

CALORIMETRO DE FLUJO APLICADO AL ENSAYO DE CONCENTRADORES SOLARES*

E. Mezzabotta**, F. Pensa, E. Vignolo,

División Energía Solar CNEA

Av. Libertador 8250 1429 Buenos Aires

1. RESUMEN

Se describen los diferentes aspectos de diseño, construcción y montaje de un calorímetro de flujo, cuya aplicación no está restringida exclusivamente al campo solar, si bien fue desarrollado específicamente para ser acopiado a la instalación (como refer. bibliogr. *) diseñada y construida para ensayar los concentradores solares de tipo cilíndrico-parabólico que la División Energía Solar de la C.N.E.A., tiene montados en el Centro Atómico Constituyentes (TANDAR).

Se trata de un instrumento que puede ser utilizado en cualquier instalación que emplee un fluido térmico, químicamente compatible con los materiales que componen el calorímetro. Además, el fluido de transferencia térmica deberá permanecer en fase líquida circulando en un régimen termodinámicamente estacionario. Los valores del caudal, la presión y la temperatura del fluido deberán estar comprendidos en los intervalos para los cuales el calorímetro fue diseñado.

Este instrumento está montado en la instalación antes mencionada, con el objeto de medir la capacidad calorífica de flujo ($\dot{m} c_p$) del fluido térmico (Turbina 32 YPF) que circula por los receptores de los concentradores solares a ensayar. El intervalo de temperaturas en las cuales opera está comprendido entre los 373 y 523° K, y los valores de los caudales volumétricos que circulan por él, están entre 0,166 y 0,866 dm³/s.

El equipo fue diseñado para soportar presiones inferiores a los 4 MPa, y todas las partes en contacto con el fluido térmico están construidas íntegramente en acero inoxidable AISI 304L.

2. INTRODUCCION

Para determinar el rendimiento energético de los concentradores solares de foco lineal, se los somete a una serie de ensayos normalizados, efectuados en condiciones de equilibrio cuasi estacionario. Este rendimiento puede ser expresado por el cociente entre la energía extraída por el fluido que circula por el receptor y la energía radiante incidente sobre el concentrador. En el caso de utilizar un fluido térmico que se mantenga en fase líquida, en las condiciones normales de operación, el rendimiento está dado por:

$$\eta_l = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A \cdot I} \quad (1)$$

* Este trabajo constituye el tema elegido por los alumnos F. Pensa y E. Vignolo para aprobar la materia Laboratorio II, en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UBA.

** División Energía Solar C.N.E.A.

donde: \dot{m} es el flujo de masa por unidad de tiempo, C_p es el calor específico a presión constante, ΔT es el salto térmico en el receptor, A es el área de apertura del concentrador e I_0 es la intensidad de radiación solar directa.

El fluido térmico que circula por la instalación, o banco para ensayos, de los concentradores solares de la C.N.E.A., es un aceite mineral de corte, de tipo parafínico, fabricado por YPF bajo el nombre comercial de TURGINA 32.

Cuando se utiliza un fluido de origen orgánico para extraer la energía térmica del receptor, sus propiedades físico-químicas se modifican con el transcurso del tiempo debido al intercambio de energía a que está sometido. Como consecuencia de ello, el valor original del calor específico irá cambiando con el uso, por lo que será necesario realizar ensayos específicos para su determinación cada vez que se lo quiera utilizar para calcular el rendimiento.

La determinación del flujo de masa por unidad de tiempo (\dot{m}) que circula por el receptor, normalmente se efectúa por medio de caudalímetros de tipo volumétrico, por lo cual será necesario, además, conocer el valor de la densidad del fluido en las condiciones de ensayo, para obtener así el caudal en unidades de masa. La imposibilidad de conocer en cada momento el valor correcto del calor específico del fluido y su densidad, a menos que se realicen ensayos específicos para su determinación, crea una incertidumbre con respecto al valor del rendimiento calculado sobre la base de datos tomados de tablas.

Una forma de eliminar esta incertidumbre es medir directamente el producto ($\dot{m} \cdot C_p$). Con esta idea se desarrolló un instrumento capaz de medir dicho producto para las condiciones reales de ensayo de los concentradores. Por sus características funcionales, este instrumento puede ser considerado como un calorímetro de flujo. (refer. 2 y 3).

3. PREMISAS DE DISEÑO

Al enfrentarse con el problema que representa proyectar, construir y operar un equipo que, conceptualmente, podemos definir como un calorímetro, se genera un proceso asociativo de ideas y preconceptos que llevan a imaginar, en primera instancia, un instrumento de laboratorio. Es decir, un aparato de tamaño reducido, de fácil instalación y transporte, que operará en un recinto cerrado, en condiciones ambientales más o menos controladas y con instrumental complementario de características clásicas y fácilmente obtenibles.

