

ENSAYO DE COLECTORES SOLARES

J. L. Guerrero, R. H. Heredia, M.R. Heredia y R. L. Plos
EMEGE S.A.

Avellaneda 1333, 1405 Buenos Aires

Resumen

Se describen los ensayos de colectores prototípicos, desarrollados para su posterior industrialización, los modelos y el banco de experimentación.

Asimismo se muestra el procedimiento de elaboración de los resultados y su justificación en base a los errores experimentales.

Se presentan los resultados obtenidos de algunos de los prototipos.

Introducción

Dada la importancia de la constatación experimental del comportamiento de los colectores prototípicos desarrollados en EMEGE S.A., para luego ser producidos en serie, es que se diseñó y construyó un banco de ensayos que permite evaluar los parámetros fundamentales de los colectores, así como otras características de subsistemas de instalaciones solares para calentamiento de líquidos.

Estas aplicaciones adicionales del banco se pueden resumir en las siguientes:
a) Estratificación y pérdidas de calor globales en tanques de almacenamiento de diferentes regímenes de uso y b) función de rendimiento de intercambiadores en diferentes regímenes.

Se ha tenido especial cuidado en mantener flujos laminares en los colectores evitando totalmente las perturbaciones de alta frecuencia producidas por bombas en el mismo circuito.

Los modelos de ensayo son los que más se acercan al funcionamiento real. Se han seleccionado éstos de una amplia bibliografía condensado en (2) y de criterios de uso de la información.

También se ha prestado atención a la elaboración e interpretación de los resultados experimentales llegándose a conformar un procedimiento de regresión coherente con las mediciones.

Descripción del Banco de Ensayos

El banco de ensayos para colectores se construyó en la terraza de la planta industrial de EMEGE S.A. en la Capital Federal. Consta de una plataforma de chapas estampadas sobre la cual se apoya el soporte de los colectores que es móvil para permitir orientar a los mismos acimutal y cenitalmente.

Posteriormente se construyó una cabina de mediciones sobre la misma plataforma proyectada específicamente y construida de tal manera que se puede desmontar para un eventual mantenimiento y/o traslado.

El resto del banco está constituido además por dos termotanques y un enfriador los que se describen conjuntamente con el circuito hidráulico, así como el instrumental, el circuito de sensores y el resto de los elementos del circuito eléctrico.

Circuito Hidráulico

Se controla durante el tiempo en que se están realizando mediciones desde un tablero de válvulas al alcance de la mano del técnico que esta operando. Desde allí se regula el caudal, se hace recircular el agua entre los dos termotanques para homogeneizar la temperatura de ambos, se desvía hacia el enfriador, etc.

La alimentación con agua al circuito se hace desde el tanque principal de la fábrica al termotanque inferior llamado también tanque de suministro. Fig. 1

Si el fluido a usar no es agua, se puede cargar por un conducto que a la vez sirve para purgar o extraer todo el fluido del circuito.

Una vez lleno el tanque de suministro (se puede apreciar su nivel en un indicador paralelo al mismo) se llena el termotanque superior que es el tanque de nivel constante.

Ambos tanques están contruídos en chapa de acero estampada, soldada y galvanizada, y aislados térmicamente con lana de vidrio contando con un gabinete exterior tambien en chapa de acero pintada.

El tanque de nivel constante tiene un vertedero de alivio que permite cumplir su función lo que se puede corroborar por el indicador de nivel similar al mencionado para el tanque de suministro.

El fluido que va a la entrada de el/los colector/es sale de este ultimo tanque a la presión dada por la altura constante del nivel y pasa por el tablero.

de control desde donde se regula su caudal.

Antes de la entrada a los colectores el circuito tiene en su parte superior una válvula de venteo que se repite en la salida de cada uno de los colectores para permitir el escape de posibles burbujas de aire.

También en la entrada de cada colector hay una válvula esclusa para anularlo a voluntad.

En la entrada y salida de cada colector se conecta además cada uno de los extremos de un manómetro que permite apreciar la pérdida de carga en el fluido al atravesarlo, en mm de columna de agua.

Luego el fluido entra en la cabina de mediciones donde se puede controlar el caudal. Visualmente en cada circuito se puede verificar su constancia en sendos caudalímetros, se mide el caudal másico con una balanza y un cronómetro pesando la cantidad de agua que pasó en la unidad de tiempo. Esto se hace para obviar las variaciones de viscosidad y peso específico en función de la temperatura.

El fluido vuelve al tanque de suministro pudiendo pasar por un enfriador en el cual se le puede quitar calor o bien por un by-pass, evitándolo.

Desde el tablero de comando hidráulico se puede enviar también el agua del tanque de suministro al enfriador para variar su temperatura.

