 33 ^s	37' 18"	05' 50"	
	27 ^m 21 ^s	38' 10"	313 354" 45"	
	28 ^m 03 ^s	39' 04"	45' 16"	
	29 ^m 05 ^s	40' 13"	30' 38"	
D	30 ^m 30 ^s	191° 41' 46"	46° 49' 17"	
D	31 ^m 47 ^s	42' 49"	47' 07' 05"	
D	32 ^m 45 ^s	43' 40"	20' 42"	
D	33 ^m 31 ^s	44' 22"	31' 10"	
D	34 ^m 22 ^s	45' 13"	43' 23"	
D	35 ^m 41 ^s	46' 32"	48' 01' 47"	

e) Correcciones. En las lecturas de las alturas del sol, deben efectuarse dos correcciones importantes, por refracción y por paralaje.

La corrección por refracción es debida a la desviación de los rayos del sol al atravesar la atmosfera. La fórmula usada es: (Ref. 3).

$$r = \frac{p}{760} \left(\frac{270}{270 + t} \right) (60 - 1'' \operatorname{tg} z - 0.072'' \operatorname{tg}^3 z)$$

siendo p = la presión atmosférica en milímetros de mercurio
 t = la temperatura en °C.

La corrección por paralaje, es para reducir al centro de la tierra, la medición efectuada en un punto de la superficie. La fórmula usada es: (Ref. 3)

$$p = p_h \text{ sen } z'$$

p_h paralaje horizontal = 8.8"

z' distancia zenital observada

Efectuando operaciones, y las correcciones indicadas el valor del azimut del sol es: $a = 96^{\circ}36'18'' + 1.4''$.

El mismo día 15 de enero, calculado el valor del azimut con la ayuda del teodolito, se marcó con una línea vertical fina, en el muro del laboratorio, el Sur geográfico. Rotando 180° el teodolito se marcó en el muro de enfrente, con otra línea vertical fina, el Norte geográfico.

Biblioteca

Lab.
E. Solar



Lab.
F. General

Fig. 2.7 Eje paralelo al de rotación de la Tierra.

Como la distancia entre los puntos N y S es de 9.48 mts. $SL = NS$, $\tan \theta = 2.02$ mts NL es el eje paralelo al eje de rotación de la tierra. L pasa justamente por una ventana de vidrio del laboratorio de Energía Solar. Con la determinación del eje paralelo al de rotación de la tierra, fue posible comprobar el funcionamiento del heliostato, que hasta entonces no reflejaba los rayos del sol por un mismo punto

11.1.2 Experimento No. 2. Determinación de la latitud del lugar y de la declinación del sol. Considerando la

Considerando la esfera celeste como una esfera de radio unitario, la posición del sol en cualquier instante queda determinada por dos ángulos: θ y ϕ (coordenadas esféricas). Por medio de un aparato que proporcione ángulos verticales y horizontales, es posible medir los ángulos θ y ϕ en tres posiciones distintas del sol: A, B y C.

Como la trayectoria del sol es perpendicular al eje de rotación de la tierra, la dirección del sur será la misma que la del vector $\vec{AB} \times \vec{BC}$.

Conocida esta dirección, la latitud del lugar también queda determinada como complemento del ángulo formado entre la vertical del lugar y la dirección Sur.

En 2.1 vimos que los rayos del sol que llegan a un punto de la tierra describen un cono de ángulo $90^\circ - \delta$ (Figs 2.2 y 2.6). En consecuencia podemos escribir

$$\cos (90^\circ - \delta) = \vec{OQ}$$

que nos permite calcular la declinación del sol.

El experimento se efectuó el día 10. de febrero de 1980 con las siguientes mediciones:

Punto	Hora	α	\varnothing	$\theta = 90 - \alpha$	$\varnothing - \varnothing - 16$
A	9 ^h 37 ^m	50.2°	172°	39.8°	156°
B	12 ^h 30 ^m	84.9°	113.2°	5.1°	97.3°
C	15 ^h 37 ^m	41.7°	16°	48.3°	0

Las coordenadas cartesianas y las esféricas están relacionadas por las fórmulas: (para $r = 1$)

$$\begin{aligned} x &= r \operatorname{sen} \theta \cos \varnothing \\ y &= r \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \varnothing \\ z &= r \cos \theta \end{aligned}$$

$$\cos \theta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$\operatorname{tg} \varnothing = \frac{y}{x}$$

Haciendo reemplazos y efectuando operaciones.

Dirección del Sur:

$$\vec{AB} \times \vec{BC} = 0.077 \vec{i} + 0.357 \vec{j} + 0.076 \vec{k}$$

Los ángulos correspondientes a esta dirección.

$$\theta = 78.2^\circ$$

$$\varnothing' = 77.8^\circ \text{ con referencia al punto C}$$

$$\varnothing = 93.8^\circ \text{ con referencia a la posición inicial del goniómetro}$$

$$\text{Latitud del lugar} = 90 - 78.2 = 11.8^\circ \pm 1$$

$$\text{Declinación del sol} = 16.8^\circ \pm 1^\circ$$

Comentarios. Con este experimento también es posible de terminar la dirección de un eje paralelo al de rotación de la tierra, orientando el goniómetro en la dirección indicada por $\theta = 78.2^\circ$, $\varnothing = 93.8^\circ$.

Los resultados obtenidos son aproximados. El goniometro utilizado tiene las siguientes aproximaciones.

ángulos horizontales: 0.5"
ángulos verticales 0.25"

Es un aparato adaptado de un equipo antiguo en desuso.

El experimento ayuda a comprender el movimiento diario del sol y la existencia de un eje de rotación de la tierra

Es posible hallar valores más exactos usando goniómetro con lectura de ángulos horizontales y verticales en segundos de arco y haciendo las correcciones de refracción de los rayos del sol y del paralaje.

11.1.3 Experimento No. 3. "Sombra" del sol en un plano.

Es muy conocido el método de determinar la dirección del Norte geográfico en un punto de la tierra por medio de la sombra de un palo plantado en el suelo (Fig 2.8). OA es la sombra del palo antes de que el sol llegue a su culminación. AB es un arco de circunferencia trazado en el suelo, con centro en O (por medio de una cuerda o lienza).

Cuando la sombra del palo toque nuevamente la circunferencia trazada en el suelo, después que el sol haya pasado por su culminación (en el punto B), la bisectriz OC nos da la dirección Norte-Sur buscada.

En el presente experimento reemplazamos el palo por un orificio pequeño en una lámina metálica. Por este orificio pasarán los rayos del sol, que nos darán su "sombra" en una cartulina colocada horizontalmente sobre una mesa (Fig 2.9).

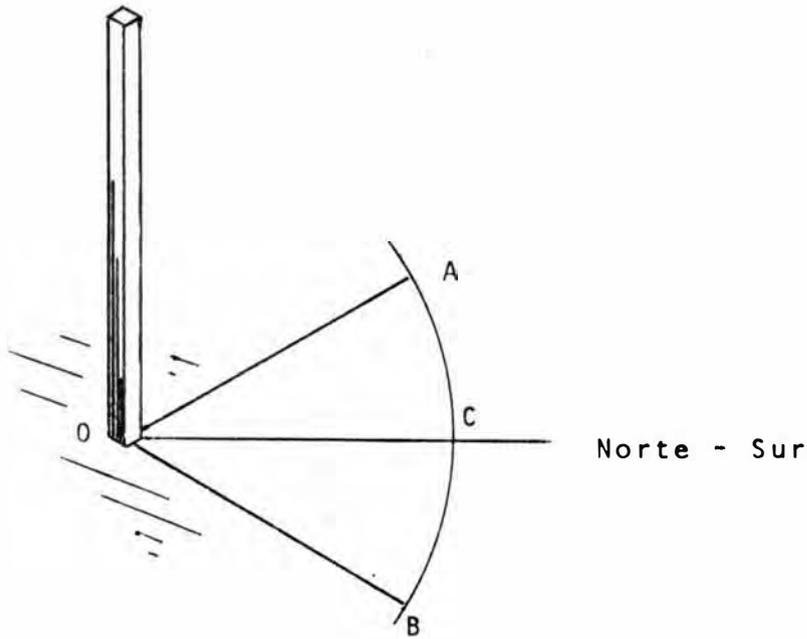


Fig. 2.8 Determinación del Norte por medio de la sombra de un palo

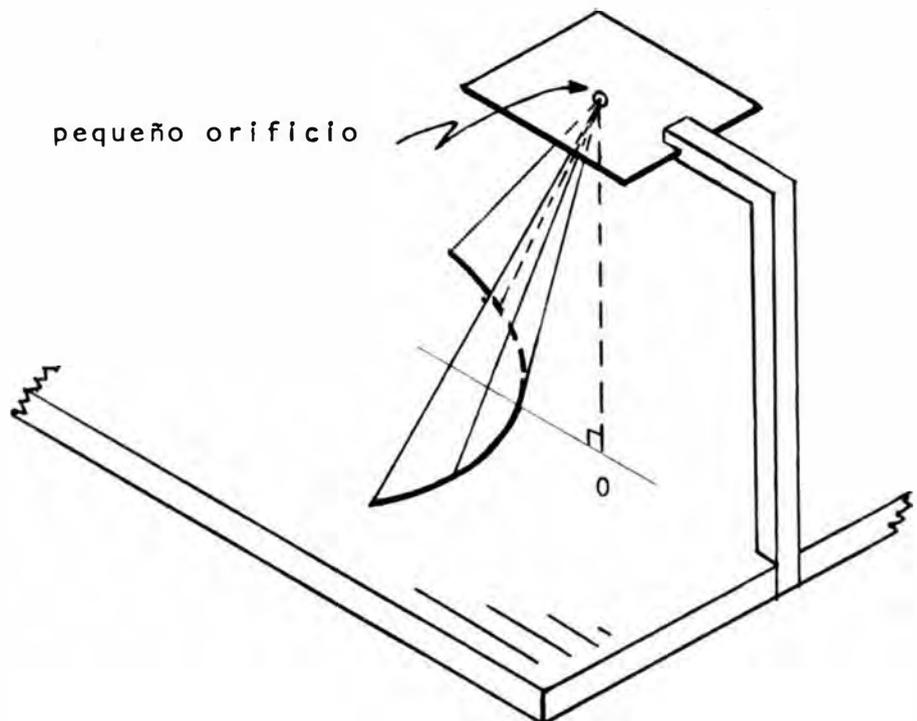


Fig. 2.9 "Sombra" del Sol en un plano horizontal

Al cambiar el sol de posición, también lo hace su "sombra" en la cartulina horizontal, describiendo una conica.

El experimento se realizó el 23 de enero de 1980 y desde el inicio a las 10^h20^m hasta su finalización a las 14^h15^m se marcaron en la cartulina las posición de la "sombra" del sol cada cinco minutos, habiéndose obtenido, a escala natural el gráfico mostrado en la Fig 2.10.

En dicha cartulina, también se han dejado claramente marcados: el punto 0 que es pie de la perpendicular que pasa por el pequeño orificio y la dirección del N-S, obtenida días antes, por el Ing. Aquije.

De la Fig 2.10 se pueden deducir los siguientes resultados:

a) Dirección Norte-Sur geográfico, está dada por el eje de conica. Dicho eje pasa por el punto 0, pie de la perpendicular del pequeño agujero en la cartulina. El eje de la cónica es bisectriz del ángulo con vertice en 0 y los puntos de intersección entre la cónica y una circunferencia cualquiera con centro en 0.

La bisectriz trazada gráficamente forma un ángulo de 37' con la dirección Norte-Sur obtenida con ayuda de un teodolito.

b) Hora en que el sol pasa por su culminación. La culminación del sol corresponde al punto C de la Fig 2.10. El 23 de enero de 1980, el sol pasó por su culminación a las 12^h23^m, para un observador ubicado en el pabellón de Física

c) Latitud del lugar y declinación del sol. De la Fig 2.10, podemos deducir los ángulos θ , ϕ , correspondientes a los puntos A, C y B.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{d}{h}$$

siendo d = distancia del punto 0 a los puntos A, C o B.

h distancia del pequeño agujero a la cartulina = 84.8cm

El ángulo θ , lo tomamos con referencia al eje OA. Puede ser medido directamente en la cartulina.

Se han obtenido los siguientes valores.

Punto	Hora	d	h	θ	
A	10 ^h 25 ^m	48cm	84.8cm	29.5'	0
C	12 ^h 23 ^m	10.2cm	84.8cm	6.8	72.5
B	14 ^h 21 ^m	48 cm	84.8cm	29.5'	145

Efectuando las operaciones ya conocidas (Experimento No.2), obtenemos:

$$\text{Latitud del lugar} = 12.9^{\circ} +$$

$$\text{Declinación del sol} = 20.2^{\circ} \pm 1.5$$

Comentario. El experimento puede ser realizado en cualquier parte, sin gasto alguno y sin uso de instrumentos. Solo se necesita la iluminación del sol durante algunas horas (antes y después de su culminación). Determina la dirección Norte Sur geográfico con buena aproximación (menor a 1 grado).

Para obtener valores más aproximados de la latitud del lugar y de la declinación del sol, deben efectuarse mediciones más precisas de h y d . así como asegurar la horizontalidad de la cartulina.

La "sombra" del sol en una cartulina colocada perpendicularmente al eje de la tierra, debe ser una trayectoria circular. Sin embargo no es posible efectuar esta comprobación cuando la declinación del sol es pequeña.

11.2 RADIACION SOLAR

Antes de iniciar el análisis y evaluación de los experimentos realizados, daremos algunas definiciones de conceptos frecuentemente usados: (Ref. 4).

Constante Solar. La superficie del sol está a una temperatura aproximada de $5,760^{\circ}\text{K}$; mientras que la temperatura de su parte central es estimada entre 8×10^6 a 40×10^6 K. La densidad es de 80 a 100 veces la del agua.

La constante solar es la energía promedio por unidad de tiempo, proveniente del sol y recibido en una superficie perpendicular a la radiación, en un punto del espacio a una distancia igual a la distancia media de la tierra al sol. Un valor standard propuesto en 1971 por Theakara y Drumod es de 1353 W/m^2 (equivale a $1940 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$, a $428 \text{ BTU/pe}^2 \text{ hora}$ o $4871 \text{ KJ/m}^2 \text{ hora}$) fuera de la atmósfera.

La radiación sufre atenuación al atravesar la atmosfera para llegar a la tierra, debido a la absorción por O_2 , O_3 , H_2O , CO_2 , N, moléculas de aire, polvo, etc. (El ozono absorbe al ultravioleta y el agua al infrarrojo). Para aplicaciones de energía solar, solamente radiaciones comprendidas entre $0.29\mu\text{m}$ y $2.5 \mu\text{m}$, necesitan ser consideradas.

Radiación Directa. Es la recibida del sol sin cambio de dirección.

Radiación Difusa. Es la recibida del sol después que su dirección ha cambiado por reflexión y dispersión. Aun en tiempos de cielos muy claros existe alguna radiación difusa. En tiempos de nubes oscuras que tapen al sol, la radiación que llega a tierra es completamente difusa.

Medición de la radiación solar Para medir la radiación directa se usa el pireheliómetro, que mide la radiación solar de una pequeña porción del cielo, incluyendo al sol a incidencia normal. Para medir la radiación total (directa más la difusa), se usan aparatos denominados piranómetros o solarímetros, colocados usualmente sobre una superficie horizontal.

11.2.1 Experimento No. 4. Medición de la radiación solar por fundición del hielo.

En este experimento se determina el valor de la radiación solar, midiendo la cantidad de hielo fundido, expuesto a los rayos solares durante un cierto tiempo. (Ref. 5).

Tiene la ventaja de poder ser realizado en cualquier parte, pues los materiales así como los aditamentos usados son fáciles de obtener. Además el costo del experimento es muy pequeño.

Los materiales a utilizarse son.

Dos pequeñas tasas de plástico

- Dos discos de aluminio de 5 cm de diámetro. Uno de ellos pintado de negro en una de sus caras.

Una jeringa de plástico graduada de 10 cm³.

- Un reloj con secundario.

Además se debe tener acceso a una refrigeradora y a una fuente de agua.

Procedimiento. Las dos tasas con $2/3$ partes de su capacidad con agua se colocan en el congelador, hasta conseguir la completa solidificación del agua.

Los discos de aluminio se ponen sobre el hielo uno en cada tasa, cuidando de que la cara pintada quede hacia el sol. Antes de iniciar el conteo debe eliminarse toda el agua, producto del hielo fundido en ambas tasas. El hielo debe encontrarse a 0°C .

Las dos tasas deben de colocarse en forma de recibir los rayos solares perpendicularmente a la superficie del aluminio durante 60 segundos de tiempo.

Con la jeringa medir el hielo fundido en cada tasa. Repetir el experimento durante unos quince minutos

Puede ser conveniente iniciar el experimento con una tasa dos minutos antes de la otra, para medir el tiempo y la cantidad de hielo fundido, sin interferencia. En un intervalo de catorce minutos, es posible efectuar cuatro mediciones en cada tasa. Para no inclinar mucho la tasa, se recomienda efectuar el experimento cerca del mediodía.

Fundamento. El calor necesario para fundir una masa de hielo es proporcionado por el disco de aluminio (que absorbe energía del sol) y por el medio ambiente.

El disco negro absorbe cerca del 85% de la energía del sol, mientras que el disco sin pintar absorbe cerca del 15% (datos de la literatura). La energía absorbida del medio ambiente es la misma para ambas tasas.

Llamemos m_n y m_a las masas de hielo fundido con los discos negro y sin pintar, respectivamente. Podemos escribir las si

siguientes ecuaciones:

$$0.85S + \text{calor medio ambiente} = m_n L$$

$$0.15S + \text{calor medio ambiente} = m_a L$$

Donde S es la energía que llega del sol a cada disco en el tiempo t, L es el calor latente de fusión del hielo y cuyo valor conocido es de 80 cal/gr.

Restando miembro a miembro las dos ecuaciones.

$$0.7S = (m_n - m_a) L$$

El valor de la radiación solar en la fecha, lugar y tiempo en que se efectuó el experimento sera.

$$\text{Radiación Solar} = \frac{S \text{ en calorías}}{(\text{área disco en cm}^2) t \text{ en minutos}}$$

Mediciones efectuadas. El experimento se realizó el 25 de febrero de 1980 en el patio del Laboratorio de energía solar del D.A. de Física de la UNI, con los resultados siguientes.

Diaámetro de los discos de aluminio = 5.2 cm

Area de cada disco de aluminio = 21.2 cm²

Como dato de referencia: inicio del experimento 11h 50m

t (minutos)	m_n (cm ³)	m_a (cm ³)
2	7	
2		6.5
2	7.25	
2		6.5
2	7.25	
2		6.75
2	7	
2		6.25

m_n 7.125 cm³ m_a 6.5 cm³ Como 1 cm³ de agua = 1 gr de agua

$$S = \frac{(m_n - m_a) L}{0.7} = 71.4 \text{ calorías}$$

Radiación solar 1.7 cal/cm² minuto [±] 20% (estimativo).

Observaciones. Las mediciones de las masas de hielo fundidas o lo que es lo mismo sus volúmenes, deben de ser efectuadas con sumo cuidado.

Presentamos una alternativa a este experimento, con el objeto de obtener el valor de la radiación solar con mayor aproximación:

Consiste en colocar los dos vasos con un pequeño orificio en su parte inferior, encima de dos probetas graduadas, midiendo cada cierto intervalo de tiempo las masas m_n y m_a en forma acumulativa.

Las probetas deberán estar cubiertas de material aislante, con el fin de evitar pérdidas de agua por calentamiento salvo en los sitios de lectura de los volúmenes.

11.2.2 Experimento No. 5. Medición de la radiación solar por calentamiento del agua.

Es otro experimento sencillo que nos permite medir la radiación solar, en el instante en que se efectúa el experimento, por medio del calentamiento del agua en un pequeño recipiente. (Ref. 6).

Los materiales a utilizarse son.

- Un recipiente circular de 15 a 20 cm de diámetro y 3 a 5 cm de profundidad, pintado en su parte interior con pintura negra, no soluble en agua, con una absorptancia estimada en $\alpha = 0.85 - 0.05$.

- Un termómetro de mercurio con lectura de 10 C a 35 C.

- Una balanza de 1 Kg

--Una regla graduada

- Un cronómetro

El recipiente con agua y el termómetro se disponen en la forma indicada en la Fig 2.11.