Para el caso del calorímetro aquí descrito, casi ninguna de esas características le son aplicables fácilmente.

En primer lugar, y por el solo hecho de tratarse de un instrumento que debe formar parte del circuito hidráulico de la línea de concentradores solares, además de estar incluido en el banco de ensayo de los mismos, surge la condición previa de su ubicación a la intemperie.

Para reducir al mínimo la propagación de errores, se pensó que era mejor efectuar la determinación del valor del producto ($\dot{m} \cdot C_p$), midiendo sobre todo el caudal, y no solamente sobre una fracción, pues de esa forma se elimina una fuente de error sistemático y se evita tener que medir también el caudal derivado. De aquí surge la segunda condición, referida a las dimensiones que debe tener el instrumento para recibir la totalidad de la capacidad calorífica de

flujo con que el aceite llega a los concentradores.

Por otro lado, el tamaño del equipo está limitado por el espacio disponible en la instalación térmica que lo contendrá, y deberá adaptarse a las características tecnológicas predominantes en la misma.

Las restantes premisas adoptadas en el diseño, resultan de aplicar las reglas más o menos clásicas a que debe ajustarse un equipo destinado a termotransferencia. Las más salientes son:

a) Los valores de las temperaturas y los caudales a los cuales operará el calorímetro, son los mismos que corresponden a los receptores de los concentradores solares a ensayar: 373 a 623° K, y 0,166 a 0,666 dm³/s, respectivamente.

b) La disipación de calor en la superficie de las resistencias calefactoras, no debe superar 1 W/cm² en ningún momento, a fin de evitar el 'quemado' del aceite.

c) Las secciones de pasaje del aceite por las resistencias calefactoras, deberán ser diseñadas para asegurar la existencia de un régimen turbulento de circulación. Es decir, el número de Reynolds no debe ser inferior a 2100 en ningún caso, y preferiblemente superior a 4000.

d) En ningún punto del calorímetro se debe alcanzar una temperatura de 623° K, ya que este es el punto de autoignición estimado para el aceite.

e) Evitar los puntos de estancamiento en la circulación del fluido, principalmente en las zonas en que toma contacto con las resistencias calefactoras, para evitar quillos ocasionados en el fluido.

f) Se debe esmerar el diseño del recorrido interno del aceite con el fin de obtener una buena homogeneización de su temperatura.

g) Reducir al mínimo posible las pérdidas térmicas al exterior.

Esta última premisa, sumada al espacio disponible en la instalación donde irá montado el instrumento, limita las dimensiones del mismo a una longitud no mayor de 2500 mm y a un diámetro menor que 500 mm.

4. PARAMETROS CARACTERISTICOS

Los condicionantes mencionados en el punto anterior deberán ser compensabilizados de modo que el instrumento diseñado también posea adecuados parámetros característicos, tales como su resistencia térmica (R_t), la capacidad calorífica volumétrica (C), la constante de tiempo de respuesta (RC), y el tiempo de permanencia del fluido en el calorímetro. Todo esto con el fin de reducir al mínimo posible los errores sistemáticos de medida, a la vez que contar con un instrumento de alta sensibilidad intrínseca de potencia ($\Delta T/\Delta P$).

5. DESCRIPCIÓN DEL APARATO

La configuración del calorímetro se puede apreciar en la Fig. 2. Básicamente el instrumento está constituido por un tubo vertical sin costura, de 1740 mm de largo, 188,3 mm de diámetro exterior y 7,11 mm de espesor, con un fondo semielíptico estampado en un extremo y una tapa plana en el otro. En su interior, el tubo contiene seis (6) resistencias eléctricas de tipo compacto, en forma de U, de 24Ω cada una, y de 11 mm de diámetro exterior. Estas resistencias tienen sus extremos fríos (es decir, no disipan calor) y están alojadas en el interior de tubos redondos, de 25,6 mm de diámetro exterior por 2,8 mm de espesor y centradas en el interior de los mismos por medio de un alambre de 4 mm de diámetro, bobinado en espiral en torno a cada rama de las resistencias.

Las resistencias están conectadas en paralelo, para ser alimentadas por una fuente de tensión monofásica, y pueden disipar hasta 12 kW, si se las conecta a una tensión de 220 V.