Sensores de Temperatura y Radiación Solar

El banco de prueba de colectores solares está equipado con un solarímetro fotovoltaico conectado simultáneamente a un milivoltímetro y a un integrador; el primero da la radiación instantánea y el segundo, conjuntamente con un cronómetro da la radiación promedio recibida durante el intervalo de medición por $n = 2$ Fig 2)

Las temperaturas en los distintos puntos se toman con termorresistencias conectadas a un termómetro de puente eléctrico con amplificación electrónica y resolución de 0,1° C. Las termorresistencias se unen al termómetro mencionado a través de una llave selectora de 12 canales y se verifican periódicamente en un baño termostático Fig. 2)

Circuito eléctrico

Se entra con línea trifásica y conexión a tierra a través de un interruptor principal con fusibles. Este interruptor se encuentra con todos los interrup-

tores y elementos de seguridad en un tablero de comando al alcance de la mano - del técnico que realiza las mediciones.

Este tablero eléctrico tiene además de los interruptores de circuitos un disyuntor diferencial de toda la instalación (dada la peligrosidad por el manejo simultáneo del agua) y fusibles para el circuito de instrumentos de medición.

Desde este tablero se comandan la bomba de elevación, el enfriador y los auto-transformadores variables asociados a las resistencias de calentamiento del fluido (Fig. 3.).

Modelos de ensayo

Los modelos de ensayo realizados sobre los colectores son los siguientes:

- 1) Determinación experimental de la función del rendimiento
- 2) Aislación global según distintas temperaturas
- 3) Pérdidas de carga en función del caudal y la temperatura.

1) La función del rendimiento del colector que se halla experimentalmente es:

$$\eta = F'(\alpha \tau - U\psi)$$

donde: $\eta = \frac{Q_{abs}}{I}$, es el rendimiento físico (adimensional).

F' , es un factor de transmisión del calor en sentido transversal al flujo del agua (adimensional).

α y τ , son la absorptancia de la superficie receptora y la transmitancia de la cubierta de vidrio (ambas dimensionales).

U , es el coeficiente global de pérdidas $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$ por unidad de área del colector.

$\psi = \frac{1/2(t_e + t_s) - t_a}{I}$ es el salto de temperatura relativo según la radiación solar incidente.

Además: $Q_{abs} = \dot{m} c_p (t_s - t_e)$, es el calor absorbido instantáneamente por el agua en el colector $\left[\frac{W}{m^2} \right]$ $\dot{m} = \frac{M}{TS}$

\dot{m} , es el caudal másico por unidad de área $\left[\frac{Kg}{seg. m^2} \right]$

M , es la masa que circula por el colector en un determinado tiempo $[Kg]$.

T , es el tiempo de medición de M . (seg)

S , es el área eficaz del colector $[m^2]$

ρ , es el calor específico del agua = $4,168 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$

t_s , es la temperatura de salida del agua del colector $[^\circ C]$

t_e , es la temperatura de entrada del agua al colector $[^\circ C]$

I , es la radiación solar instantánea global $[\frac{W}{m^2}]$
la que se halla como promedio de la incidente durante
da experiencia con un integrador y un cronómetro.

t_a , es la temperatura ambiente $[^\circ C]$

Es de hacer notar que para comparar los colectores, no se emplea la expresión:

$$\eta = F_R (\overline{\alpha} - U \frac{t_e - t_a}{I})$$

Esto se debe a la variabilidad del factor adimensional de remoción del calor F_R con el salto de temperaturas entre la entrada y salida del colector. F_R incluye una corrección por las variaciones de temperatura en el receptor F'' a lo largo del flujo de agua es decir:

$$F_R = F' F''$$

y precisamente F'' varía con el salto térmico entre la entrada y la salida.
Cuando:

$$\begin{array}{l} t_s \longrightarrow t_e \\ F'' \longrightarrow 1 \\ F_R \longrightarrow F' \end{array}$$

Como es de esperarse los resultados experimentales arrojan mayor dispersión con el empleo de la expresión con F_R . Además en funcionamiento real por termosifón este salto térmico es esencialmente variable y en régimen forzado rápido prácticamente

$$F_R = F'$$

2) Si bien al relevar la recta de rendimiento se obtiene el valor de la aislación global U , esta es para temperaturas relativamente altas, que son las de funcionamiento del colector.

Para una serie de determinaciones, entre ellas situaciones de congelamiento, es necesario también conocer el valor que toma la aislación en función de tem-

peraturas medias del fluido menores que las antedichas, es decir:

$$U = f\left(\frac{t_e + t_s}{2}\right) \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$$

La caída de U se debe a la disminución de las pérdidas radiantes y los coeficientes de conducción y convección en los aislantes y capas de aire respectivamente.

Estas experiencias interesan realizarse en horas de la noche, con cielos despejados y con temperaturas ambientes cercanas a $0^\circ C$

Se halla entonces la recta:

$$U = U_0 + k \left(\frac{t_e + t_s}{2}\right)$$

donde U_0 el valor de U para $\frac{t_e + t_s}{2} = 0^\circ C$ (no obtenible sino por extrapolación).

y k es una constante $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C^2}\right]$ pendiente de la citada recta.

3) Pérdidas de carga Δp según el caudal y la temperatura.