El calor ganado por el recipiente con agua en un tiempo Δt , es igual al calor recibido del sol en el mismo lapso.

$$m c \frac{\Delta T}{\Delta t} = \alpha I A \sin \theta - \text{perdidas}$$

m = masa equivalente del recipiente con agua (en gramos)

c = calor específico del agua ($c = 1 \text{ cal/gr}$)

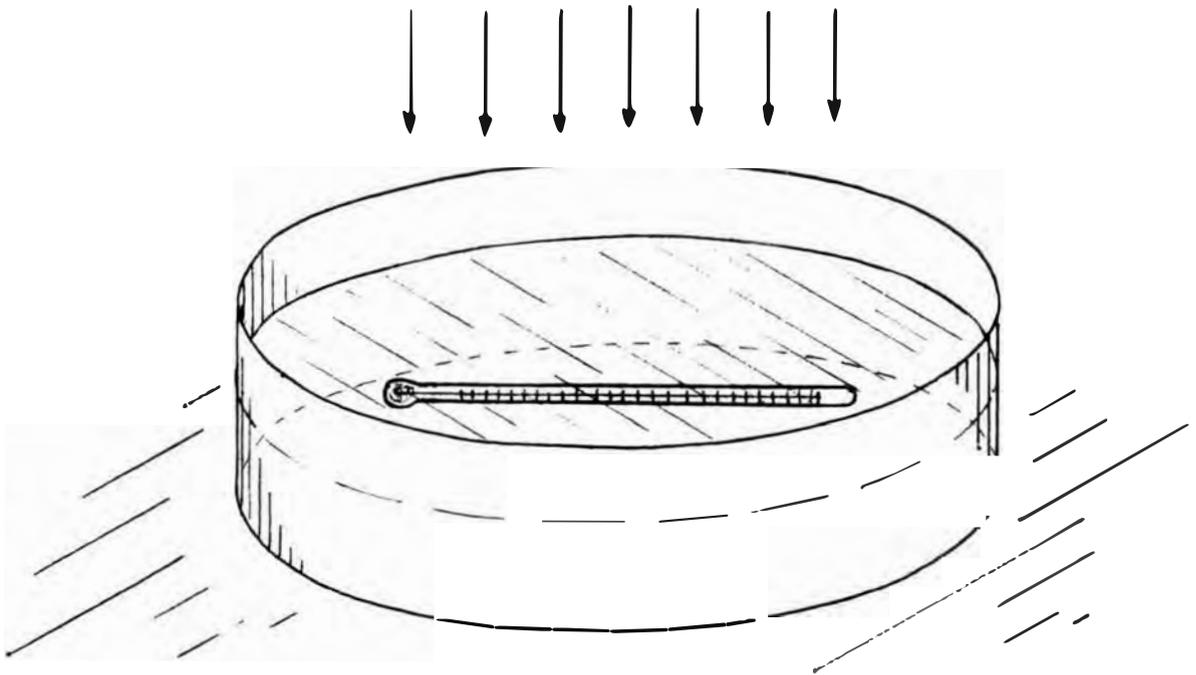


Fig. 2.11 Disposición de equipo

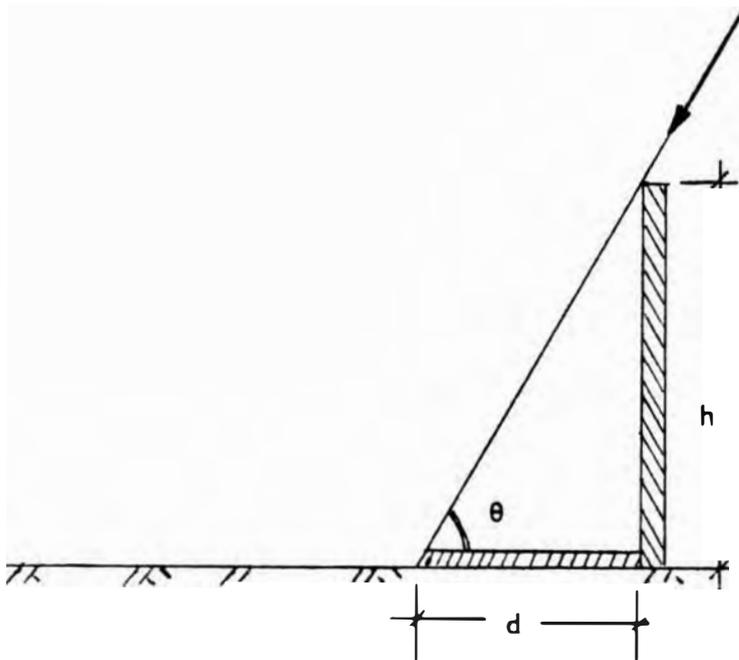


Fig. 2.12 Angulo de elevación del Sol

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ variación de la temperatura del agua en °C/seg

= radiación solar que deseamos medir en W/cm²

A área del recipiente en cm²

θ = ángulo de elevación del sol

J = equivalente mecánico del calor 0.24 cal/W seg

La medición de $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, la efectuamos en el instante en que la temperatura del agua iguale a la del medio ambiente. En ese instante las pérdidas de calor entre el agua y el medio ambiente por convección y radiación es nula.

La radiación solar será: $= \text{cm} \frac{\Delta T}{\Delta t} / \alpha A \text{ sen } \theta J.$

Mediciones efectuadas El experimento se realizó el 5 - de marzo de 1980, a las 10^h30^m, en el patio adyacente al laboratorio de energía solar.

Masa del recipiente: $m'_r = 50.8 \text{ gr}$

Calor específico del recipiente. $c = 0.09 \text{ cal/gr } ^\circ\text{C}$

Masa equivalente del recipiente. $m'_r \times c_r = 4.57 \text{ gr}$

Masa del agua (200 cm³) = 200 gr

Masa equivalente total: $m = 204.57 \text{ gr}$

Temperatura medio ambiente: 28°C

Diámetro del recipiente = 11 cm, luego $A = 95 \text{ cm}^2$

Altura barra vertical (Fig 2.12) $h = 102 \text{ cm}$

Longitud sombra de la barra. $d = 50 \text{ cm}$

$$\text{sen } \theta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + d^2}} = 0.9$$

Para la determinación de $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, es conveniente dibujar un gráfico del tiempo t versus la temperatura T que va alcanzando el agua en el recipiente cilíndrico, por efecto de la radiación solar. Esta temperatura se lee en el termómetro colocado en

en el fondo del recipiente, sin necesidad de moverlo. La temperatura inicial del agua debe ser menor que la del medio ambiente. La temperatura final del agua debe sobrepasar la del medio ambiente.

Temp. Agua (°C)	Tiempo (seg)
25.2	0
25.5	50
26.0	112
26.5	187
27.0	239
27.5	290
28.0	352
28.5	415
29.0	491
29.5	617
30.0	695
30.5	818
31.0	948
31.5	1070

Con estos datos se ha dibujado el gráfico de la Fig 2.13, del cual deducimos $\frac{\Delta T}{\Delta t} = 8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/seg.}$

Finalmente, reemplazando valores llegamos a. 0.09 W/cm^2
+ 20%.

Comentario. Los dos últimos experimentos para la determinación de la radiación solar, pueden ser considerados como "caseros". Nos proporcionan valores con una aproximación que estimamos es del orden del 20%. Pero en forma sencilla sin gasto y sin uso de equipos costosos, nos proporcionan órdenes de magnitud del valor de la radiación, en determinado espacio y tiempo.

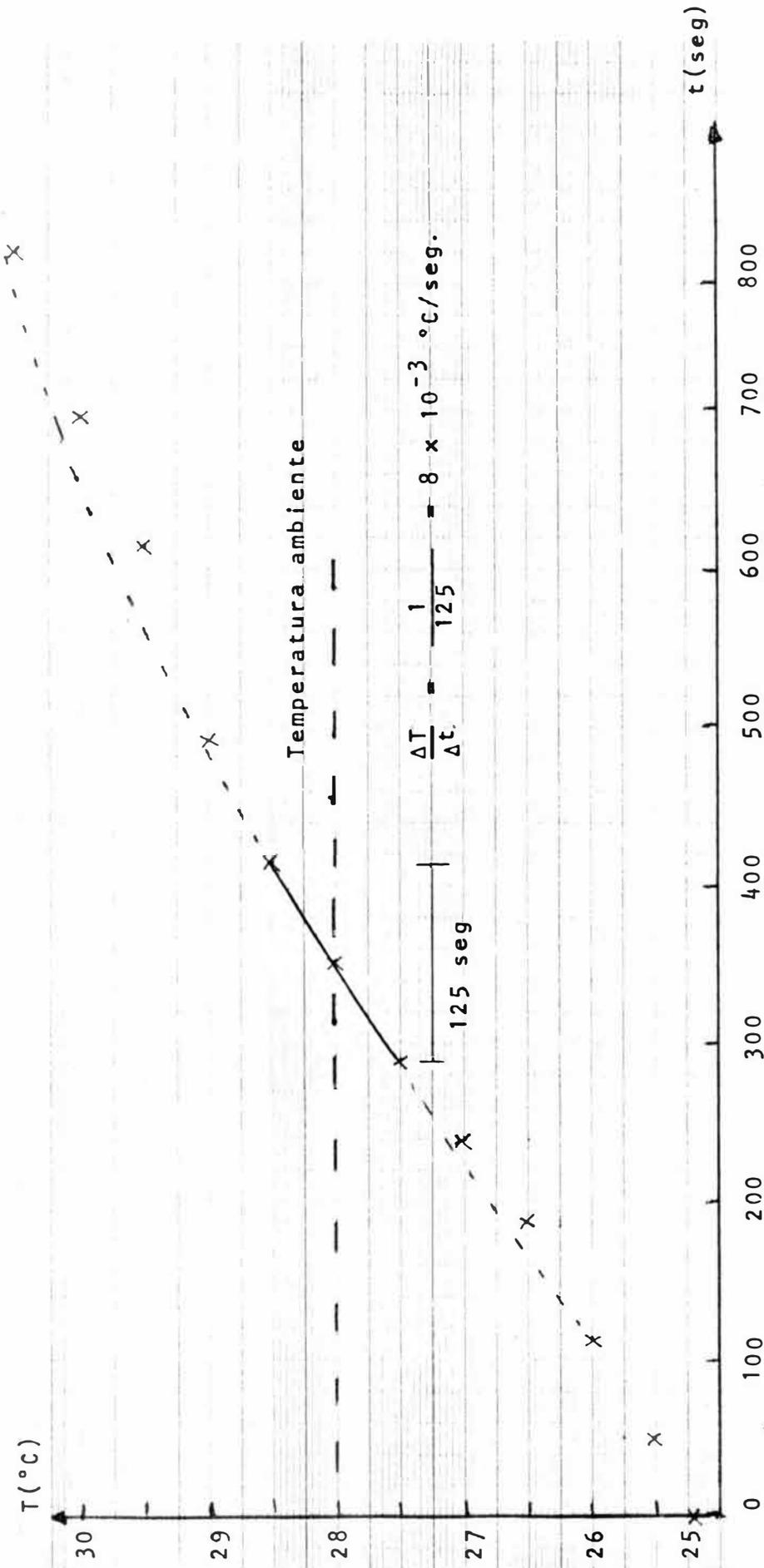


Fig. 2.13 Calentamiento del agua (T) vs tiempo (t)

Los valores de m , A y $\sin \theta$ son fáciles de encontrar. La determinación de $\frac{\Delta T}{\Delta t}$, o sea la variación de la temperatura del agua por unidad de tiempo, en el instante en que su temperatura esté igualando a la del medio ambiente es muy importante.

Chapin (autor de la referencia) (Ref. 6) recomienda usar vidrio limpio y transparente para tapar el recipiente con el fin de evitar pérdidas por evaporación del agua. Sin embargo debemos tener en cuenta que el vidrio refleja una pequeña parte de los rayos del sol.

Es conveniente efectuar el experimento, en el menor tiempo con el fin de que las pérdidas por evaporación sean despreciables.

El valor del ángulo de elevación, que varía constantemente debido al movimiento del sol, debe ser tomado lo más cercano posible al instante en que la temperatura del agua iguala a la del medio ambiente.

Por ser pequeño, se ha despreciado el equivalente en agua del termómetro.

11.3 CONSTRUCCION DE SOLARIMETROS

El solarímetro es un aparato indispensable en todo laboratorio de energía solar. Sin embargo, ninguna de las universidades peruanas, posee este aparato.

El costo CIF Callao, sobrepasa los 800 dólares. El Departamento Académico de Física de la UNI hace ya más de un año ha comprado un solarímetro Eppley, que aún no llega, no obstante el tiempo transcurrido.

Como parte del trabajo de la presente tesis se han construí

do y calibrado dos solarímetros, que están en funcionamiento y que prestan servicios no sólo a Física sino especialmente a otros Departamentos Académicos.

Son de costo muy bajo, fáciles de construir en cualquier zona del Perú con error menor al 10% que es suficiente para la gran mayoría de mediciones a efectuarse.

11.3.1 Experimento No. 6. Uso de la celda solar como solarímetro.

Cuando una célula solar recibe un rayo de luz de suficiente energía, se produce energía eléctrica.

Al variar la radiación solar que llega a una celda, varía también la corriente que se puede obtener de ella. Tal como es discutido con más detalle en el experimento No. 13, la corriente de una celda fotovoltaica en corto circuito es proporcional a la intensidad de la radiación solar incidente. Esta es propiedad utilizada en la construcción de solarímetro. Mide la radiación solar en forma indirecta: midiendo la corriente producida en la celda.

Los materiales y accesorios usados en la construcción son los siguientes:

- Una celda solar. Se utilizó una celda cuadrada de 1 x 1cm fabricada por Edmund Scientific Co.

- Un amperímetro de 0-1 m A.

- Un hemisferio de vidrio, obtenido de un foco quemado, por medio de un alambre de micrón al rojo vivo.

- Una caja metálica de plancha de aluminio de 1 mm de espesor.

El hemisferio de vidrio descansa sobre la caja metálica a través de un anillo de aluminio, con el cual está pegado con pegamento a base de silicón, que "absorbe" la menor dilatación del vidrio con respecto al aluminio. La celda solar está pegada a un disco de aluminio de igual diámetro que la parte interior del hemisferio.

- Circuito interior de resistencias, con el fin de conseguir un "cortocircuito" y a la vez, que la radiación solar máxima no sobrepase la lectura máxima del amperímetro.

Los detalles y dimensiones del solarímetro pueden observarse en las Figs 2.14 y 2.15.

Calibración. Se efectuó comparando las lecturas del solarímetro con las proporcionadas por un radiómetro Eppley PSP de constante $10.26 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$, facilitado al Departamento de Energía y Mecánica por ITINTEC, durante los días 13 y 14 de marzo de 1980.

El radiómetro Eppley, usado como patrón, no proporciona directamente la lectura de la radiación solar. Esta conectado a un integrador Eppley EPLAB que indica en su tablero de lecturas la energía radiante acumulada en Wh/m^2 . Este integrador a su vez está conectado a un registrador 6140HT que registra en una cinta de papel la energía acumulada de Wh/m^2 , - cada minuto de tiempo.

De las lecturas tomadas durante dos días, con diferentes intensidades instantáneas de la radiación, el resumen final de los datos obtenidos es el siguiente.

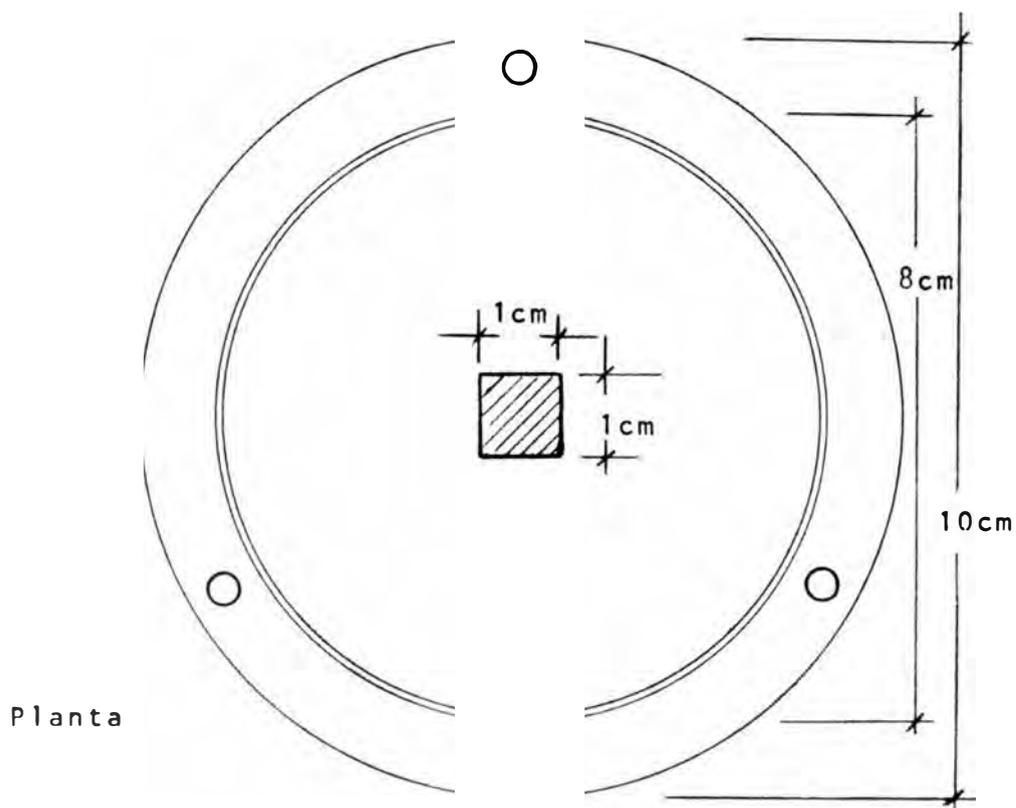
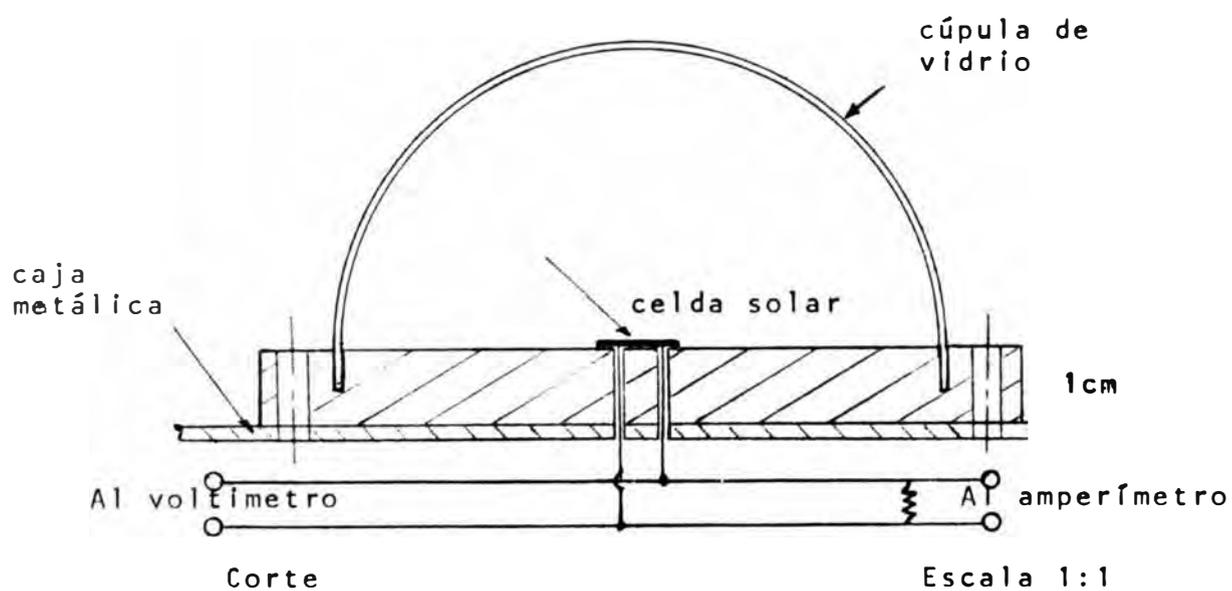