Los tubos de confinamiento de las resistencias están soldados por sus extremos a dos placas perforadas, y a su vez, una de ellas está soldada al tubo exterior.

La entrada y salida del fluido al tubo contenedor, se efectúa por medio de cañerías de 35 mm de diámetro exterior por 3,5 mm de espesor.

Para reducir a un mínimo las pérdidas térmicas, el tubo se halla rodeado exteriormente, y en toda su longitud, por una cámara de vacío de 25 mm de espesor, cuya pared exterior está constituida por una chapa de 1,2 mm de espesor, con ambas caras pulidas a espejo.

A su vez esta cámara está rodeada por una aislación térmica, constituida por medias cañas de lana mineral, con aglomerante ignífugo, de 60 mm de espesor. Esta aislación se halla protegida, exteriormente, por una envuelta hecha con chapa de aluminio pulido brillante, de 1 mm de espesor.

Tanto la cámara de vacío como la aislación de lana mineral tienen por objeto reducir al mínimo las pérdidas térmicas del aparato.

En las tuberías de entrada y salida se han instalado sendas termorresistencias de platino P, 100, calibradas a $0,1^\circ \text{C}$.

La cámara de vacío posee un tubo para su evacuación, con una válvula de fuelle y un detector de vacío montados en él.

El equipo cuenta con una tubería de purga, para eliminación de gases y vapores y otra para el drenaje y vaciado.

Las conexiones del calorímetro a la instalación se hacen por medio de bridas para soldar del tipo slip-on, construidas según la norma ASA 300.

El instrumento se halla suspendido verticalmente, para asegurar una distribución homogénea del fluido térmico en su interior, y para permitir una libre dilatación térmica en el sentido longitudinal.

Todas las partes del aparato en contacto con el fluido térmico, además de la pared

externa de la cámara de vacío, están construidas en acero inoxidable AISI 304L y AISI 304, respectivamente, y con uniones soldadas en su totalidad. Solamente las bridas de conexión a las tuberías de 35 mm de diámetro, son de acero al carbono (A 191), debido al elevado costo de las bridas de acero inoxidable.

El volumen de aceite contenido en el calorímetro, es de 30 dm³.

6. CIRCULACIÓN INTERNA DEL ACEITE

Como se indica en la Fig. 2, el fluido térmico entra al aparato por la tubería horizontal (E) de la parte superior, y sale por la rama vertical inferior (S) de la cañería en cruz ubicada cerca del fondo. La rama superior (P) de dicha cruz sirve para puentear al calorímetro cuando no se lo usa, sin interrumpir el pasaje del fluido por el resto del circuito.

Al ingresar el aceite al calorímetro, ocupa una pequeña cámara cilíndrica superior, que contiene la parte fría de las ramas interiores de las resistencias eléctricas. Allí se bifurca e ingresa a los seis tubos interiores que rodean a las resistencias y desciende hasta el fondo del aparato. Luego asciende por los seis tubos que contienen a las ramas externas de las resistencias, hasta alcanzar una cámara anular superior, que rodea a la primera cámara cilíndrica, y que contiene los otros extremos fríos de las resistencias. Desde allí desciende atravesando seis agujeros, existentes en la placa superior que vincula los extremos de todos los tubos, y ubicados en el espacio que queda entre ellos. El aceite ocupa entonces el espacio exterior a dichos tubos, por debajo de la placa y al llegar al fondo es obligado a dirigirse a la salida, ya que en la placa inferior que vincula el otro extremo de los tubos, no hay agujeros que le permitan atravesarla.

Este recorrido casi laberíntico del aceite, permite obtener una gran superficie de calefacción, junto con una longitud y un diámetro exterior reducidos, con lo que se disminuyen substancialmente las pérdidas térmicas. Además, el último tramo descendente del recorrido, permite homogeneizar la temperatura del seno del líquido y hacer más uniforme la temperatura de la cara externa del calorímetro.

7. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

Tal como ya se explicó, el instrumento está montado en forma permanente en el circuito hidráulico, e intercalado entre la salida de la instalación térmica y la entrada de los concentradores solares, en serie con los mismos (Fig. 1). Con esta disposición, la masa de fluido térmico por unidad de tiempo que circula por el calorímetro es la misma que pasa por el receptor del concentrador a ensayar.

Esto permite mantener constante la temperatura de entrada al calorímetro, al igual que el caudal, ya que estas son dos de las condiciones que se deben cumplir durante el ensayo de los concentradores.

Por medio de un sistema de regulación y control se aplica una tensión constante a las resistencias eléctricas del calorímetro, con lo cual se produce un incremento de temperatura (ΔT) del fluido térmico entre la entrada y la salida al mismo.