Se busca una relación $\Delta p = g\left(\dot{m}, \frac{t_e + t_s}{2}\right)$ fundamentalmente para los colectores destinados a circulación forzada.

En los colectores para termosifón este valor es muy bajo, su variación no introduce en esencia diferencias en su funcionamiento en general, para un amplio rango de temperaturas y caudales.

$$\frac{\Delta p}{\dot{m}} \approx 0,25 \text{ a } 0,3 \left[\frac{mm H_2O \text{ Seg}}{g}\right]$$

Quizás en los colectores para termosifón sea más interesante representar el empuje a la circulación o sea la "pérdida de carga negativa" que se produce ante diferentes saltos de temperatura.

Elaboración de Resultados

Los parámetros que se interrelacionan en los ensayos son todos obtenidos de las mediciones.

Así en el ensayo de la función del rendimiento, por ejemplo, tanto η como ψ contienen errores equivalentes. El error es equivalente al mayor de los medidos, la radiación solar, que es del orden del 6% (1) en todos los demás parámetros es mucho menor (Temperaturas 1%, masa 1‰, tiempos 1‰ area 1‰)

Esta equivalencia en los errores de medición hace que ninguno de los dos parámetros a correlacionar pueda ser tomado como base para la regresión, o lo que

es lo mismo, podría ser cualquiera de los dos.

De esta manera siempre aparecen dos curvas de regresión equivalentes según se toman los cuadrados mínimos por una u otra variable.

Ambas rectas estarían correlacionadas por el parámetro $r_1 = \frac{\mu_{\eta\psi}}{\sigma_{\eta}\sigma_{\psi}}$

donde μ es la covarianza y σ la dispersión de cada variable (3)

Las pendientes de estas rectas a_{η} y a_{ψ} cumplen la relación (si se toma a ψ por abscisa):

$$a_{\eta} \cdot a_{\psi} = \frac{\sigma_{\eta}}{\sigma_{\psi}}$$

y ambas pasan por el punto de coordenadas iguales al valor medio de dos variables.

$$P(\bar{\eta}; \bar{\psi})$$

Obviando esta indeterminación se realizó una curva de regresión que no dé preferencia a ninguna de las variables (la que se desarrolla en el apéndice).

El parámetro de correlación r definido por distancias en esta regresión, es menos "sensible" que r_1 para altas correlaciones, por lo que se puede también tener en cuenta este último para evaluar las experiencias.

Resultados Obtenidos

Mediante el banco de pruebas, se han ensayado una serie de colectores y sus variantes.

En los gráficos se han volcado los resultados de algunas de estas experiencias.

Los números de las curvas corresponden a las siguientes características de colectores de simple vidrio.

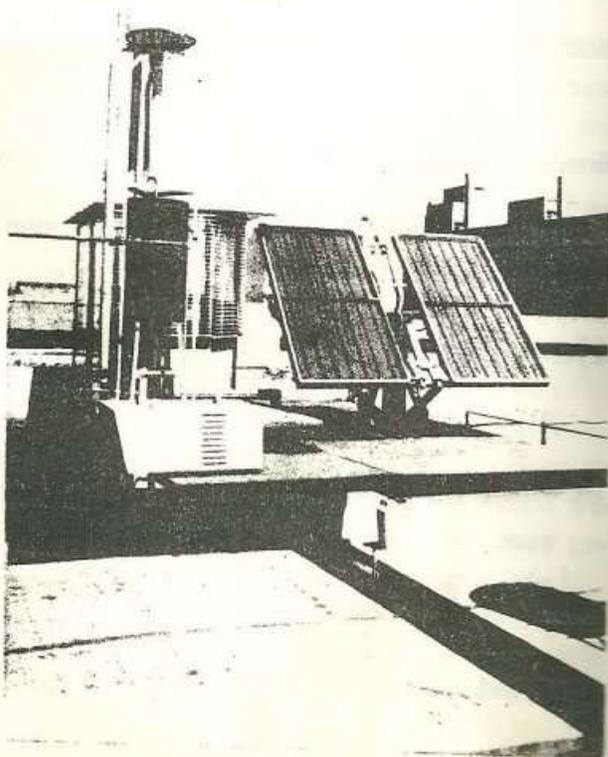
- 1) Tubos de cobre y receptor de aluminio, unido a los primeros con adhesivo epoxi de alta temperatura.
Aislación de Lana de Vidrio de 50mm y densidad 20 Kg./ m3
- 2) Tubos de cobre y receptor de aluminio, entrelazado este último en los primeros elásticamente. Aislación igual a la de 1).
- 3) Tubos de cobre soldados a receptor de cobre. Aislación igual a la de 1)
- 4) Igual al 3) con aislación de lana de Vidrio de 40 mm y densidad 50 Kg./m3.