Fig. 2.14 Solarímetro Fotovoltaico

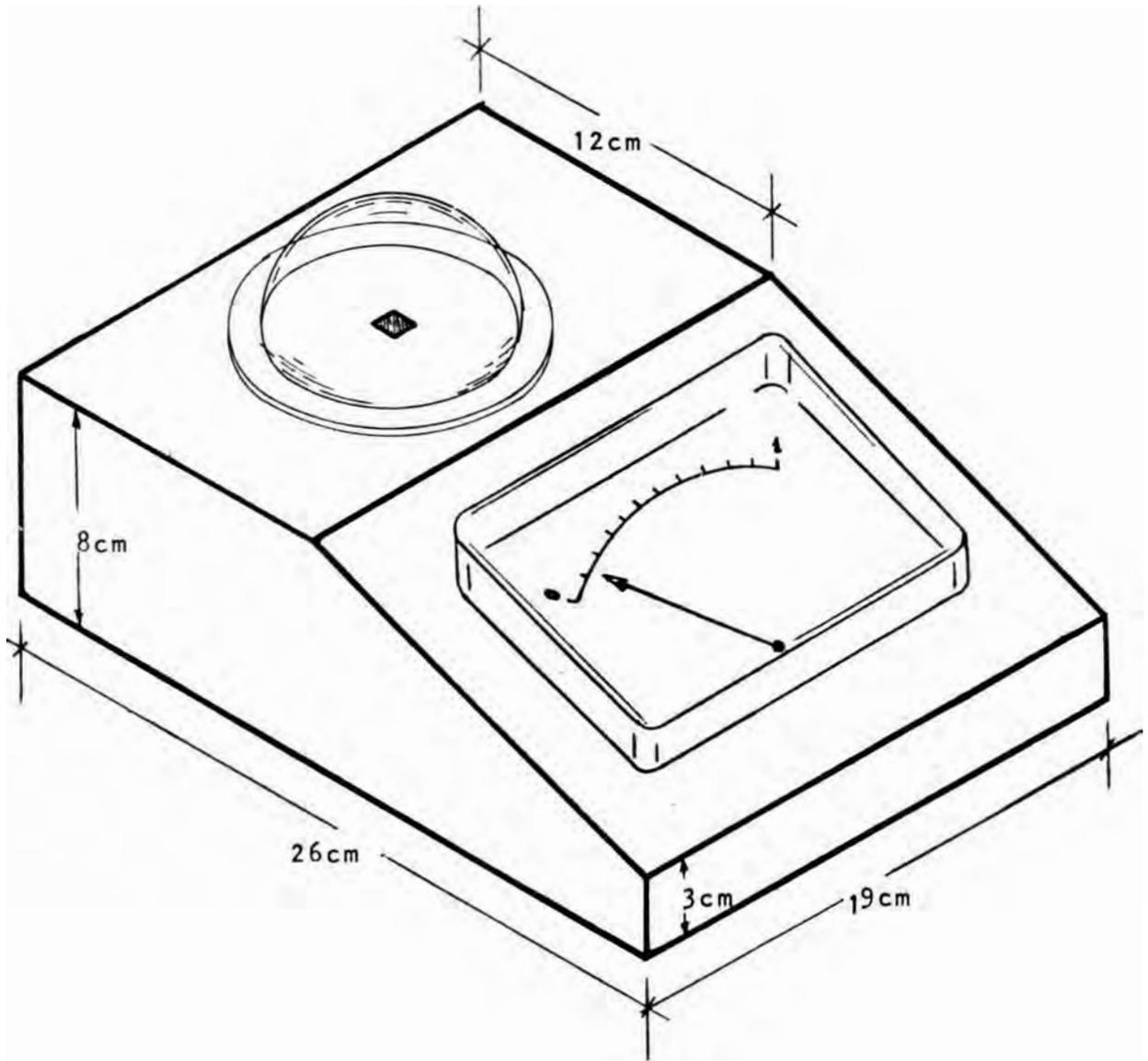


Fig. 2.15 Perspectiva solarímetro fotovoltaico

Patrón W/m ²	Construído m A
210	0.144
240	0.172
300	0.222
480	0.322
564	0.386
600	0.401
660	0.425
705	0.481
720	0.500
780	0.562
845	0.582
900	0.600
915	0.624
945	0.633
1,008	0.678

El valor más probable de la pendiente de la recta m A versus W/m² está dado por:

$$m = \frac{\sum y_i^2}{\sum x_i y_i} = 6.8 \times 10^{-4} \text{ m A/Wm}^{-2}$$

Este valor representa la constante del aparato construído.

El factor de conversión, de la lectura directa del solarímetro construído al valor de la radiación solar es.

$$1,470 \text{ Wm}^{-2}/\text{m A}$$

Así por ejemplo, para una lectura del amperímetro de 0.58mA, el valor correspondiente de la radiación solar sera.

$$0.58 \times 1,470 = 753 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$$

El registrador del valor de la radiación solar minuto a minuto, admite una desviación de $\pm 15 \text{ W/m}^2$. El amperímetro del solarímetro admite una desviación de $\pm 0.01 \text{ m A}$.

La Fig 2.16 nos muestra los puntos correspondientes a las diferentes lecturas así como la recta del pendiente más probable.

Para efectuar las lecturas de la radiación solar, el solarímetro debe ser colocado horizontalmente.

Comentario. El solarímetro construido en el taller del Departamento de Física tiene un costo aproximado de S/ 10.000, sin considerar la mano de obra.

Durante el mes de mayo ha sido usado por el grupo de energía del Departamento de Energía y Mecánica

Las lecturas proporcionadas por el solarímetro construido - tienen una confiabilidad con un error que no sobrepasa el 10%.

El hemisferio de vidrio tiene por finalidad preservar la célula solar. Antes de cada lectura debe ser limpiada cuidadosamente por sus dos superficies.

El elemento mas costoso del solarímetro es el mili-amperímetro, fácil de conseguir en el comercio local. La celda solar no es comercializada aún en el Perú. En el Departamento de Física, en vía de experimentación e investigación se han construido muchas celdas solares de silicio monocristalino.

La respuesta del solarímetro a una variación de la radiación

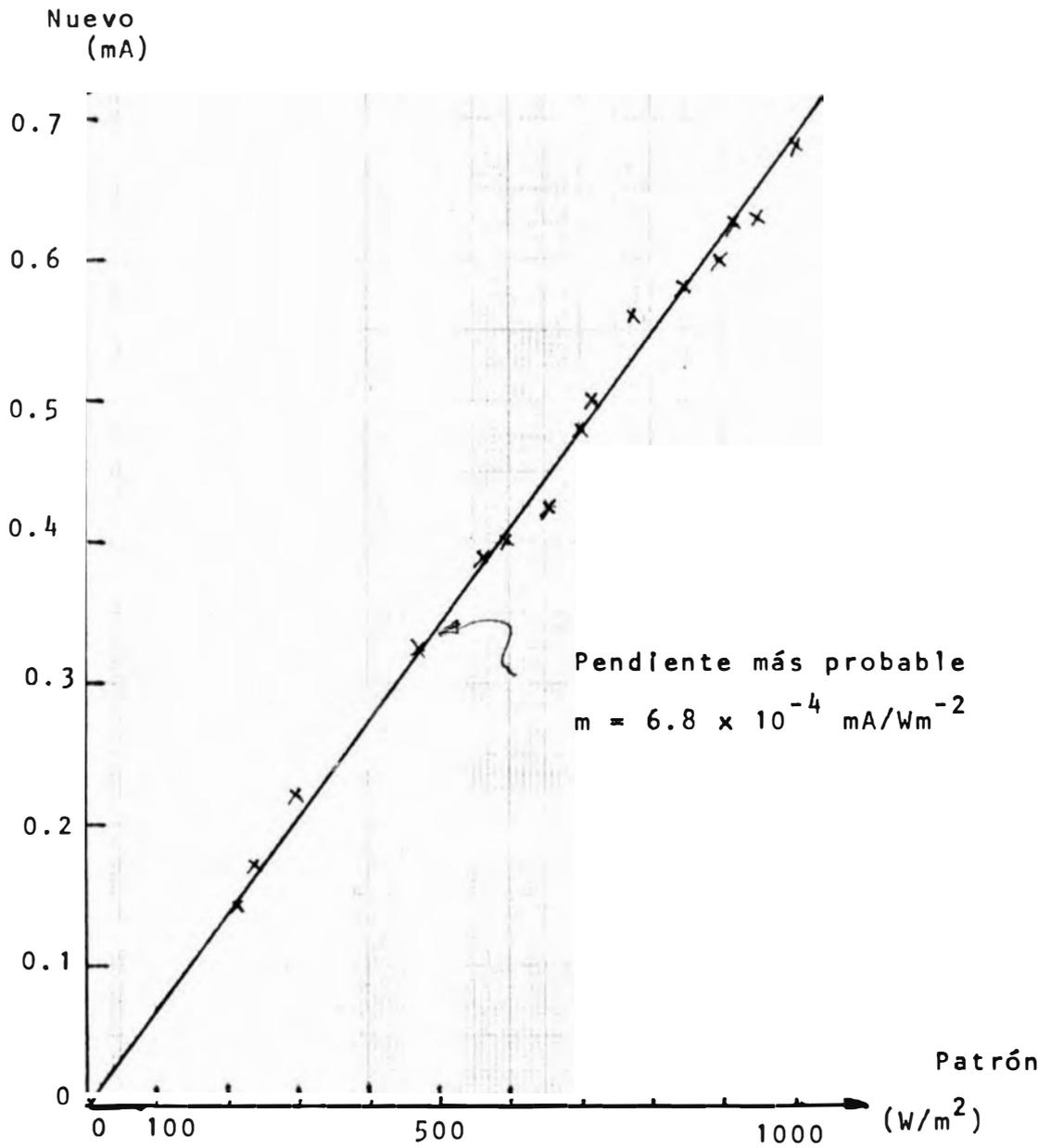


Fig. 2.16 Calibración solarímetro fotovoltaico

solar, es casi instantánea.

Se han dejado dos puntos de salida en paralelo al miliamperímetro interno en la caja metálica del solarímetro. En este caso el factor de conversión es de $12.4 \text{ Wm}^{-2}/\text{mV}$.

Cabe anotar que, si bien la calibración según la Fig. 2.16 es muy lineal, las celdas fotovoltaicas tienen diferente sensibilidad para radiaciones de diferente frecuencia. Como la difusa tiene otra composición espectral que la solar directa, esta propiedad introduce un error sistemático difícil de estimar. Por este motivo consideramos conservativamente un error total de $\pm 10\%$.

11.3.2 Experimento No. 7. Construcción de un solarímetro blanco-negro.

Este solarímetro mide la radiación solar a través de la diferencia de temperatura que alcanzan dos chapas de cobre, una de ellas pintada de blanco y la otra pintada de negro al ser expuestas al sol en el mismo recipiente. (Ref. 7).

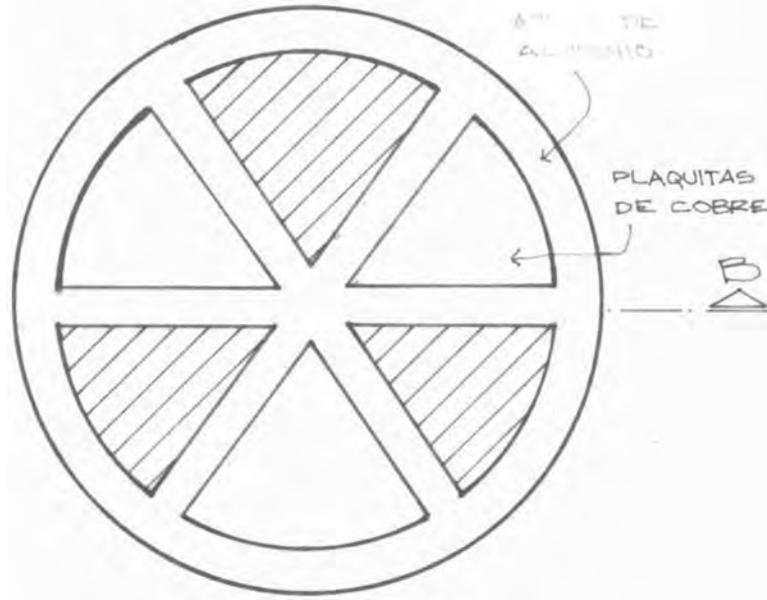
Esta diferencia de temperatura es medida por medio de una termocupla. La calibración del solarímetro se hace mediante un solarímetro patrón.

Para evitar la transferencia de calor entre las chapas y con el medio ambiente, la base del recipiente debe ser un buen aislante térmico.

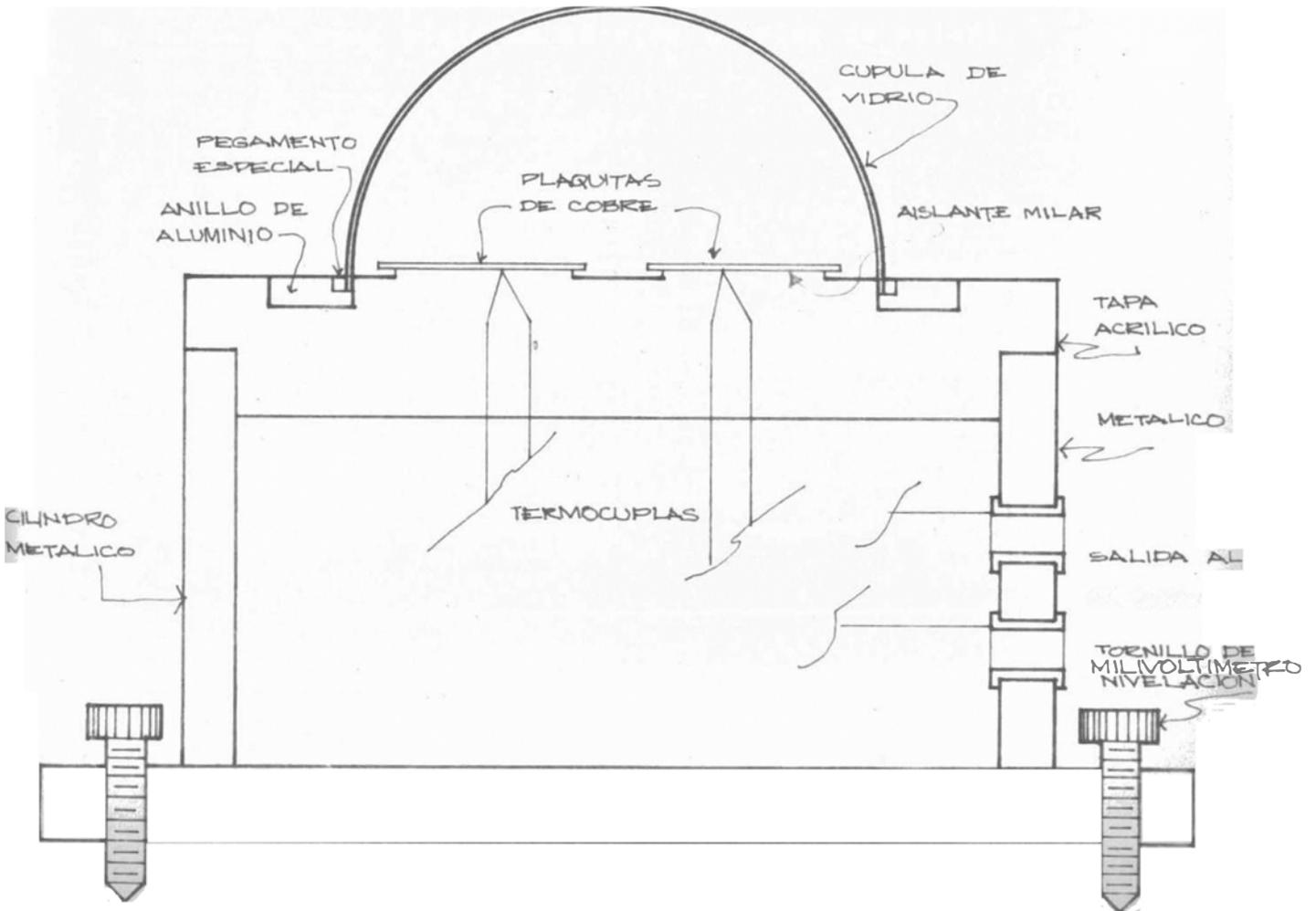
Para proteger de polvo y evitar el deterioro de los elementos sensibles se usa un hemisferio de vidrio.

En la Fig 2.17 se observa a escala natural un dibujo en planta y en corte del equipo construido.

SOLARIMETRO FOTOTERMICO



PLANTA



Los materiales usados son los siguientes.

- Elementos sensibles: seis placas de cobre de 0.1 mm de espesor, cortados en forma de sectores circulares. Se han usado tres placas pintadas de blanco y tres de negro.

- Las termocuplas son de cobre (0.07 mm de diámetro) y de constantan (0.2 mm de diámetro). Se aprovecha que el constantan no es buen conductor de calor para usarlo de mayor diámetro.

- Hemisferio de vidrio, igual que el del solarímetro fotovoltaico, cortado de un foco quemado.

- Base: acrílico de 2 cm de espesor. Con el fin de evitar que al calentarse las planchitas negras a temperaturas mayores de 80°C , se ablanden el acrílico, se ha colocado una hoja de un buen aislante térmico (lámina de mylar).

- Caja metálica circular.

- Pegamento entre vidrio y anillo de aluminio (caucho de silicón).

Las termocuplas se han conectado entre sí, en la siguiente forma:

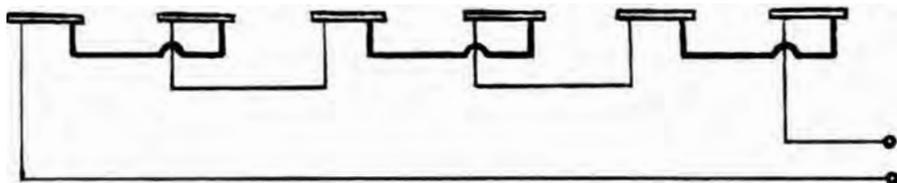


Fig. 2.18 Conexión de láminas de cobre.

El solarímetro ha sido pintado de blanco, tanto la base de acrílico como la caja metálica circular.

Calibración. Se hizo la calibración, en forma simultánea con el solarímetro fotovoltaico, usando como patron el mismo radiómetro Eppley.

El resumen final de todas las lecturas de calibracion efectuadas durante los días 13 y 14 de marzo, es el siguiente.

Patrón W/m^2	Nuevo mV
210	0.35
240	0.46
300	0.51
480	0.88
525	0.99
600	1.07
660	1.13
705	1.22
720	1.30
780	1.38
840	1.50
885	1.55
930	1.63
960	1.68
1,008	1.70

El valor más probable de la pendiente de la recta. Voltaje vs Intensidad de la radiación solar es:

$$m = 1.76 \times 10^{-3} \text{ mV/Wm}^{-2}$$

En la Fig 2.19 se han graficado los puntos correspondientes y se ha trazado la recta con la pendiente más probable.

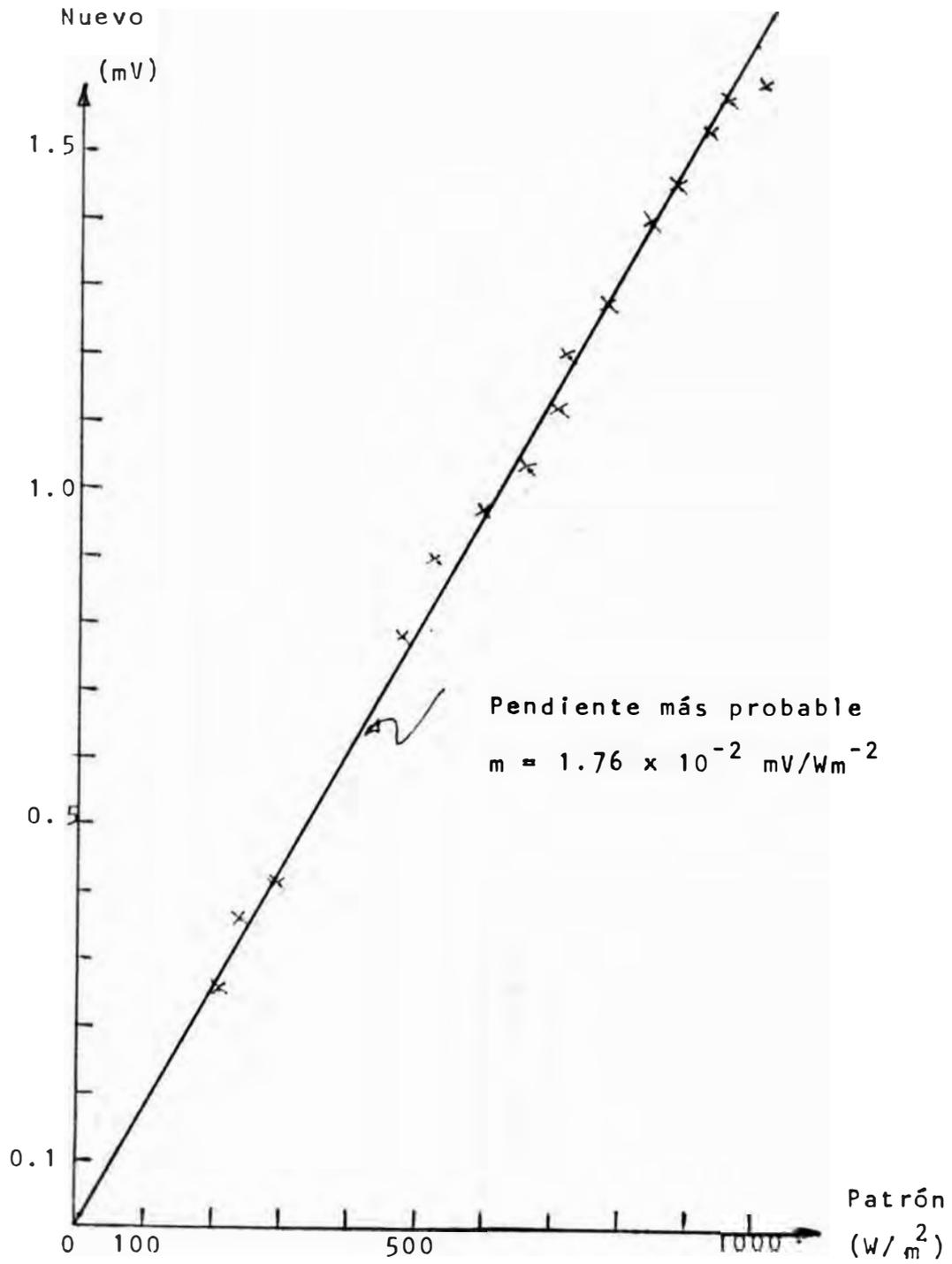


Fig. 2.19 Calibración Solarímetro Fototérmico

El factor de conversión, para convertir la lectura del solarímetro en mV en el correspondiente W/m^2 es: $568 Wm^{-2}/mV$.