El análisis teórico del calorímetro se hizo en base al modelo esquematizado en la Fig. 2, bajo la hipótesis de que el fluido que circula por él es un líquido incompresible. Se supone, además, que el instrumento se encuentra en régimen estacionario de equilibrio termodinámico y que no se producen transformaciones físicas ni químicas que puedan alterar las propiedades del fluido, ni de los materiales constitutivos del calorímetro.

Los únicos intercambios de energía que se producen en el sistema, son de naturaleza térmica, eléctrica e hidrodinámica.

Se asume que no existe intercambio de energía mecánica o de deformación, por encontrarse el sistema rígido en estado de reposo y en equilibrio estático.

Se admite que las resistencias eléctricas sólo exhiben un comportamiento resistivo puro.

El salto térmico del fluido dentro del calorímetro (ΔT_c), es lo suficientemente pequeño (no mayor que 5° K) como para admitir que el valor del calor específico a presión constante (c_p) y la densidad del mismo (ρ) permanecen invariables en ese intervalo de temperaturas. El valor de ΔT_c debería ser lo más pequeño posible ($\sim 1^\circ K$), para cumplir con esta hipótesis, pero no tanto como para que el error de lectura (0,1° K) de las temperaturas medidas con las termorresistencias, no introduzca un error muy grande en la determinación del producto ($\dot{m} \cdot c_p$).

También admitimos que el valor de la resistencia térmica R, no varía en ese pequeño intervalo de temperatura.

Manteniendo constantes todas las variables que pueden ser controladas, se alcanzará el estado de régimen estacionario cuando se alcance la constancia de la temperatura en la salida del instrumento. En estas condiciones el balance energético en la unidad de tiempo establece que la suma de la energía eléctrica suministrada al calorímetro (P_e), y la energía necesaria para bombear el fluido a través del mismo (P_b , que depende de la caída de presión ΔH , y de \dot{m}), será igual al incremento de la energía térmica del fluido ($\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_c$), más las pérdidas térmicas del equipo (P_p).

$$P_e + P_b = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_c + P_p \quad (2)$$

Determinando el valor de la energía necesaria para el bombeo, además de las pérdidas térmicas del equipo (que son una función de la temperatura media del calorímetro, del vacío existente en la cámara anular, de la temperatura ambiente y de la velocidad del viento), se puede determinar el valor del producto ($\dot{m} \cdot c_p$) con sólo medir el salto térmico del fluido (ΔT_c) y la potencia eléctrica disipada por las resistencias calefactoras.

$$\text{De (2): } \dot{m} \cdot c_p = \frac{P_e + (P_b - P_p)}{\Delta T_c} \quad (3)$$

8. CALIBRACION

Para poder aplicar la expresión (3) deducida en el punto anterior, es necesario conocer el valor de la diferencia entre paréntesis ($P_b - P_p$). Para evitar la determinación de este valor, se

puede modificar la expresión aplicando un factor de corrección F, que tenga en cuenta las pérdidas, con lo cual la (3) pasaría a ser:

$$\dot{m} \cdot c_p = F \frac{P_e}{\Delta T_c} \quad (4)$$

Si por el calorímetro se hace circular un líquido, cuyo C_p esté perfectamente determinado, de modo que pueda ser utilizado como patrón de referencia, entonces se podrá calcular el valor de F para cada condición de ensayo.

Tomando esta idea como base, se obtuvo la autorización necesaria para poder efectuar la calibración en el Circuito Experimental de Alta Presión (proyecto CEAP), que la C.N.E.A. posee en su Centro Atómico Ezeiza. Este circuito, que fue construido para probar los elementos combustibles de la Central Nuclear de Atucha, opera con agua desmineralizada y posee una zona de baja presión en la cual se pensó en instalar el calorímetro.

En la ubicación prevista, la presión del circuito es de aproximadamente 4 MPa.

Estas fueron las razones por las que se eligió el acero inoxidable como material constitutivo (para evitar problemas de corrosión), y se hizo una prueba hidráulica durante más de 24 horas a 8 MPa. de presión. Posteriormente, cuando el calorímetro estuvo terminado, el ensayo no pudo realizarse, por haber aparecido una obstrucción en el circuito experimental, lo que obligó a su desarme para inspección y reparación.

Ante esa situación, se decidió cambiar de método, tratando de efectuar la determinación directamente en el lugar de operación, razón por la cual se lo instaló en el lugar reservado para su montaje. El nuevo método de calibración previsto, consiste en hacer circular por el calorímetro el aceite con que va a operar, y suministrarle la energía eléctrica necesaria para que se anule el salto de temperatura (ΔT_c).