5) Igual al 4) pero no conservado de ex profeso la total estanqueidad de la caja, luego de una lluvia. Ver Fig 4)



Vista interior de cabina de Mediciones

Vista panorámica del Banco de Ensayos



APENDICE

Recta de regresión por distancias cuadradas mínimas entre los puntos y la recta

Sea un conjunto de puntos $P_i(\eta_i; \psi_i)$, donde $i = 1; 2; \dots; N$, y la recta $\eta = \eta_0 + a\psi$

Se trata entonces, de encontrar los valores de η_0 y a para que la suma de los cuadrados de las distancias δ_i entre los puntos y la recta sea mínima.

La distancia entre el punto $P_i(\eta_i; \psi_i)$ y la recta es:

$$\delta_i = \frac{-\eta_i + \eta_0 + a\psi_i}{\sqrt{1+a^2}}$$

y el cuadrado de la misma:

$$\delta_i^2 = \frac{\eta_i^2 + a^2\psi_i^2 + \eta_0^2 - 2a\psi_i\eta_i - 2\eta_0\eta_i + 2\eta_0a\psi_i}{1+a^2}$$

La suma de todas las distancias cuadradas: (Se omiten los límites de las sumas por ser todas de 1 a N)

$$\sum \delta_i^2 = \frac{\sum \eta_i^2 + \sum \eta_0^2 + \sum a^2\psi_i^2 - \sum 2a\psi_i\eta_i - \sum 2\eta_0\eta_i + \sum 2\eta_0a\psi_i}{1+a^2}$$

La condición necesaria de que la suma anterior sea mínima según los valores de η_0 y a es que las derivadas parciales por estas variables sean cero, es decir

$$\frac{\partial \sum \delta_i^2}{\partial \eta_0} = 0 \quad \text{y} \quad \frac{\partial \sum \delta_i^2}{\partial a} = 0$$

Hallamos la primera:

$$\frac{\partial \sum \delta_i^2}{\partial \eta_0} = -\frac{2\sum \eta_i}{1+a^2} + \frac{2a\sum \psi_i}{1+a^2} + \frac{2\sum \eta_0}{1+a^2} = 0$$

Recordando que

$$\frac{2\sum \eta_0}{1+a^2} = \frac{2N\eta_0}{1+a^2} \quad \text{y}$$

despejando:

$$-\frac{\sum \eta_i}{N} + a \frac{\sum \psi_i}{N} + \eta_0 = 0$$

y como $\frac{\sum \eta_i}{N}$ y $\frac{\sum \psi_i}{N}$ son los valores promedios $\bar{\eta}$ y $\bar{\psi}$ respectivamente, resulta

$$\bar{\eta} = \eta_0 + a\bar{\psi}$$

En otras palabras las rectas que tendrán las distancias cuadradas mínimas o máximas con los puntos P_i pasarán por el punto P de coordenadas $\bar{\eta}$ y $\bar{\psi}$.

Para simplicidad del futuro desarrollo trasladaremos el origen de coordenadas precisamente a este punto $P(\bar{\eta}; \bar{\psi})$ por donde pasa la recta.

Nuestras coordenadas serán ahora:

$$y_i = \eta_i - \bar{\eta} ; y = \eta - \bar{\eta} ; x_i = \psi_i - \bar{\psi} ; x = \psi - \bar{\psi}$$

La distancia del punto P_i a la recta $y = ax$

$$\delta_i = \frac{-y_i + ax_i}{\sqrt{1+a^2}}$$

y la suma de los cuadrados de las mismas

$$\sum \delta_i^2 = \frac{a^2 \sum x_i^2 - 2a \sum x_i y_i + \sum y_i^2}{a^2 + 1}$$

Hallemos ahora

$$\frac{\partial \sum \delta_i^2}{\partial a} = \frac{(-2 \sum x_i y_i + 2a \sum x_i^2)(1+a^2)}{(1+a^2)^2} - \frac{2a(\sum y_i^2 - 2a \sum x_i y_i + a^2 \sum x_i^2)}{(1+a^2)^2} = 0$$

Despejando: $-2 \sum x_i y_i + 2a \sum x_i^2 - 2a^2 \sum x_i y_i + 2a^3 \sum x_i^2 - 2a \sum y_i^2 + 4a^2 \sum x_i y_i - 2a^3 \sum x_i^2 = 0 = 2a^2 \sum x_i y_i + 2a(\sum x_i^2 - \sum y_i^2) - 2 \sum x_i y_i$

$$a^2 + a \frac{\sum x_i^2 - \sum y_i^2}{\sum x_i y_i} - 1 = 0$$

Resolviendo

$$a_1, a_2 = \frac{-\frac{\sum x_i^2 - \sum y_i^2}{\sum x_i y_i} \pm \sqrt{\left(\frac{\sum x_i^2 - \sum y_i^2}{\sum x_i y_i}\right)^2 + 4}}{2}$$

• bién las pendientes de las rectas de máxima y mínima suma de cuadrados de distancias serían:

$$a_1, a_2 = \frac{\sum y_i^2 - \sum x_i^2}{2 \sum x_i y_i} \pm \sqrt{\left(\frac{\sum y_i^2 - \sum x_i^2}{2 \sum x_i y_i}\right)^2 + 1}$$