Las mediciones en el milivoltímetro empleado para tomar las mediciones admiten una desviación de $\pm 0.025 mV$. Las del solarímetro patrón son las indicadas anteriormente de $\pm 0.15W/m^2$

Tiempo de respuesta. Usando una lámpara de 250 W x 220V, colocada a unos 30 cm de distancia de las chapitas de cobre del solarímetro, es posible conocer el tiempo de respuesta o lo que se conoce también con el nombre de inercia del aparato.

Para evitar la iluminación lateral, se usa un tubo cilíndrico de cartón negro.

Conectando el solarímetro a un registrador, se obtuvo el gráfico mostrado en la Fig 2 20.

Observamos que la curva de calentamiento, así como la de enfriamiento son exponenciales:

$$\text{Calentamiento: } V = V_{\max} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$\text{Enfriamiento } V = V_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Estas igualdades nos permitirán calcular el valor de τ (tiempo de respuesta del solarímetro).

De la Fig 2.20 deducimos el valor de $V_{\max} = 8 mV$

En consecuencia τ será el tiempo transcurrido desde que se enciende la lámpara, hasta que el voltaje de las termocuplas nos indiquen un valor de:

$$V = 0.633 \times 8 = 5.06 mV$$

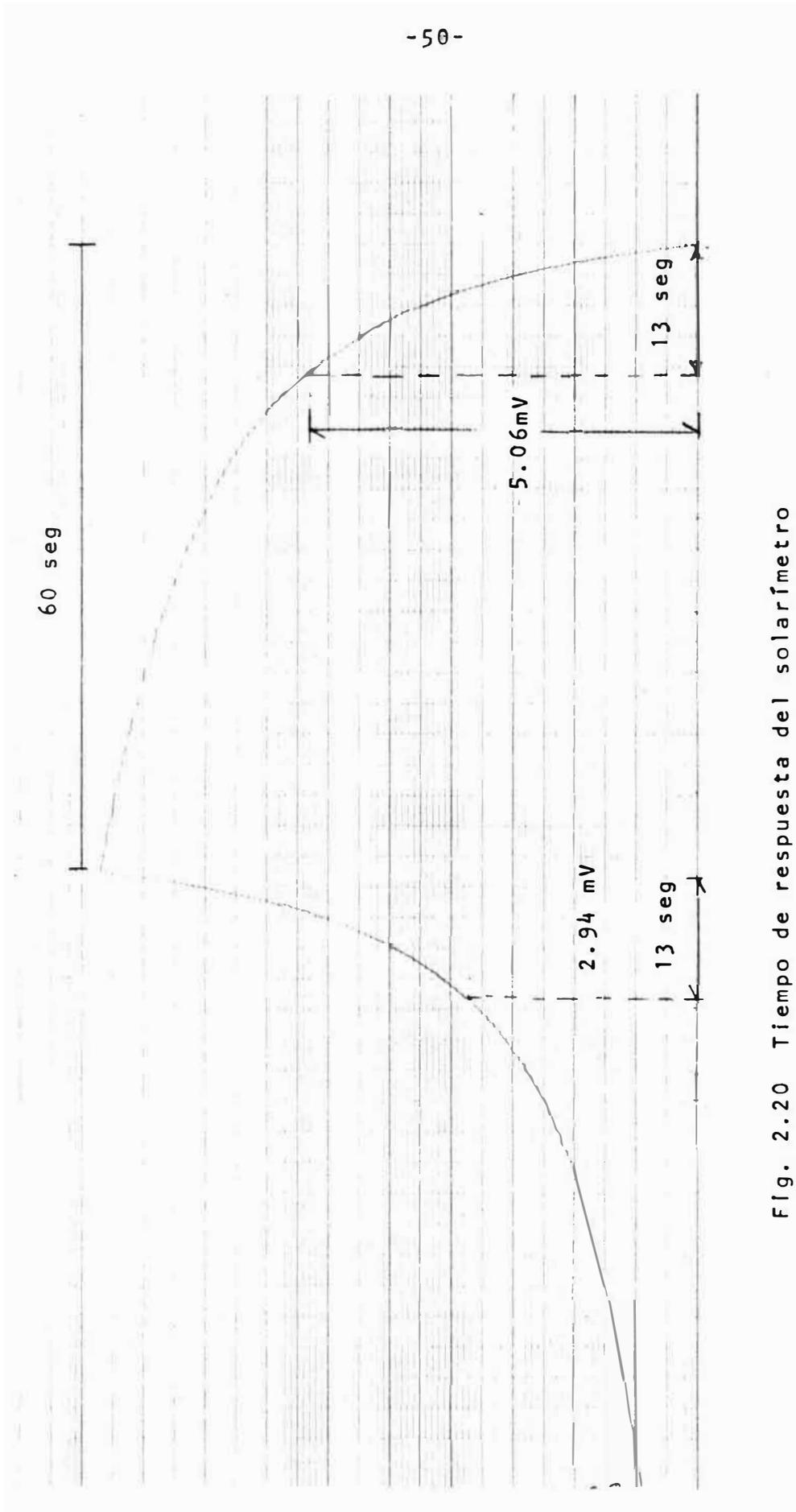


Fig. 2.20 Tiempo de respuesta del solarímetro

El tiempo correspondiente, para este valor es de .

$$t = \tau = 13 \text{ segundos.}$$

El tiempo transcurrido desde que se apaga la lámpara hasta que la lectura del voltaje de las termocuplas indiquen un valor de $V = 0.367 \times 8 = 2.94 \text{ mV}$, es también de 13 segundos.

Sino se dispone de un registrador, con un cronometro y un voltímetro se pueden tomar las lecturas de los tiempos y de los voltajes correspondientes, tanto para el calentamiento como para el enfriamiento. Al graficar Voltaje vs tiempo obtendremos curvas similares a las proporcionadas directamente por el registrador.

Comentario. Sin considerar el importe de la mano de obra el costo de los materiales empleados en la construcción del solarímetro fototérmico, no sobrepasa los S/. 3,000.

Sin embargo, para las lecturas de las diferencias de potencial entre las placas de cobre, debe disponerse de un milivoltímetro con escala de 0 a 2 mV, que no es fácil de conseguir en el comercio local, debido a la poca demanda. Sin embargo, con un costo adicional de unos S/. 3,500, un mili-amperímetro con un preamplificador operacional (construido localmente) puede ser convertido en un milivoltímetro.

El registrador, que grafica las variaciones del voltaje del solarímetro expuesto a radiación solar es un equipo indispensable para el estudio de la radiación solar, pero no está al alcance de todos los laboratorios de Física.

Se ha usado hemisferios de vidrio de foco quemado, que son opacos para el infrarrojo, debido a que no hay en plaza hemisferios de cuarzo e importarlos ocasiona desembolsos y tiempos

largos de espera.

El efecto de convección, debido al aire, puede ser disminuido usando dos hemisferios de vidrio concéntricos.

Debido a la inercia del aparato, no se registra en forma instantánea la variación de la radiación solar. La confiabilidad de las lecturas proporcionadas, tiene un error menor al 8 %.

Antes de usarse, debe limpiarse cuidadosamente el hemisferio de vidrio.

El día 11 de abril, se efectuó la comparación de las lecturas proporcionadas por los dos solarímetros construidos con los siguientes resultados:

HORA	Solarímetro Fotovoltaico		Solarímetro Fototérmico		DIFERENCIA %
	(mA)	W_m^{-2}	Mv	W_m^{-2}	
9 ^h 20 ^m	0.38	559	1.0	568	1.7
9 ^h 40 ^m	0.42	617	1.1	625	1.3
10 ^h	0.48	706	1.3	738	4.2
10 ^h 30 ^m	0.54	794	1.45	824	3.6
12 ^h 30 ^m	0.60	882	1.6	909	3
14 ^h 30 ^m	0.46	676	1.2	682	
15 ^h	0.28	412	0.75	426	3.4

La variación mayor en la lectura de los dos solarímetros es de 4.2% inferior a la aproximación estimada para cada uno de ellos.

11.3.3 Experimento No. 8. Medición de la radiación directa y de la difusa.

Si por medio de un cuerpo opaco se impide la llegada directa de los rayos solares a los elementos sensibles de los solarímetros, las lecturas respectivas nos indicarán el valor de la radiación difusa.

Las dimensiones del cuerpo opaco deben ser de tal manera que sólo impidan la llegada en forma directa de los rayos solares, a los elementos sensibles.

Se han construido dos dispositivos para medir la radiación difusa. Faja de sombra fija y faja de sombra móvil.

Faja de sombra fija. Es una faja que permanece fija durante todo el día. Tiene la forma de una semicircunferencia. Colocada sobre el dispositivo que se ve en la Fig 2.21 impide que los rayos solares lleguen directamente a los elementos sensibles.

La faja, puede deslizarse sobre unos soportes metálicos que tienen una longitud suficiente para cubrir la variación anual de la posición del sol debido a su declinación

En los equinoccios la faja estará ubicada justamente en la parte central del soporte metálico y en los solsticios, en los puntos extremos de dicho soporte.

La inclinación del soporte es variable y debe corresponder con la latitud del lugar. El elemento sensible del solarímetro debe estar colocado en el centro de la posición de la faja correspondiente a los equinoccios.

Todo el equipo ha sido construido en los Talleres del D.A.

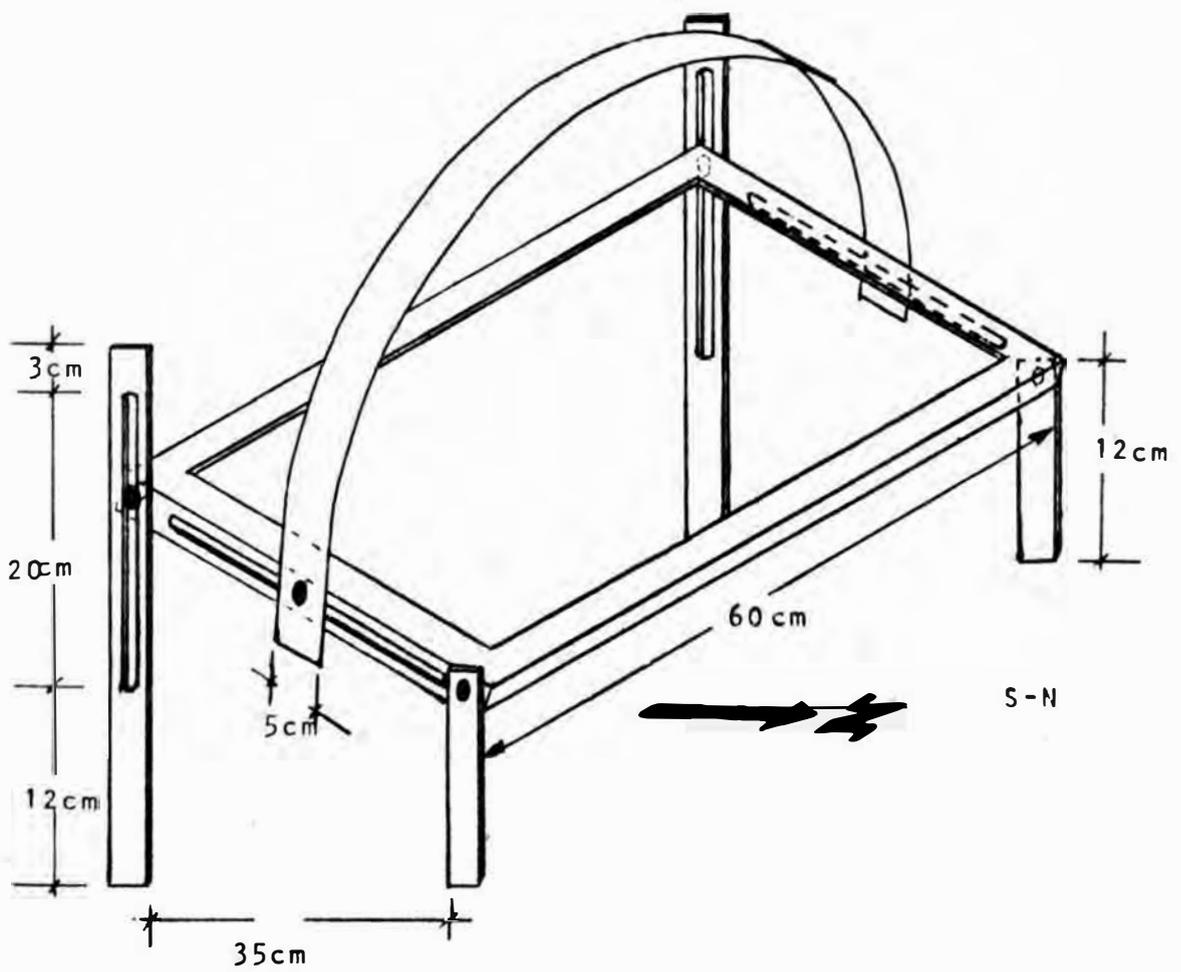


Fig. 2.21 Faja de Sombra Fija

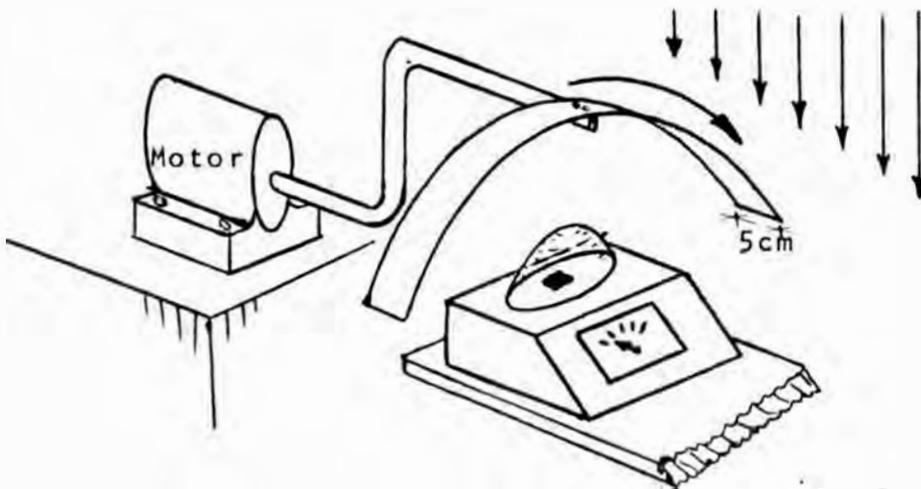


Fig. 2.22 Faja de Sombra Movil

de Física con materiales existentes

La orientación del equipo es S-N, es decir que la semicircunferencia de la faja, es perpendicular al S N.

Debido al ancho de la faja, un 12% de la radiación difusa no es captada por el solarímetro.

Faja de sombra móvil. Por medio de un motor de bajo número de revoluciones, se puede conseguir cada cierto tiempo, pase por encima del elemento sensible de un solarímetro un cuerpo opaco que le haga sombra.

En esta forma, es posible registrar durante el intervalo - de tiempo deseado los valores de: radiación directa difusa y total.

El dispositivo tiene la forma y dimensiones indicadas en la Fig 2.22.

Se han utilizado dos tipos de motores: de 1 r.p.m. y de 0.25 r.p.m.

Entre el 19 de marzo y el 5 de mayo de 1960 se realizaron una serie de mediciones en la terraza del pabellón de Física, de radiación total, radiación difusa y radiación directa, con los dos solarímetros construídos. (Figs. 2.23 al 2.27)

Comentario. Las fajas de sombra, pueden ser fácilmente construídas en cualquier parte del Perú.

Los motores eléctricos de baja revolución pueden ser reemplazados por un mecanismo de relojería, que es mas fácil de conseguir.

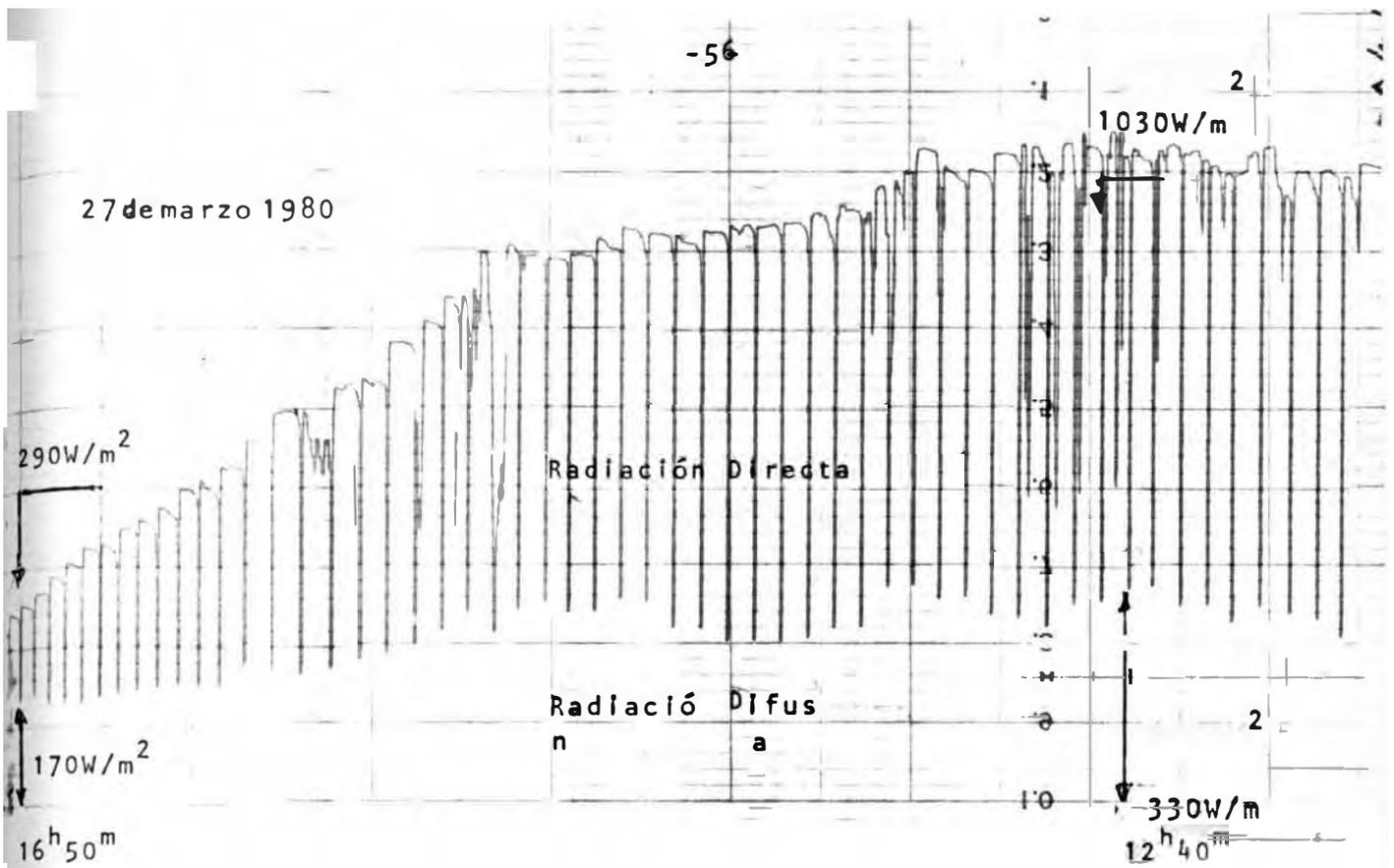


Fig 2.2 Registro Solarímetro Faja de
 3 Fotovoltaico. Sombra móvil y motor lento.

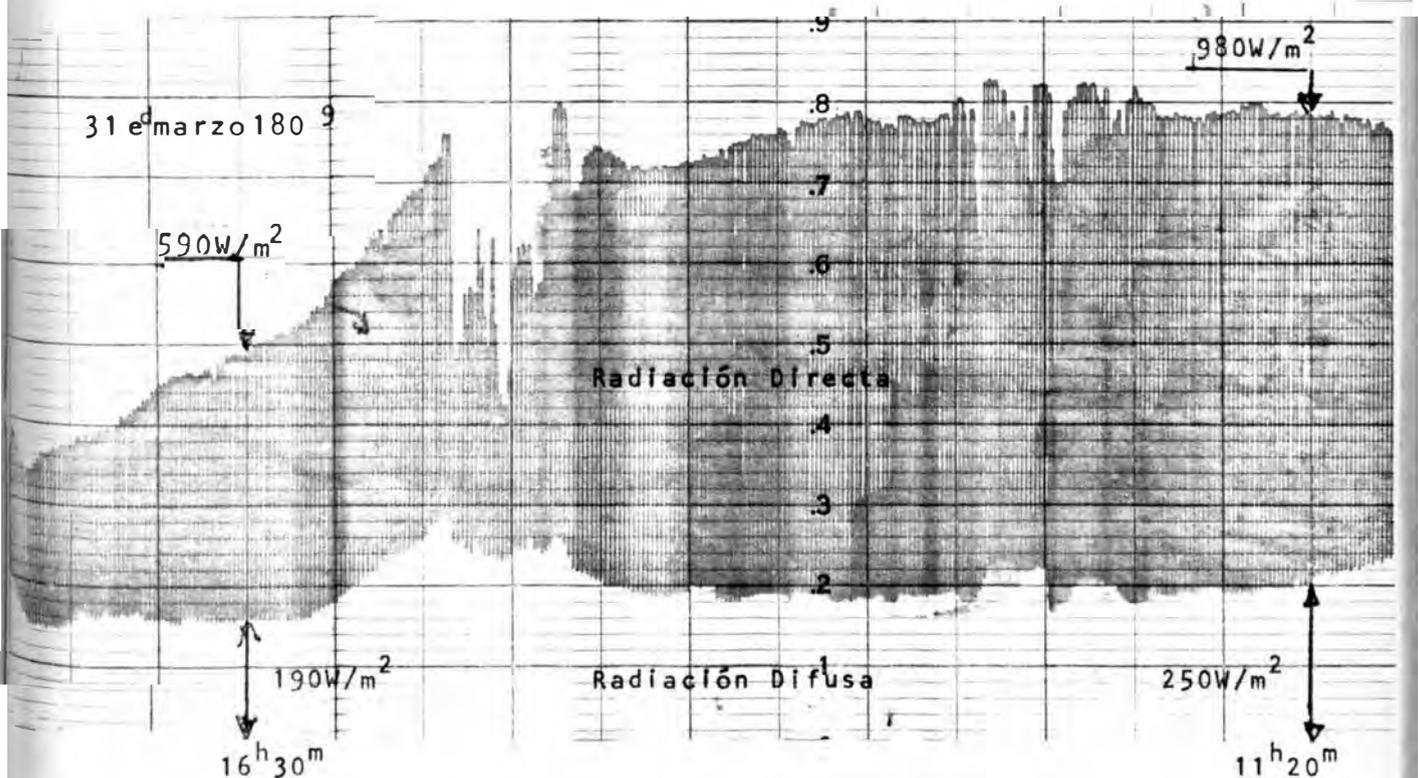


Fig 2.24 Registro Solarímetro Fotovoltaico. Faja de

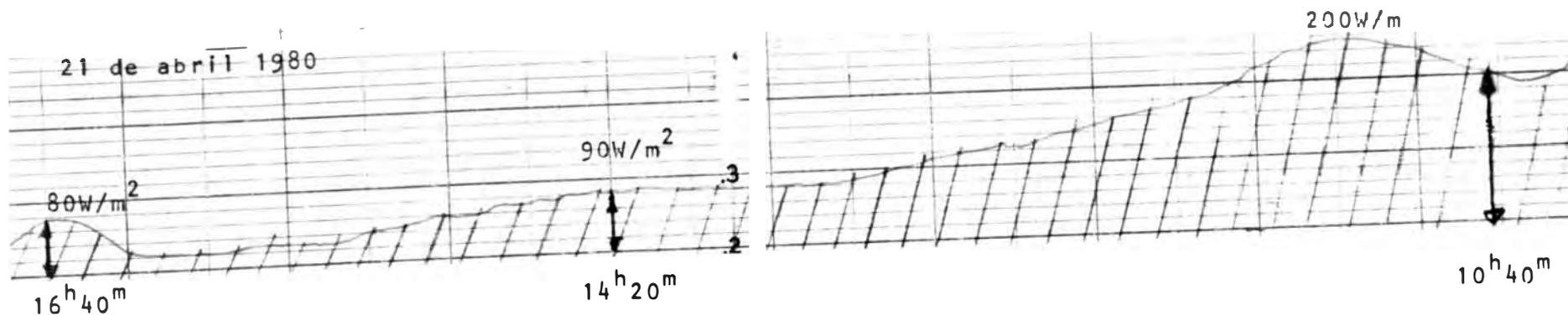


Fig. 2.25 Radiación Difusa (Solarímetro fotovoltaico)

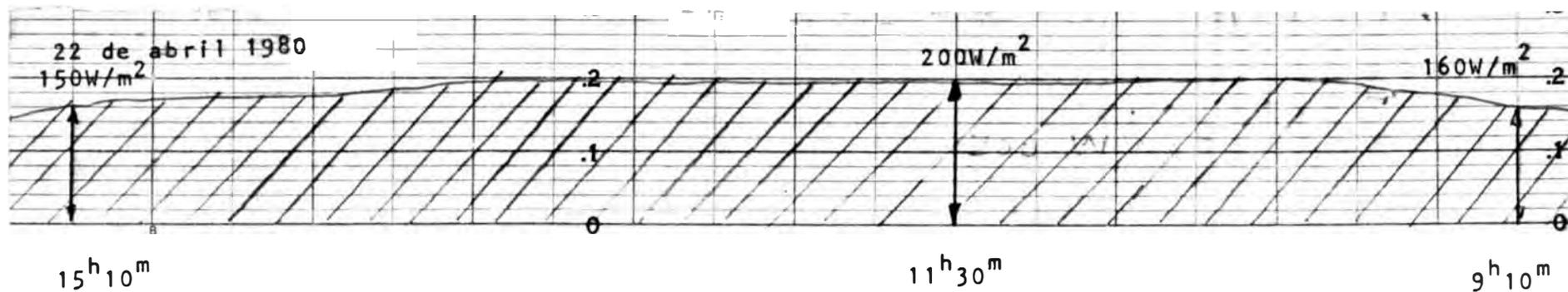
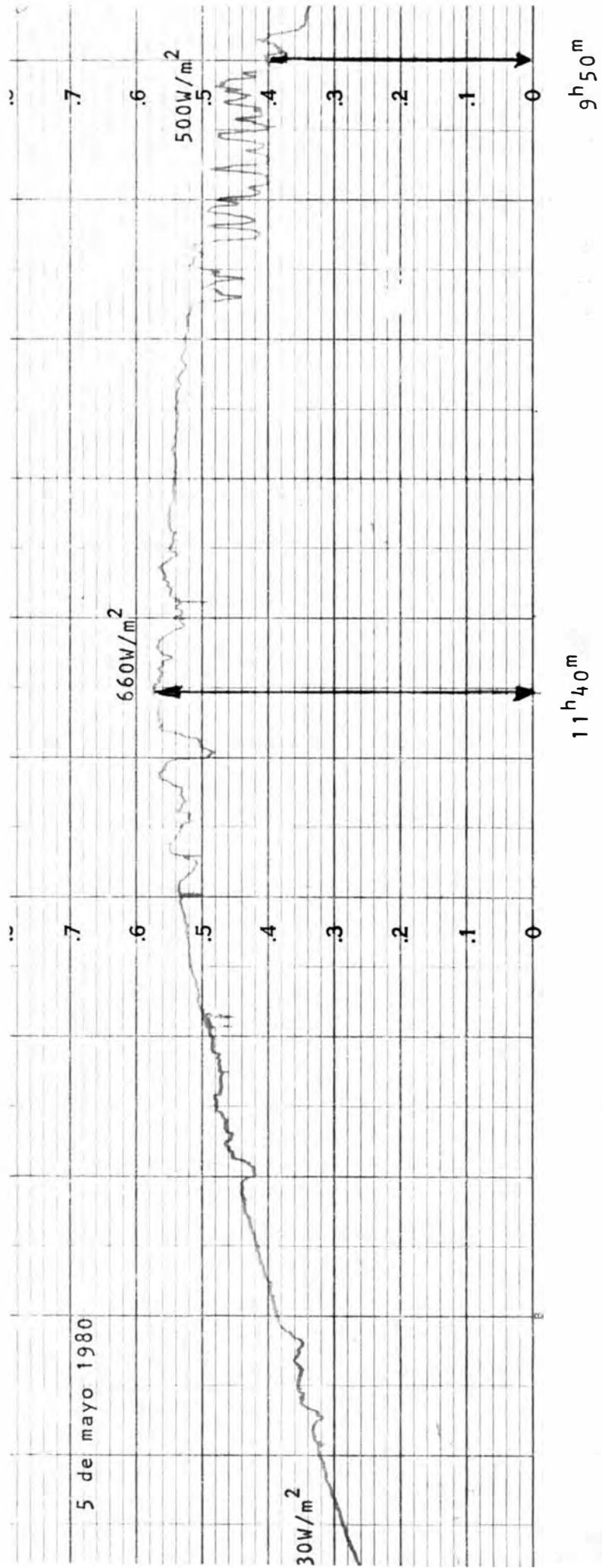


Fig. 2.26 Radiación Difusa (Solarímetro fototérmico)



F g . 2 2 7 . Radiación total (So arímetro fóterm có)

El registrador constituye un equipo fundamental para el graficado de la radiación solar directa o difusa en un período de tiempo. Puede trabajar durante días, meses o años, registrando datos muy valiosos de potencias máximas o mínimas, energía acumulada, instantes en que ocurren, etc.

Experimentalmente se ha comprobado la importancia de la radiación difusa, que puede proporcionar energía para calentar colectores solares o corriente eléctrica en días nublados.

En los primeros días del mes de junio de 1980, llegó al Departamento de Física un radiómetro infrarrojo Eppley, de constante $4.08 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$, con el que se efectuaron numerosas mediciones de radiación infrarroja en el interior del laboratorio, en la terraza a diferentes horas del día, habiéndose obtenido valores entre 150 y 270 W/m^2 .

La radiación infrarroja en días nublados es mayor que en días de sol, debido a la radiación de las nubes. Esta radiación debe ser considerada en un balance térmico de colectores fototérmicos.

11.4 COLECTOR SOLAR PLANO

Cuando un objeto se expone a la radiación solar y su temperatura se eleva hasta que la pérdida de calor iguale a la ganancia, es decir la energía absorbida de la radiación solar.

Las pérdidas dependen de la emisión infrarroja de radiación del material caliente, del movimiento del aire frío que lo rodea, y de la conductividad térmica de los objetos en contacto con él. Las ganancias dependen de la intensidad de la radiación solar y del poder absorbente de la superficie del objeto.

Las superficies receptoras de los colectores planos son

generalmente metálicos: hierro, cobre o aluminio, con el fin de obtener una buena conductividad termica. Para aumentar su absorción, se pintan de negro o se cubren con revestimiento negro producido químicamente.

Al recibir radiación solar la superficie receptora incrementa su temperatura emitiendo radiación infrarroja cada vez de energía mayor a medida que su temperatura aumente. La longitud de la onda de máxima intensidad irradiada por la placa negra puede ser calculada por medio de la ley de Wien.

$$\lambda_{\max} T = 2,997.8 \text{ } \mu\text{m}^\circ\text{K}$$

El sol, cuya temperatura es de aproximadamente $5\ 700^\circ\text{K}$ emite radiaciones con un máximo de intensidad de longitud de $0.5 \text{ } \mu\text{m}$. A la temperatura ambiente de 300 K un cuerpo negro emite radiaciones de máxima intensidad con una longitud de onda de 10 micrones . El vidrio corriente absorbe las radiaciones mayores de 2.5 micrones . Es transparente para la luz visible y absorbente para el infrarrojo. Esta luz absorbida es reemitida por el vidrio en todas direcciones.

11.4.1 Experimento No. 9. Potencia utilizable de un colector plano.

El objetivo del experimento es de conocer las curvas de calentamiento, la potencia utilizable y el rendimiento de un colector plano. (Ref. 8).

El colector plano utilizado es de forma cuadrada. Tiene las dimensiones y características siguientes

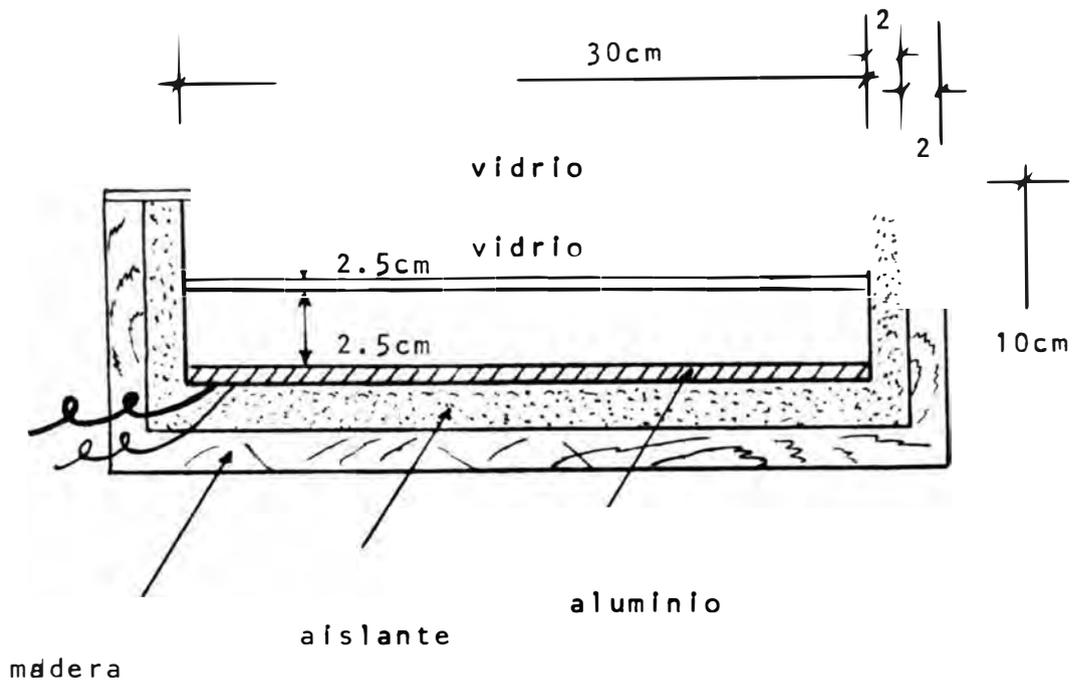


Fig 2.28 Sección Transversal del Colector Plano

- Los vidrios son simples y corrientes
- La placa receptora es de aluminio de 2.3 mm de espesor, 0.75 Kg de masa y 0.91 KJ/Kg°K de capacidad calorífica.
- El aislante usado es de plástico, conocido con el nombre de poroflex. Su espesor es de 2 cm.

La caja de madera de 2 cm de espesor.

- Las termocuplas son de cobre constantan, pegadas en un hueco hecho en la plancha de aluminio.

El colector se expone en forma perpendicular a los rayos del sol. En un mili-voltímetro se mide la diferencia de vol

taje como función del tiempo.

Se han efectuado mediciones. del colector sin vidrio del colector con un vidrio y del colector con dos vidrios.

El experimento se realizó el 21 de marzo de 1980 con las mediciones siguientes:

Sin vidrio:

t(en minutos)	V(en mV)	T(K)
3	0.25	307
5	0.50	314
10	0.95	324
15	1.15	329
20	1.28	331
25	1.32	332.5
30	1.32	332.5

Con un vidrio:

4	0.36	309.8
8	0.97	324
10	1.25	330
14	1.65	340
20	2.25	352
24	2.45	357
30	2.62	361.8
35	2.72	362.5
40	2.72	362.5

Con dos vidrios:

T(en minutos)	V(en mV)	T(°K)
5	0.70	316
8	1.10	326
14	1.75	342
20	2.25	352
25	2.55	360
30	2.75	365
35	3.00	369
40	3.10	371.6
45	3.15	372.6
50	3.15	372.6

Temperatura del medio ambiente. 28 C.

Radiación solar medida con el solarímetro recientemente
construido: 700 W/m²

Durante el transcurso del experimento no existió nubosi-
dad manifiesta, permaneciendo la radiación solar aproxima-
damente uniforme.

Las temperaturas máximas alcanzadas por el colector fue-
ron las siguientes:

Sin vidrio: 59.5°C a los 25 minutos de iniciado el calenta-
miento.

Con un vidrio: 90.5°C a los 35 minutos.

Con dos vidrios: 99.5°C a los 45 minutos.

El gráfico de la Fig 2.29 nos muestra la variación de la
temperatura de la plancha de aluminio en función del tiempo
para los tres casos.