Volviendo a las coordenadas originales η y ψ tendremos que

$$\sum x_i^2 = \sum (\psi_i - \bar{\psi})^2 = \sum \psi_i^2 - 2\bar{\psi} \sum \psi_i + N\bar{\psi}^2 =$$

$$= \sum \psi_i^2 - 2N\bar{\psi} \frac{\sum \psi_i}{N} + N\bar{\psi}^2 =$$

$$= \sum \psi_i^2 - 2N\bar{\psi}^2 + N\bar{\psi}^2 = \sum \psi_i^2 - N\bar{\psi}^2 = N\sigma_{\psi}^2$$

Análogamente

$$\sum y_i^2 = \sum \eta_i^2 - N\bar{\eta}^2 = N\sigma_\eta^2$$

y finalmente

$$\sum x_i y_i = \sum \psi_i \eta_i - \bar{\psi} \sum \eta_i - \bar{\eta} \sum \psi_i + N\bar{\psi}\bar{\eta} = \sum \eta_i \psi_i - N\bar{\psi}\bar{\eta} = N\mu_{\psi\eta}$$

donde

$$\sigma_\psi^2 = \bar{\psi}^2 - \bar{\psi}^2 \quad \text{es la dispersión cuadrática de } \psi,$$

$$\sigma_\eta^2 = \bar{\eta}^2 - \bar{\eta}^2 \quad \text{es la dispersión cuadrática de } \eta, y$$

$$\mu_{\eta\psi} = \bar{\eta\psi} - \bar{\eta}\bar{\psi} \quad \text{es la covarianza entre } \eta \text{ y } \psi$$

Reemplazando en las expresiones para la pendiente a , resulte

$$a_1, a_2 = \frac{\sigma_\eta^2 - \sigma_\psi^2}{2\mu_{\eta\psi}} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_\eta^2 - \sigma_\psi^2}{2\mu_{\eta\psi}}\right)^2 + 1}$$

(Adviértase que $a_1 \cdot a_2 = -1$ o sea son rectas perpendiculares)
y para η_0 tenemos:

$$\eta_{01} = \bar{\eta} - a_1 \bar{\psi}$$

$$\eta_{02} = \bar{\eta} - a_2 \bar{\psi} = \bar{\eta} + \frac{1}{a_1} \bar{\psi}$$

La recta de regresión buscada sera aquella que tenga un $\sum \delta_i^2$ menor.

Si definimos un parámetro de correlación de la forma

$$r = \frac{\sum \delta_{i1}^2 - \sum \delta_{i2}^2}{\sum \delta_{i1}^2 + \sum \delta_{i2}^2} = \frac{\bar{\delta}_{i1}^2 - \bar{\delta}_{i2}^2}{\bar{\delta}_{i1}^2 + \bar{\delta}_{i2}^2}$$

donde para cada caso de recta:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}^2 &= \frac{\sum \delta_i^2}{N} = \frac{\frac{a^2 \sum x_i^2}{N} - 2a \frac{\sum x_i y_i}{N} + \frac{\sum y_i^2}{N}}{a^2 + 1} = \\ &= \frac{a^2 \sigma_\psi^2 - 2a \mu_{\eta\psi} + \sigma_\eta^2}{1 + a^2} \end{aligned}$$

Tenemos que si

$$r > 0 \quad \text{la recta es } \eta = \eta_{02} + a_2 \psi$$

$$r < 0 \quad \text{la recta es } \eta = \eta_{01} + a_1 \psi$$

Además si

$r=0$ No hay correlación lineal entre los puntos

$|r|=1$ Hay correlación funcional, los puntos están sobre la recta (algunos de los $\delta^2 = 0$)

cuando más se acerque $|r|$ a uno mayor será la correlación entre los puntos P .