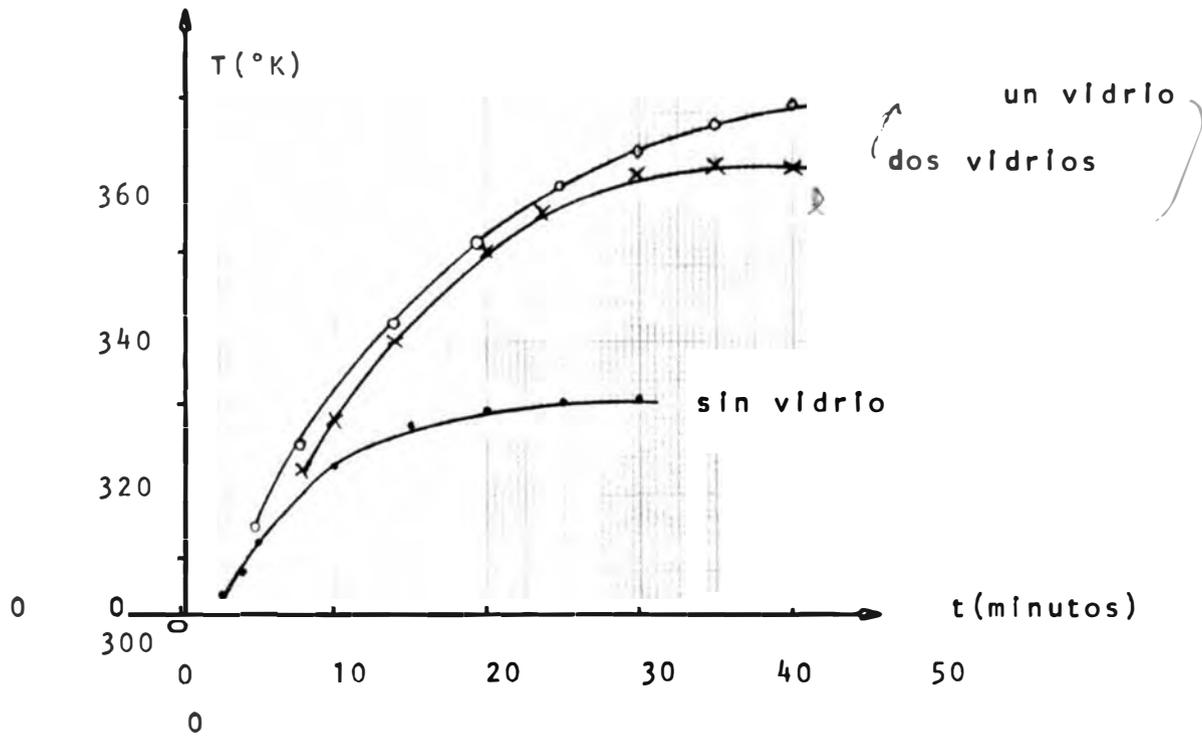


Fig. 2.29 Calentamiento colector

$\eta(\%)$ $P(W)$

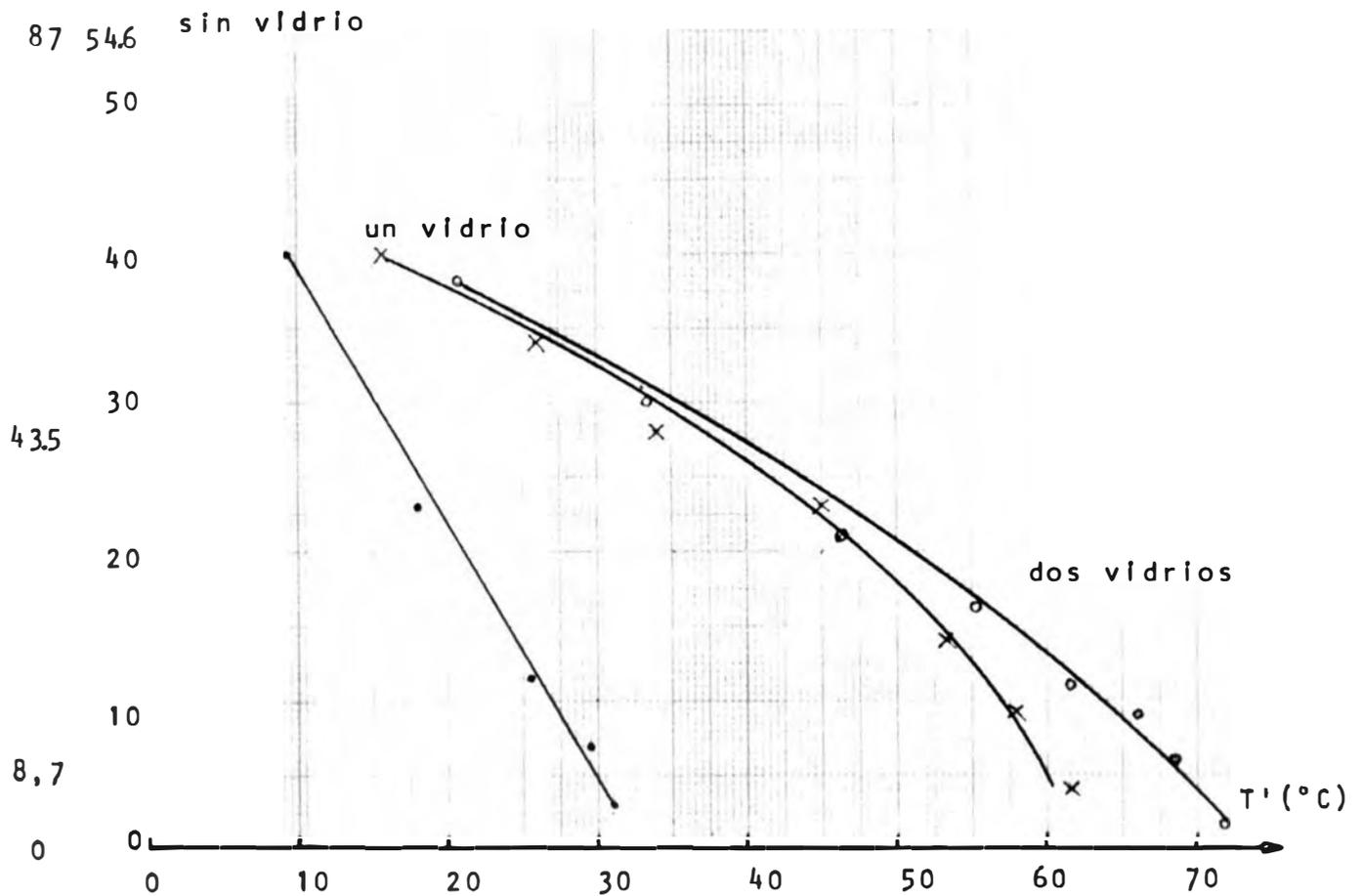


Fig. 2.30 Potencia del Colector

Potencia del colector. De la relacion que nos da el calor necesario que necesita un cuerpo de masa m y calor específico c , para elevar su temperatura en ΔT grados, deducimos el valor de la potencia:

$$P = cm \frac{\Delta T}{\Delta t} = 680 \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (P \text{ en Watts, } t \text{ en segundos})$$

Del gráfico de la Fig 2.29 podemos deducir los valores de la potencia para cada punto de la curva.

Para los mismos tiempos medidos experimentalmente determinaremos los valores correspondientes T' (temperatura de la placa del colector por encima de la temperatura ambiente 28 C), ΔT , Δt y P .

Sin vidrio:

$T' (^{\circ}C)$	$\Delta T (^{\circ}K)$	$\Delta t (\text{seg})$	$P (W)$
9.5	7	120	40
18	10	300	23
25.5	5	300	11.5
29	2	300	7
30.8	1.5	300	3
31.5	0	300	0

Con vidrio:

15.9	14.2	240	40
26	6	120	34
34	10	240	28
45	12	360	23
53.5	5	240	14
58.4	4.8	360	9
61.7	1.7	300	4
62.5	0	300	0

Con dos vidrios:

$T' (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T (^{\circ}\text{K})$	$\Delta t (\text{seg})$	$P (\text{W})$
20.5	10	180	38
33.4	15.8	360	30
46.4	11.2	360	21
55.5	7	300	16
61.5	5	300	11
66	4	300	9
69.3	2.6	300	6
71.1		300	2
71.6	0	300	0

En la Fig 2.30 se muestra el gráfico de la potencia de un colector, en función de la temperatura.

Eficiencia. Una parte de la energía solar que llega a la placa del colector se pierde y otra parte eleva la temperatura de la placa.

Al iniciarse el calentamiento del colector, toda la energía solar recibida por la placa es utilizada en elevar su temperatura. En ese instante la eficiencia del colector es máxima.

Al aumentar la temperatura de la placa del colector, comienzan las pérdidas por radiación, convección y conducción. A medida que aumenta más la temperatura, la eficiencia del colector disminuye, hasta que llega a cero en el instante en que la placa llega a su máxima temperatura.

En el colector sin vidrio, para la temperatura de la placa igual a la del medio ambiente ($T' = 0$), la eficiencia sera.

$$\eta = P_{\text{útil}}/P_{\text{solar}} = IA\alpha/IA =$$

α = absortancia de la placa

De la Fig 2.30 para $T' = 0$ deducimos: $P_{\text{útil}} = 54.6 \text{ W}$

Además tenemos los siguientes datos.

$$A = 0.3 \times 0.3 = 0.09 \text{ m}^2$$
$$= 700 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$$

Reemplazando valores: $\alpha = 0.87 \pm 20\%$

Las curvas de la eficiencia del colector en función de la temperatura son iguales a las de la potencia (Fig 2.30) con el cambio del eje de las $P(\text{W})$, por el de $\eta(\%)$, y con el cambio de escala siguiente:

Para $P = 54.6$ le corresponden $\eta = 87\%$
Para $P = 0$ le corresponde $\eta = 0$

Comentario. La potencia por metro cuadrado del colector es: $11.1P \text{ W/m}^{-2}$.

La energía útil del colector será igual a la energía absorbida ($I \alpha A$), menos la energía irradiada ($\epsilon A \sigma T^4$).

De la Fig 2.30 deducimos algunos hechos interesantes.

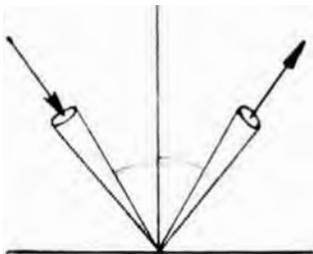
a) Para temperaturas bajas (con diferencias menores de 10 C con la del medio ambiente) tienen mayor eficiencia los colectores sin vidrio. En piscinas, puede ser conveniente no usar el vidrio para elevar la temperatura del agua, algunos grados por encima de la del medio ambiente.

b) Para temperaturas entre 15°C y 35°C por encima de la del medio ambiente la eficiencia de colectores con un vidrio y con dos vidrios es la misma.

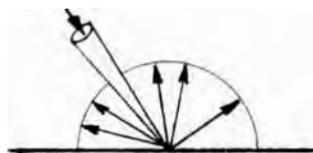
c) Para temperaturas mayores, la eficiencia de un colector con dos vidrios es mayor que la de un solo vidrio. Para el colector del experimento, para $T' = 60^{\circ}\text{C}$, la eficiencia del colector con dos vidrios es el doble que con uno.
(sin vidrio el colector no llegaba a esta temperatura.)

11.5 CARACTERISTICAS OPTICAS DE MATERIALES OPACOS

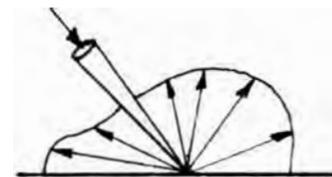
Al incidir un rayo de luz sobre un cuerpo opaco, parte de la luz es absorbida y parte es reflejada. La reflexión de las superficies puede ser: especular, difusa o combinada de las dos.



Especular



Difusa



Especular+difusa

La intensidad en una cierta dirección para una superficie dada, es una función de la longitud de onda y la distribución espacial de la radiación incidente.

Al llegar un rayo de luz solar a la superficie de un cuerpo, parte de la radiación es absorbida (αI_0); y parte es reflejada (ρI_0).

Adoptaremos las siguientes definiciones de las características

ticas ópticas de un material (Ref. 1).

Absortancia. Absortancia monocromática (α_λ), es la fracción de la radiación incidente, (de longitud de onda λ) que es absorbida por la superficie.

Absortancia hemisférica (α) o simplemente absortancia (α puede depender también del ángulo de incidencia) para la luz solar es el promedio ponderado de α_λ sobre el espectro solar $I(\lambda)$.

$$\alpha = \frac{\int \alpha_\lambda I_\lambda}{\int I_\lambda d\lambda}$$

La absortancia es pues la fracción de la radiación solar incidente que atravesando la superficie, es absorbida por el material.

Emitancia. En forma análoga se definen diferentes emitancias.

Emitancia monocromática (ϵ_λ) de una superficie, es la razón de la intensidad monocromática emitida por una superficie a la intensidad monocromática que sería emitida por un cuerpo negro (cuerpo ideal que emite más que cualquier otro), a la misma temperatura.

La emitancia (total) es el promedio ponderado de ϵ_λ sobre el espectro electromagnético emitido por el cuerpo que se encuentra en una determinada temperatura.

La emitancia es pues el cociente entre la radiación del cuerpo y la radiación del cuerpo negro a la misma temperatura.

La absortancia depende del material pero también es una función del espectro de la radiación incidente, mientras que la

emitancia depende del material y de la temperatura en la cual se encuentra.

La Ley de Kirchoff establece que para todas condiciones se cumple $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$. La Ley de Stefan establece que la intensidad de radiación emitida por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

Sin embargo la absortancia y la emitancia no son iguales, debido a la diferencia de los dos espectros de radiación: el espectro solar es esencialmente limitado a 0.3 - 2.5 μm , mientras el espectro de un cuerpo a 100°C se encuentra exclusivamente en el infrarrojo a longitudes de onda mayor que 3 μm .

Reflectancia. La reflectancia es el cociente entre la intensidad de la radiación reflejada por una superficie y la intensidad de la radiación incidente.

Se cumple: $\rho_\lambda = 1 - \alpha_\lambda = 1 - \epsilon_\lambda$ siendo ρ_λ la reflectancia monocromática hemisférica angular.

Superficie selectiva. Como superficie selectiva se define una superficie cuyo $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$ depende fuertemente de la longitud de onda.

Las superficies selectivas necesarias para colectores solares deben tener estas dos propiedades:

- máxima absorción para el espectro solar.
- máxima supresión de la radiación térmica.

11.5.1 Experimento No. 10. Determinación de la absortancia de una superficie.

El objeto del experimento es comparar la absortancia a la luz del sol de varias superficies con la absortancia de una superficie conocida (negro de humo) (Ref. 9).

El instrumento empleado está formado por una caja hueca rectangular de 11 x 11 cm de sección y 16 cm de largo. de material aislante de 2 mm de espesor. En los extremos de la caja pueden moverse libremente dos láminas de vidrio en guías acanaladas. (Los vidrios se colocan con el objeto de evitar la circulación del aire por el interior de la caja). Paralelamente a los vidrios hay dos tapas metálicas que también pueden moverse en guías acanaladas, colocados con el fin de evitar voluntariamente el paso de los rayos del sol.

La caja está montada en un dispositivo metálico, que le permite rotar en torno de un eje horizontal. Ajustando convenientemente este dispositivo, se consiguen rotaciones de la caja en 180°. En el centro de la caja hay tornillos de ebonita para fijar la muestra directamente o la porta-muestra.

La muestra es colocada paralelamente a los extremos cuadrado de la caja, en el centro de la misma y en forma perpendicular a los rayos del sol. La forma dimensiones y características del aparato pueden verse en la Fig. 2.31 y 2.32.

La muestra es una lámina metálica (se ha usado aluminio y cobre). Una de sus caras está ennegrecida con negro de humo, la otra cara se pinta con la muestra que se desea medir pudiendo ser también una superficie selectiva.

En el centro de la lámina y sobre el lado ennegrecido se fija una termocupla de cobre-constantan, aproximadamente de 0.1 mm de diámetro (alambre 40 s.w.g). Otra termocupla igual

a la anterior está unida al interior de la caja, a un borne metálico del eje de rotación.

Para realizar el experimento, se fija la cara ennegrecida perpendicularmente a los rayos del sol. La elevación de la temperatura de la placa es indicada en un milivoltímetro, que mide el voltaje generado en la termocupla

La placa es calentada hasta que su temperatura exceda un cierto valor T_0 . Posteriormente, se cierra la caja por medio de la tapa metálica, impidiendo la llegada de los rayos del sol a la placa, con lo cual la temperatura de la misma comienza a descender, llegando otra vez a T_0 instante en el cual registramos el tiempo correspondientes t' . Continúa el enfriamiento durante un cierto intervalo fijo Δt y la temperatura de la placa baja a T_1 . Se permite continuar el enfriamiento unos pocos segundos más y el instrumento es rotado en 180° , abriendo la otra tapa metálica, de tal manera que la cara muestra de la placa, es irradiada por el sol. La temperatura comienza a subir y cuando alcanza el valor T_1 , se anota el tiempo t'_1 . Después se deja transcurrir el intervalo fijo Δt y se anota la temperatura T_2 a la que llega la placa. Se continúa el calentamiento por unos pocos segundos más, se cierra el extremo de la caja, con la lámina metálica iniciándose un nuevo proceso de enfriamiento.

De manera similar se alcanza a la temperatura T_3 después de transcurrido el intervalo fijo Δt , desde que pase por T_2 , la curva de enfriamiento. Esta curva de enfriamiento es seguida por una de calentamiento, con la exposición al sol de la cara ennegrecida. (Fig 2.33).

Los ciclos de calentamiento y enfriamiento son continuados:

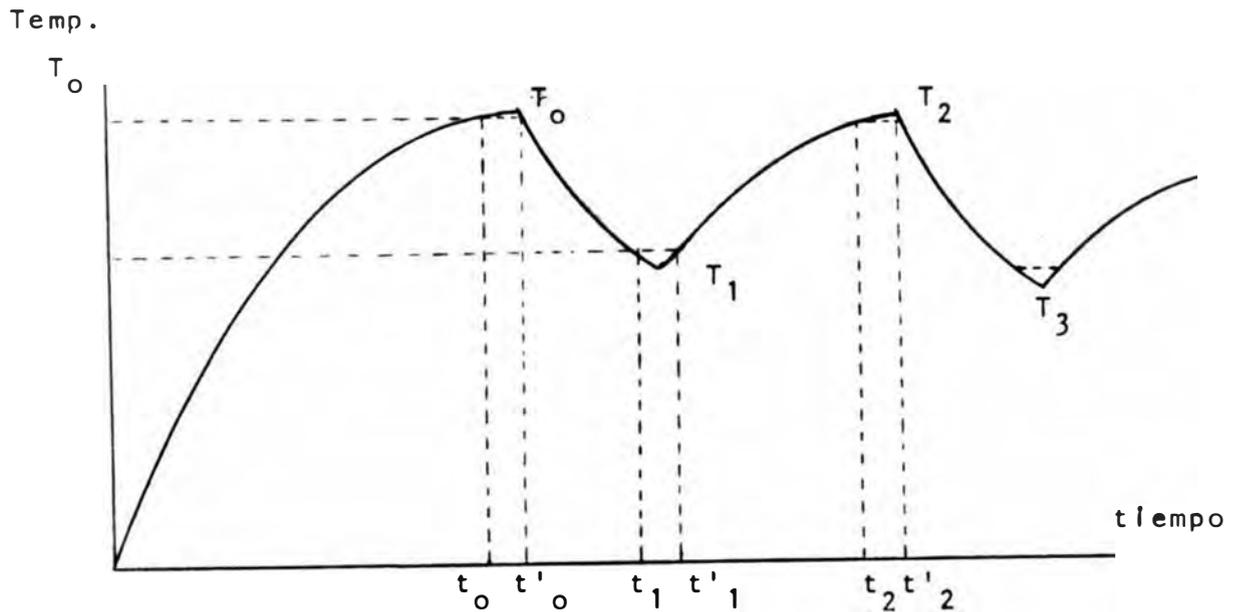


Fig. 2.33 Curvas de calentamiento y enfriamiento

El cociente entre las absorptancias de las dos caras o superficies, está dado por:

$$R = \frac{(T_{4k-4} - T_{4k-3}) + 2(T_{4k-2} - T_{4k-3}) + (T_{4k-2} - T_{4k-1})}{(T_{4k-2} - T_{4k-1}) + 2(T_{4k} - T_{4k-1}) + (T_{4k} - T_{4k+1})}$$

(suponiendo igual intensidad de la radiación solar mientras dura el experimento).

Muestras usadas. Para el experimento se han usado tres muestras:

-Placa de cobre circular de 10 cm de diámetro, 1 mm de espesor. Una de las caras ennegrecidas con negro de humo de naftalina, y la otra superficie pintada con pintura negra de pizarra.

-Placa de aluminio de 5x5 cm, 3 mm de espesor. Una cara con negro de humo y la otra pintada con negro esmalte.

-Placa de aluminio de 5 x5 cm, 1.5 mm de espesor. Una cara con negro de humo, y la otra es una superficie selectiva - desconocida (es un pedazo cortado de un colector obsequiada - por una delegación japonesa en su visita al Perú).

Resultados. Con la ayuda de un registrador, no es necesario tomar los tiempos t , ni el intervalo fijo Δt - ni las temperaturas, en forma directa, sino de los gráficos marcados por el registrador.

Muestra: Pintura negra de pizarra:

Del gráfico de la Fig 2.34 tenemos:

$$\Delta t = 23 \text{ mm}$$

$$T_0 - T_1 = 34 \text{ mm}, T_2 - T_1 = 26 \text{ mm}, T_2 - T_3 = 30 \text{ mm}$$

$$T_4 - T_3 = 33, \text{mm}, T_4 - T_5 = 30 \text{ mm}$$

La fórmula del cociente de absortancias, se reduce a

$$R = \frac{\alpha_x}{\alpha} = \frac{(T_0 - T_1) + 2(T_2 - T_1) + (T_2 - T_3)}{(T_2 - T_3) + 2(T_4 - T_3) + (T_4 - T_5)}$$

Reemplazando valores: $R = 0.92$

En los manuales la absortancia correspondiente al negro - de humo es $\alpha = 0.95 \pm 0.02$.

En consecuencia la absortancia de la pintura negro de pizarra será:

$$\alpha_x = 0.92 \times 0.95 = 0.87 \pm 0.05$$

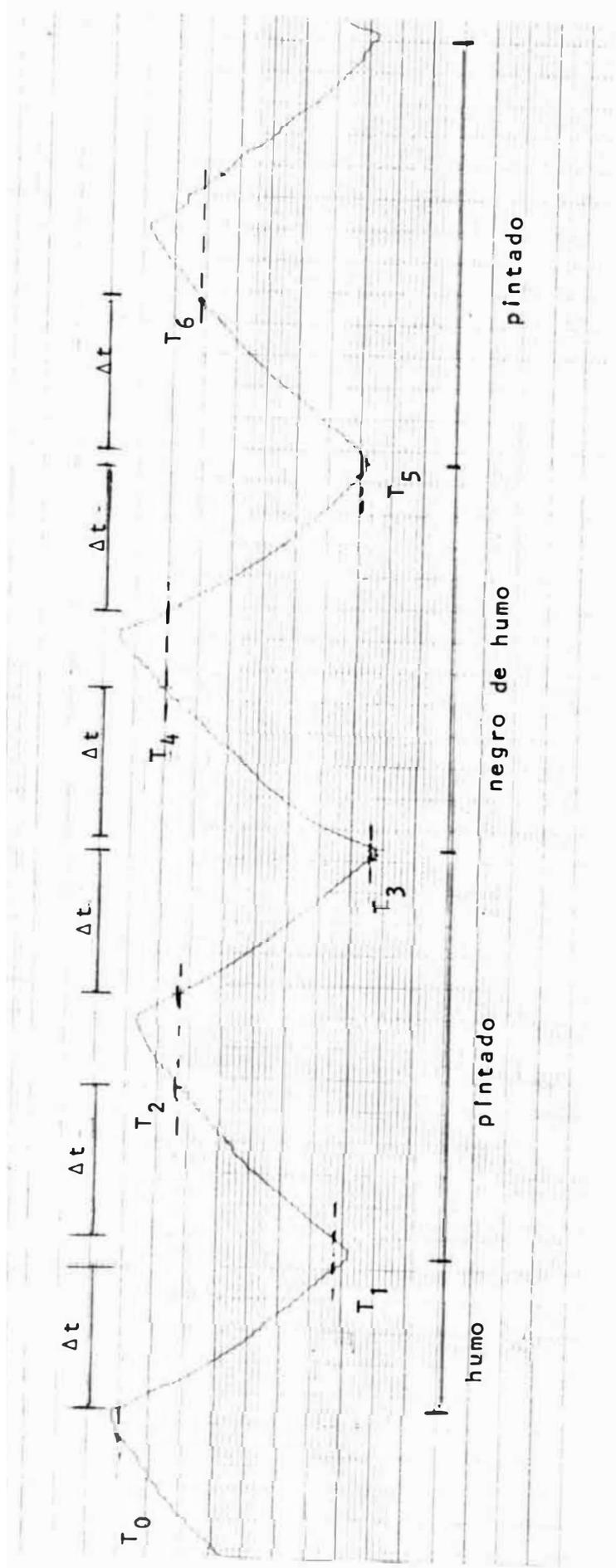


Fig. 2.34 Absortancia pintura negra de pizarra

Muestra: Pintura negra esmalte

Del gráfico proporcionado por el registrador, efectuando mediciones y reemplazando valores se llega a.

$$\alpha_x = 0.85 \pm 0.05$$

Muestra: Superficie selectiva del colector japonés:

En forma similar se obtiene: $\alpha_x = 0.8 \pm 0.05$

Demostración teórica de R:

Si llamamos I a la intensidad de la radiación solar, que se supone constante mientras dure el experimento A al área de la placa, α la absortancia patrón del negro de humo, α_x la absortancia de la muestra que se desea medir, τ la transmitancia del vidrio, podemos escribir las siguientes ecuaciones:

Para calentamiento:

$$A\alpha\tau I = mc \frac{\Delta T_c}{\Delta t} + \text{Pérdidas}$$
$$A\alpha\tau I \Delta t = mc \Delta T_c + \text{Pérdidas } \Delta t$$

Para enfriamiento: ($I = D$)

$$0 = -mc \frac{\Delta T_f}{\Delta t} + \text{Pérdidas}$$

$$\text{Pérdidas } \Delta t = mc \Delta T_f$$

Reemplazando esta ecuación en la primera.

$$A\alpha\tau I \Delta t = mc (\Delta T_c + \Delta T_f)$$

$$T_c = T_2 - T_1$$

$$T_f = \frac{T_0 - T_1 + T_2 - T_3}{2} \quad (\text{promedio de dos curvas de enfriamiento}).$$

Efectuando operaciones:

$$R = \frac{(T_0 - T_1) + 2(T_2 - T_1) + (T_2 - T_3)}{(T_2 - T_3) + 2(T_4 - T_3) + (T_4 - T_5)}$$

Comentarios. Es posible, por el procedimiento del experimento realizado calcular el valor de la intensidad de la radiación solar. En efecto, de la relación

$$A \alpha \tau I \Delta t = m c (\Delta T_c + \Delta T_f)$$

usada en la demostración del valor de R, despejando tenemos:

$$I = \frac{m c}{A \alpha \tau} \left(\frac{\Delta T_c}{\Delta t} + \frac{\Delta T_f}{\Delta t} \right)$$

Son medibles las cantidades m y A, son conocidas c, α y τ . El valor del paréntesis es posible determinarlo del gráfico de enfriamiento y calentamiento.

Para medir absortancias de cuerpos, cuyos valores difieren bastante del correspondiente a la del negro de humo, se usa una placa metálica perforada, que permite que a la superficie ennegrecida llegue solo una fracción de la radiación solar. El porcentaje de huecos de la placa, debe ser aproximadamente igual al porcentaje de la absortancia desconocida con respecto a la del negro de humo.

Usando el aparato para medir la absortancia de dos superficies iguales, los valores obtenidos del gráfico registrado de las curvas de calentamiento y enfriamiento fueron $R_1 = 1.03$, $R_2 = 0.97$, $R_3 = 1.01$.

Usando la placa con 50% de agujeros, para dos superficies iguales, se obtuvo $R = 2.10$.

Podemos pues estimar un error de $\pm 5\%$ en los valores de R dados por el equipo para comparar absorptancias de dos superficies.

11.5.2 Experimento No. 11. Determinación de la emitancia de una superficie.

Para una superficie de emitancia (o emisividad) ϵ , la intensidad de radiación emitida es: $I = \epsilon \sigma T^4$.

Para otro cuerpo de emisividad ϵ_x , a la misma temperatura, tendremos:

$$I_x = \epsilon_x \sigma T^4$$

Combinando las dos ecuaciones podemos calcular el valor de ϵ_x en función de ϵ .

$$\epsilon_x = \frac{I_x}{I}$$

El equipo utilizado en el experimento es el siguiente:

- Un calentador circular metálico cuyas dimensiones y características se pueden observar en la Fig. 2.35.

- Un radiómetro de rayos infrarrojos Kipp Zonen.

(Termopila compensada), cuyas características son:

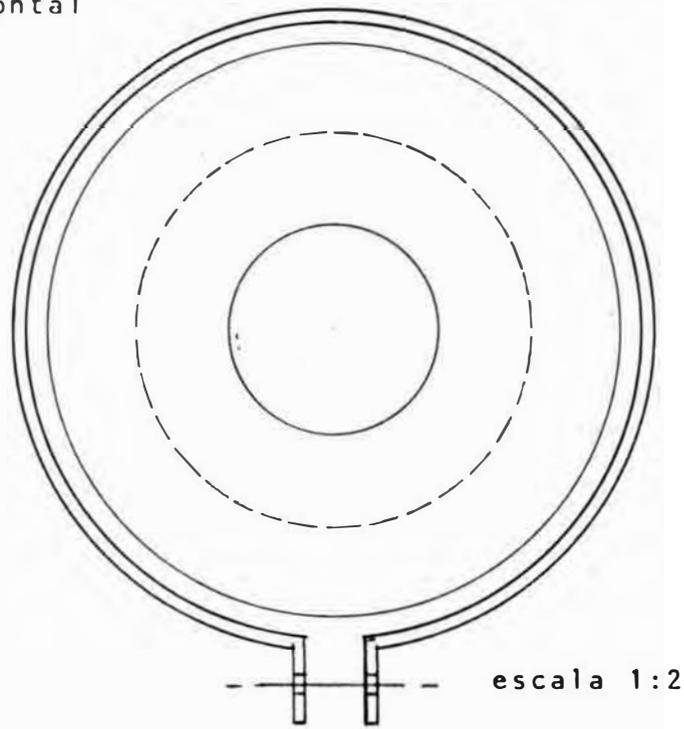
díafragma No. 4: $3.3 \mu V/Wm^{-2}$

díafragma No. 6: 6.5 "

díafragma No. 8: 9.5 "

Resistencia interna 45.2 ohmios.

vista frontal



corte

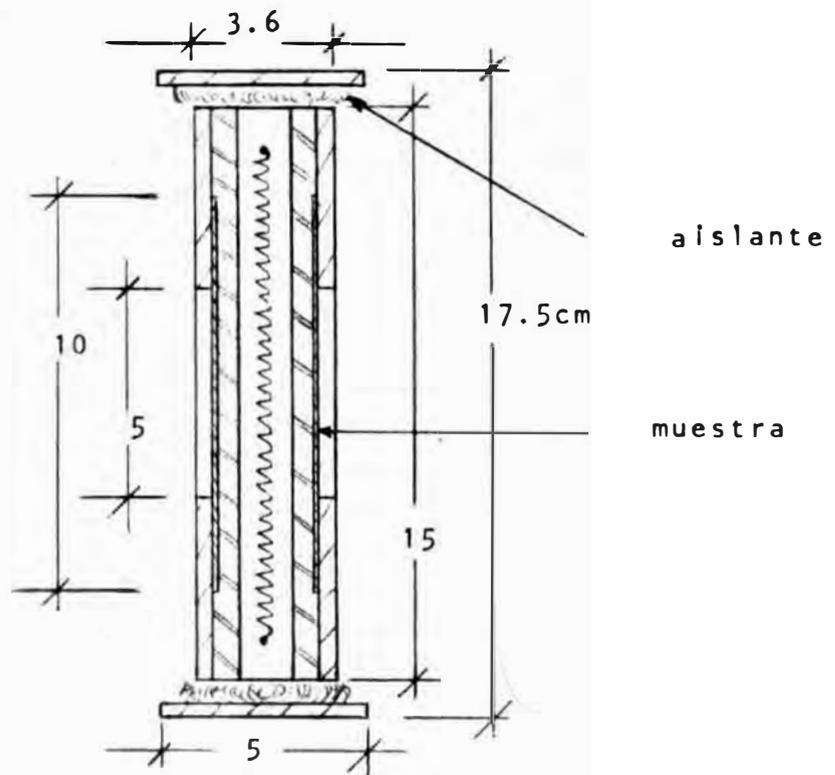


Fig. 2.35 Aparatos para medir emtancia

- Un milivoltímetro.

- Un voltímetro digital.

- Tres muestras circulares de cobre con sus termocuplas soldadas en su parte central. Una de las caras de la primera muestra ha sido ennegrecida con negro de humo. Otra cara de la segunda muestra ha sido pintada con pintura negro esmalte. La tercera muestra no es pintada.

En el experimento se usa como superficie de comparación, la ennegrecida con negro de humo, cuya emisividad llamaremos ϵ_0 . La emisividad de la pintura la designaremos por ϵ_1 , y la del cobre por ϵ_2 .

Procedimiento. Se conecta el calentador a una fuente de 80V, hasta que llega a un equilibrio térmico en unos 30 minutos aproximadamente.

Se acerca la termopila a la superficie ennegrecida midiendo en un voltímetro digital la radiación respectiva. Se repite la operación, midiendo la radiación de la superficie pintada, para lo cual se gira el calentador en 180° .

Debe controlarse con el milivoltímetro que las temperaturas de ambas superficies sean iguales y la posición de la termopila debe ser la misma para las dos superficies.

Resultados.

1a. medición

Sup. negro de humo: 0.28 mV

Sup. pintada con negro: 0.32 mV

2a. medición

Sup. negro de humo: 0.23 mV

Sup. cobre sin pintura: 0.07 mV

3a. medición

Sup. pintada con negro esmalte: 0.33 mV

Sup. cobre sin pintura: 0.09 mV

Obtenemos para la primera medición:

Emisividad de la superficie pintada con negro esmalte:

$$\epsilon_1 = 1.14 \epsilon_0, \text{ siendo } \epsilon_0 \text{ la emisividad correspondiente}$$

al negro de humo.

Para la segunda medición:

Emisividad del cobre sin pintura:

$$\epsilon_2 = 0.3 \epsilon_0$$

De la tercera medición: $\epsilon_2 = 0.27 \epsilon_1$ compatible con las dos primeras mediciones.

Comentario. Es un experimento que no es posible realizar los en todas las universidades, que carecen de un radiómetro de rayos infrarrojos. La falta de un voltímetro digital puede ser subsanada con un milivoltímetro

La aparente contradicción de que la pintura negro esmalte tiene mayor emisividad que la superficie ennegrecida con negro de humo, se debe a lo siguiente:

- Ennegrecimiento irregular de la superficie de cobre.

- La superficie del negro de humo no llega a tener la temperatura de la lámina de cobre indicada en la termocupla.

Sin embargo el método es conveniente para comparar la emisividad de una superficie con la de otra.

Independientemente de la realización del experimento, se constató que el hemisferio del vidrio usado en la construcción

de solarímetros absorbe la radiación infrarroja (sin vidrio el radiómetro nos dió una lectura de 0.26 mV y con vidrio 0.1 mV).

También surge la posibilidad de poder comprobar la ley de Stefan, variando la temperatura del horno y midiendo en el radiómetro las radiaciones respectivas.

11.6 CONVERSION FOTOVOLTAICA

Es posible la conversión de energía solar directamente en energía eléctrica. Es posible la explicación física del fenómeno en casi todos los casos. Sin embargo subsisten aún problemas físicos no resueltos así como problemas tecnológicos que presentan grandes dificultades en la construcción masiva y económica de estas "celdas solares".

Justamente una de las finalidades de las investigaciones actuales es propender al abaratamiento del costo y a la producción de otros tipos de células. En el último decenio, evidentemente que han habido logros significativos.

Como ejemplo señalaremos la reducción notable de costos producida en la célula solar de silicio monocristalino. (Ref. 10)

Década de 1960	\$ 100,000 / KW
Actual	11,000 / KW
1986 (se espera)	500 / KW

En forma simple la celda solar es un dispositivo que absorbe fotones del espectro solar para formar electrones.

La brecha de energía entre banda de valencia y la banda de conducción de una celda de silicio es de 1.1 eV. Todos los fotones con menor energía que ésta (en el lado del infrarrojo) no pueden ocasionar el movimiento de los electrones. Esta pérdida es de un 23% de la energía de la radiación solar no apro-

vechada por la celda para su conversión en electricidad.

Por otro lado los fotones del espectro solar de mayor energía que 1.1 eV (al lado del violeta) pierden su exceso de energía en excitar el electrón. Las pérdidas por este con-cepto, siempre refiriéndonos a la celda de silicio llegan a un 33%. Además se tienen otras pérdidas.

Teóricamente el mejor rendimiento que se puede obtener de una celda de silicio es de 23%. En laboratorio se han obtenido eficiencias de 15%. Las celdas comerciales tienen entre 10-12% de rendimiento.

11.6.1 Experimento No. 12. Construcción de una celda solar de silicio.

De un cilindro monocristalino de silicio con alto grado de pureza (obtenible comercialmente), es posible obtener una celda solar. El procedimiento seguido es el siguiente: (Ref. 6)

1. Corte de la barra de silicio. Con la máquina cortadora de alambre es posible cortar rebanadas de silicio. del espesor deseado. Para las celdas se cortó de 1 mm de espesor.

2. Fraccionamiento. La pastilla circular obtenida puede fraccionarse en seis partes iguales colocando un punzón en la parte central del disco de silicio y dándole un golpe suave, pero seco, perpendicular a la superficie del disco.

3. Esmerilado de las caras. Uno de los seis pedacitos - será convertido en celda solar. Las dos caras se esmerilan sobre una lámina de vidrio con carborundum No. 280, con el fín de eliminar irregularidades. Se lava con agua y se enjuega con agua destilada. Una de las caras se vuelve a esmeri - lar usando carborundum No. 600, a presión leve durante algu

nos minutos. Nuevamente se lava con agua y se enjuaga con agua destilada.

4. Decapado de la pastilla: La pastilla ya esmerilada se sumerge en una solución de una parte de ácido fluorídrico y dos partes de ácido nítrico, durante dos minutos. Lavar y enjuagar. El decapador tiene por finalidad hacer más receptiva la superficie del silicio para el dopado posterior.

5. Dopado de la pastilla. La cara esmerilada con carborundum No. 600, se dopa con una mezcla de una parte de ácido bórico y cinco partes de slendum. Se hace una pasta fina con estos compuestos y un poco de agua destilada. Con un palillo de dientes, en la cara esmerilada se coloca la mezcla, cubriendo totalmente la superficie, sin preocuparse si rebalsa. Se deja secar por un tiempo suficiente. El dopado tiene por finalidad introducir en una capa muy fina del silicio átomos de boro.

6. Calentar un horno a una temperatura de 1050°C. Dentro de un tubo de cuarzo, con la cara pintada hacia arriba, se introduce la pastilla en el horno, con la ayuda de una espátula y una pinza. El calentamiento se realiza durante 15 minutos, después de los cuales se saca la muestra y se enfría en el aire.

7. Baño en ácido. En un depósito de plástico con H_2SO_4 diluído (una parte en 10 de agua), se agrega 1/8 de cucharadita de CaF_2 . Se sumerge la pastilla de silicio en el compuesto por espacio de algunas horas, hasta conseguir el desprendimiento total de la capa de decapado. Lavar con agua y enjuagar con agua destilada (No tocar con los dedos, sino será imposible el níquelado de la pastilla).

8. Cubrir con cinta autoadhesiva la superficie difundida del silicio, dejando una ranura delgada en su eje.

9. Niquelado de la muestra. En un depósito de pírex colocar:

3 gr de cloruro de níquel
1 gr de hidrofosfito de sodio
6.5 gr de citrato de amonio
5 gr de cloruro de amonio

Disolver con agua destilada hasta completar 110 ml de solución.

Filtrar la solución. Colocar la solución en baño maría, cuyo nivel de agua debe coincidir con el nivel de la solución. Hervir durante 5 minutos. Agregar algunas gotas de NH_4OH al 10% hasta que la solución pase de cobre verde a azul. Colocar la pastilla de silicio dentro de la solución y tapar el depósito con lámina de vidrio.

En aproximadamente 20 minutos debe aparecer en la pastilla una superficie blanca. Secar la muestra, enjuagar y desprender los trozos de cinta adhesiva.

10. Depositar soldadura en ambas caras del silicio niquelado.

11. Escobillar los bordes para evitar cortocircuitos.

12. Soldar los conductores a ambas caras de la muestra, con lo cual la celda solar debe estar en condiciones de transformar energía solar en energía eléctrica.

Comentario. En el laboratorio de Física de la UNI, se están realizando trabajos de investigación de celdas solares de diferentes tipos.

Se está buscando una técnica más conveniente para obtener celdas solares de silicio con mayores rendimientos.

De las celdas solares construídas con mi participación la que tuvo mayor eficiencia fue la que permaneció en el horno durante 18 minutos.

11.6.2 Experimento No. 13. Características de la celda solar.

Se trata de conocer la máxima potencia que se puede obtener de una celda solar así como su eficiencia. (Ref. 11).

La célula solar es la utilizada en la construcción del solarímetro. (Solarex. Edmund Scientific Co., Modelo 30817).

a) Curva característica. Conectar la celda a un miliamperímetro, a un voltímetro y a una caja de resistencias, en la forma indicada en la figura 2.36.

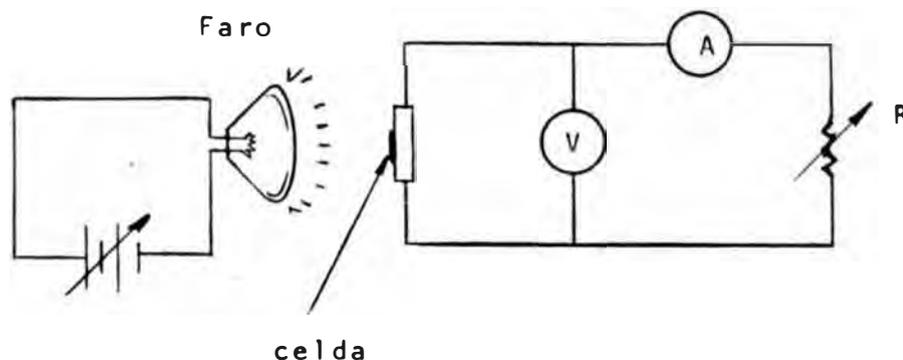


Fig. 2.36 Circuito para determinar características de la celda solar

El faro de un automóvil es de 50 W y se ha colocado a unos 20 cm de la celda solar.

Encendiendo el faro, y manteniendo constante su voltaje, medir en el voltímetro el voltaje en circuito abierto y en el amperímetro la corriente en corto circuito. Para valores diferentes de la resistencia variable tomar lecturas del voltaje y la corriente. Repetir el procedimiento anterior dos veces más, para distintas intensidades de iluminación del faro.