esquema de instalación hidráulica

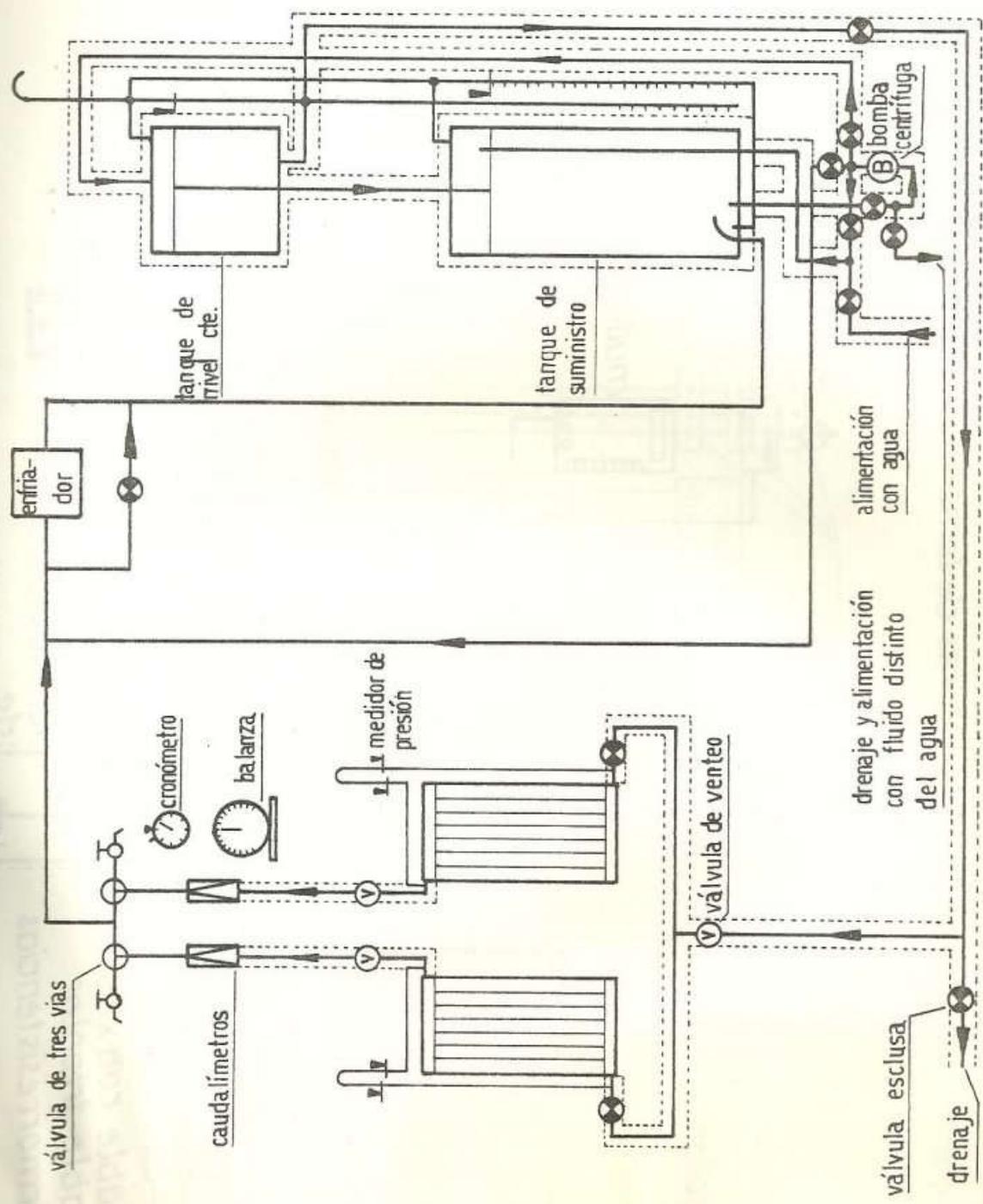


Fig.1

esquema de conexión de sensores de temperatura y radiación solar

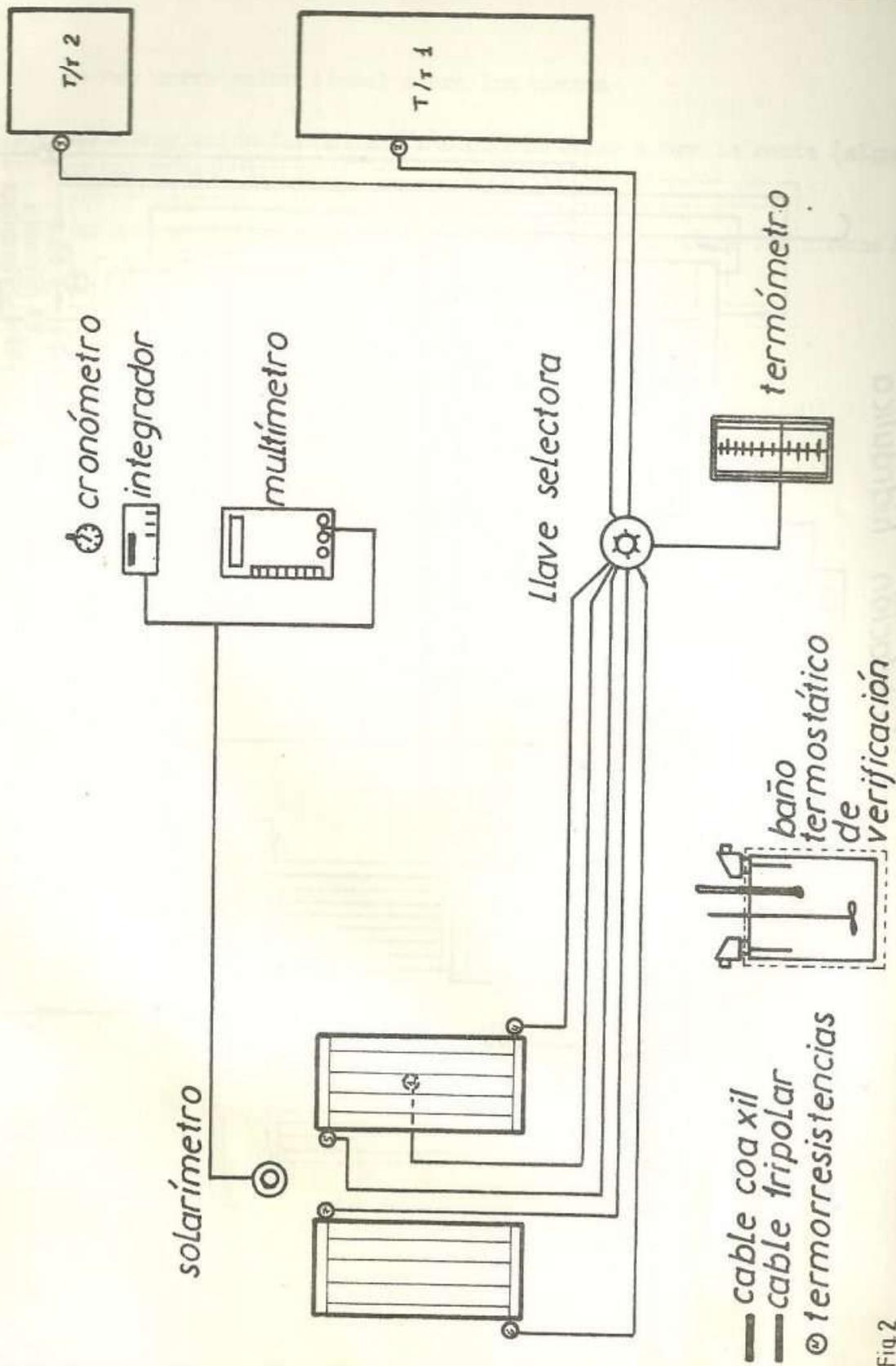


Fig.2