Se han obtenido los siguientes valores:

1ra. medición:	R(ohmios)	V(voltios)	I(mA)	P(mW)
	0	0.084	30	2.52
	3	0.201	28.1	5.64
	8	0.296	26	7.7
	10	0.348	24	8.35
	15	0.388	21	8.36
	20	0.426	18	7.67
	30	0.454	14	6.36
	40	0.466	11	5.13
	50	0.473	9	4.26
	70	0.481	7	3.37
	100	0.485	5	2.22
	sólo volt.	0.510		
2a. medición:	0	0.053	20	1.06
	5	0.173	18.8	3.25
	10	0.246	17.5	4.3
	14	0.300	16	4.8
	20	0.346	14	4.8
	30	0.383	11.5	4.4
	40	0.406	9.2	3.7
	50	0.418	8	3.3
	100	0.440	4.5	2
	200	0.451	2.5	1.1
	sólo volt.	0.451		

3ra. medición:	R(ohmios)	V(voltios)	I (mA)	P (mW)
	0	0.027	10	0.3
	5	0.093	9.5	0.9
	10	0.136	9	1.2
	20	0.207	8.2	1.7
	30	0.259	7.5	1.9
	40	0.295	6.8	2
	50	0.319	6	1.9
	75	0.355	4.5	1.6
	100	0.372	3.8	1.4
	200	0.396	2	0.8
	solo volt.	0.413		

Los valores de la potencia P, han sido calculados. De los valores anteriores resultan los gráficos en la Fig. 2.37 de los cuales se obtienen los valores máximos de la potencia que puede proporcionar la celda solar para diferentes intensidades de iluminación.

Para la 1ra. medición: $P = IV = 22.5 \times 0.38 = 8.5 \text{ mW}$

Para la 2da. medición: $P = IV = 14.5 \times 0.34 = 4.9 \text{ mW}$

Para la 3ra. medición: $P = IV = 6.8 \times 0.3 = 2 \text{ mW}$

Un hecho importante es que el mejor voltaje de trabajo varía poco para los diferentes casos (alrededor de 0.34 voltios) mientras que la potencia y la corriente varían fuertemente.

Para trabajos con altos voltajes, se deben usar células conectadas en serie. Si se desea más corriente que la que puede producir una celda, se deben conectar varias celdas en paralelo.

Se repitió el experimento con la radiación solar perpendicular a la celda el 22 de febrero de 1980 a las 12.00 hs, con los resultados siguientes:

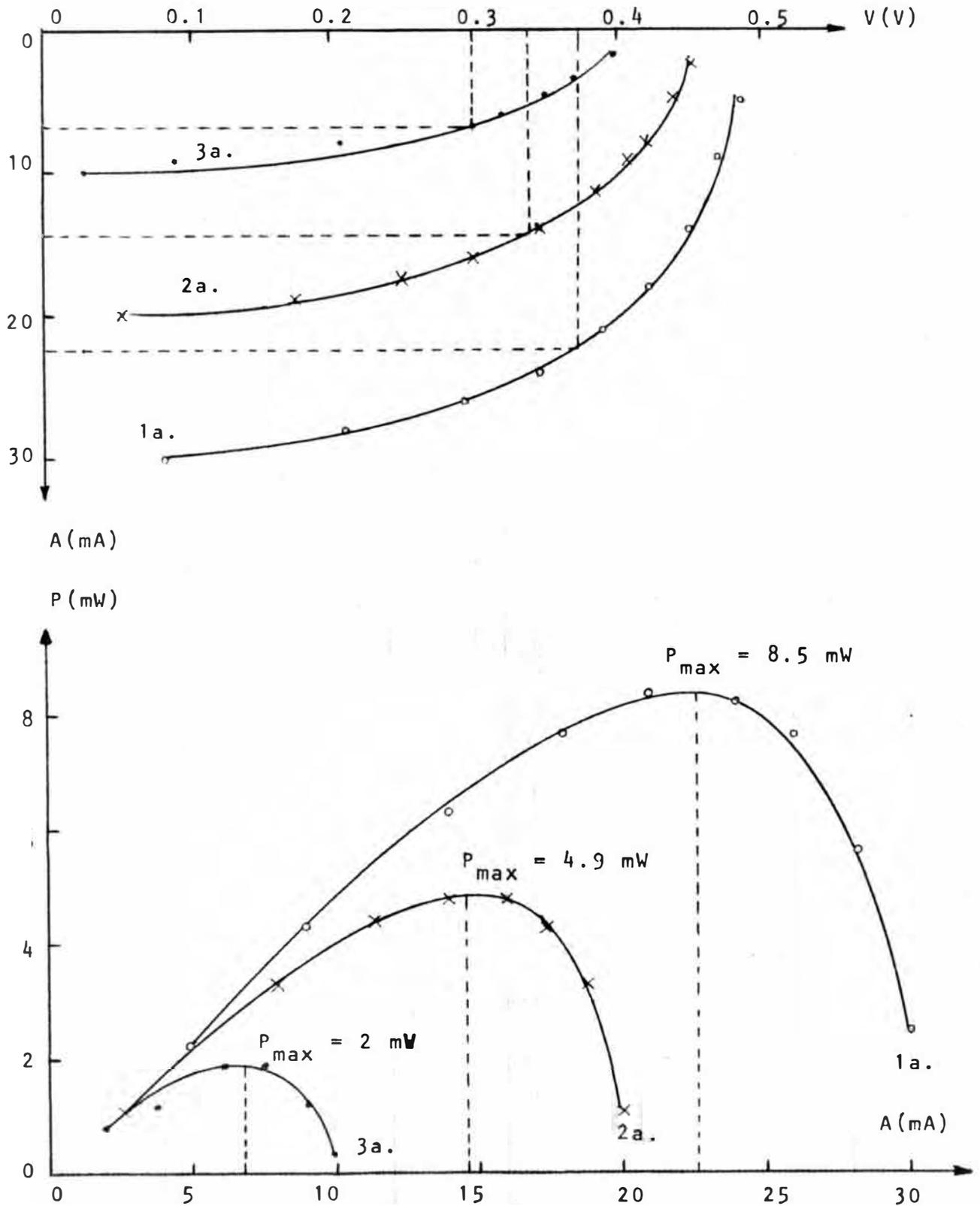


Fig. 2.37

R (ohmios)	V (Voltios)	I (mA)
0	0.065	22
4	0.211	21
10	0.285	20
20	0.381	17
30	0.431	14
40	0.455	11
50	0.469	9
100	0.485	5
200	0.505	2
solo volt.	0.510	

La potencia máxima correspondiente es:

$$P = IV = 17 \times 0.38 = 6.4 \text{ mW}$$

b) Eficiencia de la celda. La eficiencia de la celda está dada por el cociente entre la potencia eléctrica extraída de la celda y la potencia de la radiación solar incidente.

Se tienen los siguientes datos:

$= 700 \text{ W/m}^2 = 0.07 \text{ W/cm}^2$ medido con el solarímetro fotovoltaico recientemente construído, en el momento de realizar el experimento.

Area total de la celda = 1 cm^2

Potencia eléctrica extraída de la celda = $6.4 \text{ mW} = 6.4 \times 10^{-3} \text{ W}$

Potencia de la radiación solar incidente = $IA = 0.07 \text{ W}$

En consecuencia, la eficiencia de la celda = $9\% \pm 1\%$.

III FORMACIÓN DE UNA INFRAESTRUCTURA HUMANA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR

En el Perú, la falta de profesionales o técnicos que tengan conocimientos y experiencia en el uso de la energía solar representa el principal impedimento para implementar en todo el país tecnologías solares simples y comprobadas. (Ref. 12).

Es pues momento en que las universidades se preocupen profundamente del problema, formando o ayudando a formar una infraestructura humana, para el aprovechamiento de la energía solar.

La UNI cuenta con un grupo de docentes que están efectuando investigación solar, con laboratorios de energía solar, con información bibliográfica actual, con los últimos adelantos y descubrimientos sobre la materia.

Se considera como parte importante de la presente tesis contribuir con este grupo de investigación en energía solar en el desarrollo de una propuesta para hacer posible la formación de una infraestructura humana para el aprovechamiento de la energía solar en el Perú.

Se propone las siguientes acciones:

- a) Curso de especialización en energía solar.
- b) Convenios con otras universidades.
- c) Seminario-Talleres anuales en diferentes regiones del Perú.
- d) Otras.

Además del objetivo central y común a todas las acciones indicadas, de la formación de una infraestructura humana, se pueden señalar otros objetivos, también comunes:

-Contribuir a la utilización significativa del sol como fuente de energía, en reemplazo de otras fuentes convencionales de energía.

-Aumentar el "know-how" del Perú sobre las diferentes técnicas del uso de la energía solar.

-Crear polos de desarrollo regional en el uso de la energía solar.

Acción A: Curso de especialización en energía solar

A continuación se describe con detalle las características de una propuesta para establecer en la UNI unos cursos anuales de Especialización en Energía Solar. También se elaboró un proyecto de Reglamento para este curso. (Ref. 13).

1. Fundamento Legal

El Estatuto General de la Universidad Peruana, la Ley General de Educación, facultan a las universidades para que puedan ofrecer cursos de especialización profesional, así como otorgar las correspondientes diplomas.

Actualmente la Universidad Nacional de Ingeniería ofrece, con aprobación del Consejo Ejecutivo, dos cursos diferentes - de Segunda Especialización a nivel de post-grado: Hidrología Aplicada (Ref. 14) y Curso Básico de Planificación Urbana y Regional (Ref. 15).

Cada uno de estos cursos, tiene sus características y modalidades propias.

Otras Universidades, también ofrecen cursos de Segunda Especialización.

Ultimamente por D.S. 001-ED el Gobierno asigna una bonificación del 5% sobre el haber básico a los profesores del Sistema de la Universidad Peruana, que posean estudios de Segunda Especialización.

El Reglamento de Grados Académicos y Títulos Profesionales de la UNI, en sus artículos 15 y 16, se refiere a los requisitos y procedimientos para la obtención del título de Especialista.

2. Organización del curso.

2.1 Requisitos de Ingreso

- Tener título profesional en Ingeniería (cualquiera de las especialidades) Arquitectura o Ciencias.
- Haber aprobado el examen de evaluación y alcanzar una de las vacantes existentes.
- Pagar los derechos correspondientes.

2.2 Examen de evaluación

Es obligatorio para todos los postulantes. Tiene como finalidad garantizar que los ingresantes posean una preparación básica necesaria para comprender el dictado de las asignaturas.

2.3 Ciclos de Estudio

El curso será dictado en dos ciclos consecutivos. Cada Ciclo tendrá una duración de 17 semanas, incluyendo los períodos de evaluación. Entre ciclo y ciclo habrá un descanso de 4 semanas. La duración total del curso será de 9 meses.

En el primer ciclo, se dictarán asignaturas teóricas, básicas para la comprensión de la radiación solar, transferencia de calor y energías no convencionales. Estos cursos tie

nen el carácter de obligatorios para los estudiantes.

En el segundo ciclo se dictarán asignaturas de aplicación en arquitectura solar, colectores solares, electricidad solar, etc. Tienen el carácter de electivos. Este ciclo se dictará en Verano.

En ambos ciclos, habrá un curso experimental con la realización de numerosos experimentos sobre energía solar así como el dictado de conferencias sobre tópicos especiales.

Durante el segundo ciclo, el alumno deberá realizar un Trabajo Práctico.

2.4 De los Alumnos

Los alumnos deberán dedicar todo su tiempo al estudio y comprensión de las asignaturas dictadas, así como a la realización de experimentos, y seminarios, debiendo matricularse en 15 créditos en cada ciclo.

Excepcionalmente, la Dirección del Programa Académico podrá autorizar la matrícula de alumnos, en un número menor de créditos.

La aprobación de los 30 créditos, deberá efectuarse en un plazo máximo de dos años.

2.5 Trabajo Práctico

Durante el Segundo Ciclo, los alumnos deberán realizar un Trabajo Práctico, que tiene un peso de 7 créditos.

El trabajo práctico, puede ser realizado en forma individual o colectiva. El Tema será fijado por el alumno y el profesor asesor; deberá estar relacionado con las materias enseñadas. Preferentemente el Trabajo Práctico, debe incluir - la construcción de un artefacto de aprovechamiento de Energía

Solar, de utilidad en la región de procedencia del alumno.

2.6 Diploma de Especialización Profesional

Será otorgado a nombre de la Nación por la Universidad Nacional de Ingeniería, con las firmas del Sr. Rector, Secretario General de la Universidad y Director del Programa Académico correspondiente, a los alumnos que hayan cumplido con los siguientes requisitos:

- Aprobar un mínimo de 23 créditos en asignaturas, Seminarios o Laboratorios, correspondientes al Plan de Estudios.
- Haber aprobado la sustentación del Trabajo Práctico.
- Haber pagado los derechos correspondientes.

3. Plan de Estudios

PRIMER CICLO

Asignaturas obligatorias	Teor.	Prác.	Total	Créditos
Problemas Energéticos y energías no convencionales	2	0	2	2
2 Radiación Solar	2	2	4	3
3 Energía Solar Básica	3	2	5	4
4 Transferencia de calor	3	2	5	4
5 Energía Solar Experimental	0	4	4	2
Totales	10	10	20	15

SEGUNDO CICLO

Obligatorios	Teor.	Prác.	Tot.	Créd.	Pre-req.
6 Energía Solar Experimental II	0	4	4	2	(3)
7 Seminarios	0	4	4	2	10 Créd.
8 Trabajo Práctico				7	10 Créd.
Electivos (Escoger dos asignaturas)					
9 Tópicos Especiales en Energía Solar					
A Arquitectura Solar		2	3	2	(2)
B Colectores Solares		2	3	2	(4)
C Concentradores Solares		2	3	2	
D Electricidad Solar		2	3	2	
E Enfriamiento Solar		2	3	2	(2)
F Tecnología de Construcción de Aparatos Solares		2	3	2	(3)
Totales				15	

Los sílabos de las asignaturas son elaborados en la referencia 13. Asimismo en esta referencia se incluye capítulos sobre la infraestructura humana y material existente en la UNI y sobre la financiación del curso.

Acción B: Convenios con otras universidades

Con la Universidad de Tacna se ha firmado un convenio en 1979. Con la Universidad del Cusco en marzo de 1980. Ambos convenios tienen por objeto contribuir a un mayor desarrollo de los recursos humanos y de las facilidades materiales en el área de la Física Experimental.

Similares convenios deben ser firmados con otras universidades del país. Existen conversaciones preliminares con Huaraz, Huánuco y Cajamarca.

Dentro de los convenios se prevee el entrenamiento de profesores de las universidades del interior del país en la UNI, por un período de doce meses, viajes de coordinación, i dentificaciones de aplicaciones concretas de la energía so

lar en la región respectiva, así como el equipamiento básico de las bibliotecas y laboratorios de estas universidades, para poder iniciar trabajos en energía solar.

Acción C: Seminario-Taller en diferentes regiones del país

Estos seminarios tendrían una duración de cuatro semanas, con la concurrencia de 40 participantes de todo el país. Deben efectuarse en forma rotativa entre diferentes universidades (un seminario cada año). Incluye la construcción de artefactos simples, de aplicación masiva, tales como calentadores solares de agua para diversos usos y secadores solares para productos agrícolas. Los seminarios serían organizados en base a un acuerdo entre la UNI y la universidad sede.

El presupuesto para la realización de estas actividades es:

20 becas de un mes a S/. 50,000	S/. 1'000,000.00
10 pasajes	250,000.00
3 profesores (más viáticos y pasajes)	600,000.00
Servicio de Secretaría	25,000.00
Coordinación previa (más viáticos y pasajes)	50,000.00
Mano de obra local y contratación de un taller	200,000.00
Materiales	400,000.00
Varios (comunicaciones, imprevistos, etc.)	100,000.00
Equipos menores para implementar el Laboratorio de la Universidad sede	400,000.00
Bibliografía	600,000.00
Total por seminario	S/. 3'625,000.00

Para implementar esta acción se debe buscar un apoyo económico externo, sea a través de la industria nacional, o la cooperación internacional.

Acción D: Otras

Adicionalmente se debe ofrecer, regularmente, charlas, - conferencias para despertar el interés en el uso de la energía solar. Considerando que en la UNI existe un cuerpo idóneo y competente de profesores con especialidad en energía solar, - se puede ofrecer regularmente en la UNI cursillos para el aprendizaje de principios básicos y de aplicaciones simples, con tecnología propia de la energía solar, para las personas que viven en la ciudad de Lima y que no puedan asistir a las otras acciones.

Finalmente, es conveniente difundir en diarios y revistas, los avances logrados, para llegar al gran público que en su casi totalidad desconoce aún el problema.

IV CONCLUSIONES

La falta de profesionales o técnicos que tengan conocimientos y experiencia en el uso de la energía solar representa el principal impedimento para implementar en todo el país tecnologías simples y comprobadas del uso de la energía solar. Las universidades deben colaborar en la formación de una infraestructura humana para el aprovechamiento de la energía solar.

Se disponen de las condiciones básicas mínimas necesarias para iniciar de inmediato algunas acciones para la formación de dicha infraestructura humana:

Se propone las siguientes acciones:

a) curso de especialización en energía solar, a cargo de docentes de la UNI, que cuenta con un grupo de docentes - de investigación solar, con laboratorios de energía solar y con información bibliográfica conveniente.

b) convenios entre universidades, para un mayor uso de energías no convencionales.

c) realización anual de Seminario-Talleres con duración de cuatro semanas, en diferentes puntos del país.

d) divulgación de los conocimientos y técnicas adquiridos, para conocimiento del público.

Para estas acciones existe la necesidad de desarrollar experimentos y cursos experimentales completos sobre energía solar en base a la infraestructura humana y material existentes.

Hay en el país, expertos que pueden entender los progre sos y posibilidades de la energía solar, usando materiales, instrumentos y mano de obra obtenible en muchas universidades.

Los experimentos descritos, desarrollados y analizados - en la presente tesis pueden servir en la formación de la In fraestructura humana. Del punto de vista de la menor o mayor factibilidad de su realización, ellos pueden clasificarse en:

a) Tipo "casero", en los cuales se emplean solamente ma teriales o artefactos de uso hogareño: "sombra" del sol en un plano (Exp. No. 3), medición de la radiación solar por fun dición del hielo (Exp. No. 4), medición de la radiación solar por calentamiento del agua (Exp. No. 5).

b) Pueden ser realizados con los equipos existentes en cualquier universidad, incluso en algunos colegios: determ inación de un eje paralelo al eje de la rotación de la tierra (Exp. No. 1), determinación de la latitud del lugar y de la declina ción del sol (Exp. No. 2), medición de la radiación con sola- rímetros constru ídos en cada universidad (Exp. No. 6 y No. 7), potencia y eficiencia de un colector solar plano (Exp. No. 9), determinación de la absorción de una superficie (Exp. No. 10), características de una celda solar (Exp. No. 13).

c) Experimentos que necesitan para su realización de e quipos no disponibles en la mayoría de universidades del país: medición de la radiación directa y difusa en un intervalo de tiempo (Exp. No. 8), determinación de la em itancia de una su perficie (Exp. No. 11), construcción de una celda solar (Exp. No. 12).

Consideramos necesario continuar con el esfuerzo, desarrollar más experimentos en las tres categorías indicadas y conseguir su divulgación amplia en universidades y colegios.

Así se puede contribuir a la formación de una conciencia a nivel de toda la población, de la necesidad de desarrollar - cada vez más el uso de la energía solar.

RIBLIOGRAFIA

1. DUFFIE - BECKMAN
Solar Energy Thermal Processes
J. Wiley 1977
2. AQUIJE, Alejandro
Informe: Determinación del Norte geográfico en el Departamento Académico de Física
Departamento de Topografía, UNI 1980
3. ROELOFS
Astronomy Applied to Land Surveying
Wed - Abrendzoon. Amsterdam 1950
4. A.B. MEINEL & M.J. MEINEL
Applied Solar Energy an Introduction
Addison Wesley 1977
5. EATON - DE GEER - FREIER
The Solar Constant: a take home lab.
Physics Teacher 15 (1977), 172 - 158
6. CHAPIN
Energy for the Sun
Bell Telephone Laboratories 1968
7. BASSO - AVELINE - CORBELLA
Construcao e análise de um solarímetro para a medida da radiação solar global
Trabajo presentado al 2o. Congreso de Energía Solar
Joao Pesos. Paraiba. Brasil 1978
8. VELLA - GOLDSMID
Simple experiments on the use of solar energy.
Physics Education 6 (1976), 413 - 414
9. TABOR - STEINBERGER
An Instrument for measuring absorptivities for solar radiation
Journal of Scientific Instruments 33 (1958) 356, 358

10. H. EHRENREID
Solar Photovoltaic Energy Conversion
Principal Conclusions of the American Physical Society
1979
11. JUSTER
"Les Cellules Solaires"
Editions Techniques et Scientifiques Francaises 1978
12. HORN, MANFRED
"La Energía Solar y sus Perspectivas"
Primer Simposio Nacional de Energía y sus Perspectivas
Lima 1979
13. Grupo de ENERGIA SOLAR, UNI
Proyecto: Curso de Especialización en Energía Solar,
presentado por el Grupo al D.A. de Física 1980
14. P.A. de INGENIERIA CIVIL, UNI
Curso de Segunda Especialización Profesional en Hidrología Aplicada 1975
15. P.A. de INSTITUTO DE PLANEAMIENTO DE LIMA
Curso Básico de Planificación Urbana y Regional 1977