esquema de instalación eléctrica

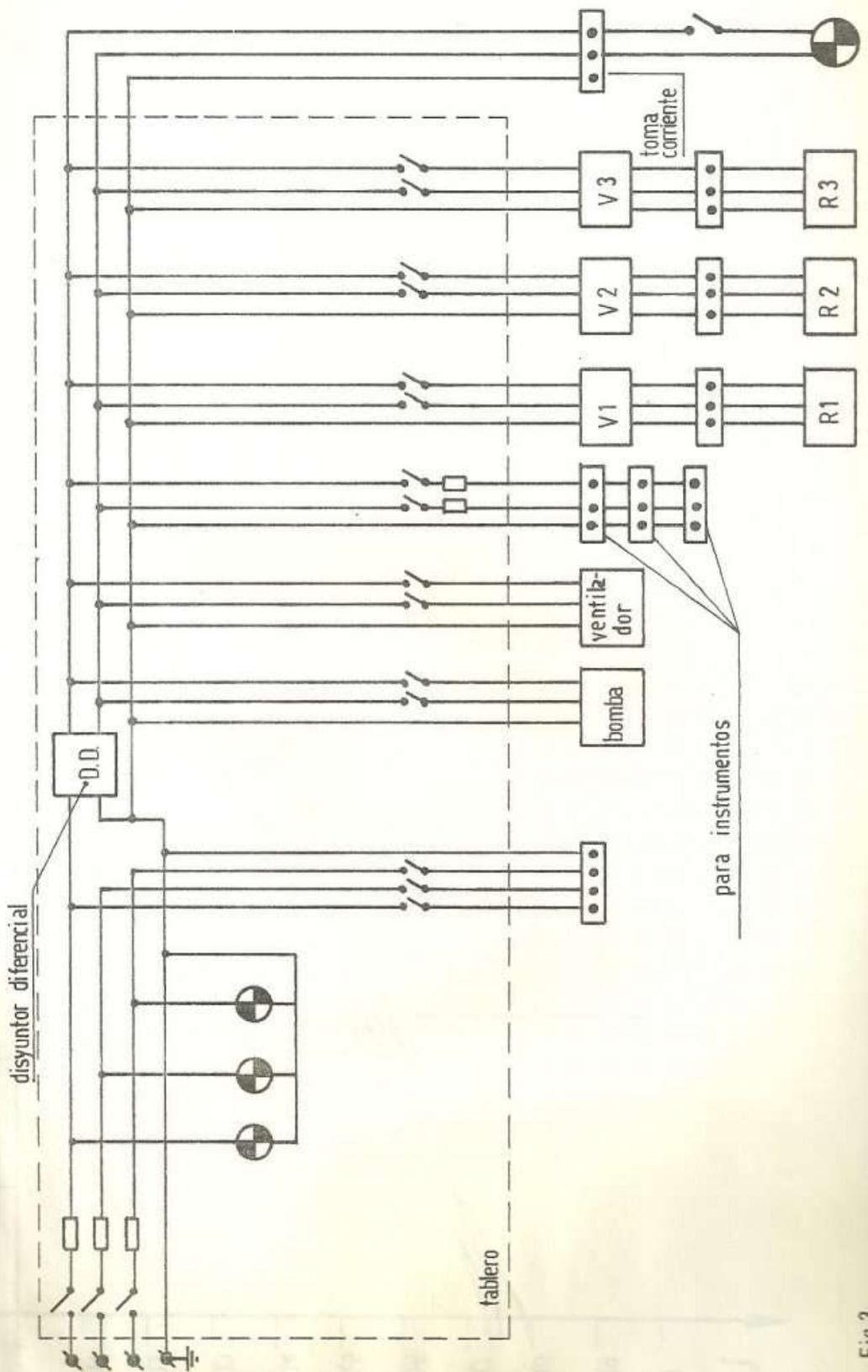


Fig. 3

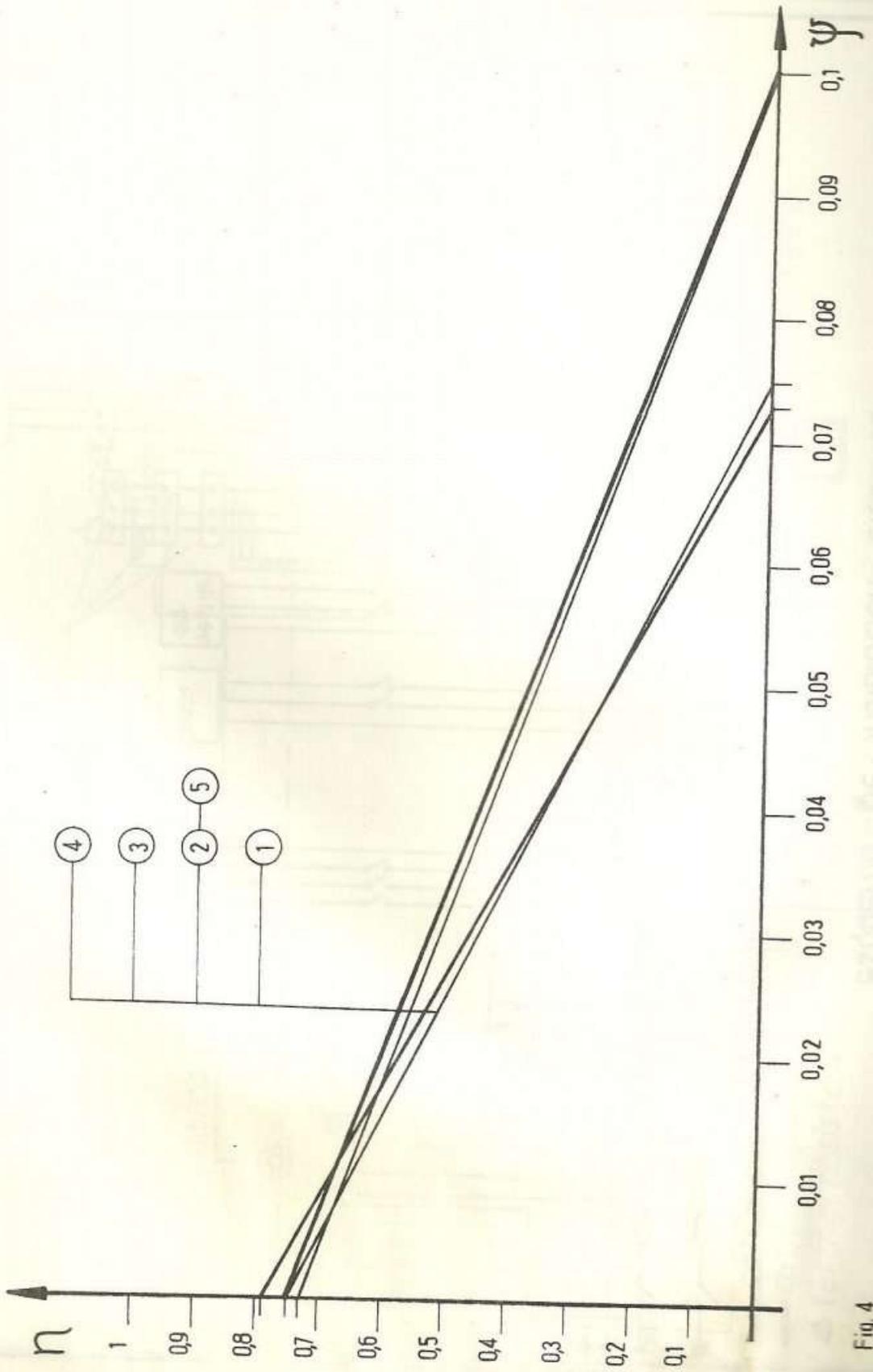


Fig. 4

Bibliografía

1. R. Lopardo, M. V. García, G. Atienza, Comportamiento de un detector fotovoltaico en distintas condiciones San Miguel 1979.
2. Rapellini A., Grossi Gallegos H., Proyecto Banco de Prueba de colectores solares GESM-CNIE San Miguel 1976.
3. F.I. Toranzos, Estadística Ed. Kapelusz Buenos Aires 1966.