En estas condiciones, de la expresión (2) se puede deducir que la energía eléctrica suministrada al calorímetro iguala a las pérdidas totales; es decir, las pérdidas térmicas menos la energía necesaria para la circulación.

$$P_T = P_e = P_b - P_p \quad (5)$$

$$(\Delta T_c = 0)_T, (\Delta T_c = 0)_T, (\Delta T_c = 0)_T, (\Delta T_c = 0)_T$$

Un método aproximado, que permitiría obviar la determinación de las pérdidas, consistiría en realizar dos determinaciones consecutivas, en las mismas condiciones de caudal inicial y temperatura de entrada al calorímetro, pero generando saltos térmicos diferentes. Suponiendo que el valor de C_p no se modifica en los intervalos de temperatura considerados, se tendría:

$$\dot{m} \cdot c_p = \frac{P_{e1} - P_{T1}}{\Delta T_{c1}} \quad (6)$$

$$\dot{m} \cdot C_p = \frac{P_{s1} - P_{T2}}{\Delta T_{c2}} \quad (7)$$

Pasando ΔT_{c2} al otro miembro y restando (7) de (8), resulta:

$$(\dot{m} \cdot C_p) \cdot (\Delta T_{c2} - \Delta T_{c1}) = (P_{s2} - P_{s1}) + (P_{T1} - P_{T2}) \quad (8)$$

Si se sigue $\Delta T_{c2} = 2\Delta T_{c1}$, resulta:

$$\dot{m} \cdot C_p = \frac{(P_{s2} - P_{s1}) + (P_{T1} - P_{T2})}{\Delta T_{c1}} \quad (9)$$

En la hipótesis de que los saltos térmicos sufridos por el aceite en el calorímetro, son suficientemente pequeños como para aceptar que C_p no varía en esos intervalos, y considerando que las pérdidas P_T se las puede considerar insensibles a un cambio tan pequeño de la temperatura (no mayor de 5° K), se puede aceptar que:

$$\dot{m} \cdot C_p = \frac{\Delta P_s}{\Delta T_{c1}} \quad (10)$$

Este método tiene las desventajas de requerir una doble medición de P_s y ΔT_c para cada determinación de $(\dot{m} \cdot C_p)$ y de que además se incrementa el error de la medición. Pero por otro lado permite independizarse de las pérdidas, constituyéndose en una especie de medición "autocalibrada". Se lo puede utilizar con fines comparativos con el método anterior.

9. METODO DE MEDIDA

La disposición del instrumental previsto para efectuar las mediciones es la que se indica en la Fig. 4.

El sistema de adquisición de datos (S.A.D.) que está montado en el banco de ensayos, permite obtener los valores del caudal (Q) que circulará por el calorímetro, además de la temperatura ambiente (T_a) y la velocidad del viento (v).

Las temperaturas de entrada y salida al calorímetro se miden con las termorresistencias de platino instaladas al efecto.

Para la determinación de las pérdidas, se alimentarán las resistencias calefactoras con corriente continua, por medio de una fuente estabilizada en tensión de 50 V y 10 A, máximos. La corriente se medirá indirectamente a través de la caída de tensión en una resistencia.

El vacío en la cámara que rodea al equipo, se logra por medio de un equipo compacto móvil, compuesto por una bomba mecánica y una difusora.

La medición de vacío se hará a través de un detector tipo Pirani. Cuando el "vacío dinámico", medido en el equipo de vacío, alcanza el valor de $1,3 \times 10^{-3}$ Pa, y luego de un largo período de desgasado de la cámara hecho a la máxima temperatura de operación del calorímetro, se cierra la válvula de fusile y se retra el equipo de vacío de la línea.

El medidor Pirani tiene por objeto determinar como "decae al vacío", para restituirlo cuando esté por debajo de 1,3 Pa.

La caída de presión en el calorímetro sufrida por el aceite entre la entrada y la salida, se mide por medio de un transductor de presión diferencial, con salida eléctrica analógica.

A excepción del sistema de vacío, todas las señales eléctricas son recibidas por el sistema de adquisición de datos.

Cuando se trate de hacer la medición del producto $(\dot{m} \cdot C_p)$, la alimentación de las resistencias eléctricas se hará por medio de corriente alterna, ya que las potencias en juego son demasiado elevadas, para una fuente de tensión o de corriente fácilmente obtenible.

En ese caso, la medición de la potencia suministrada se realizará por medio de un voltímetro de clase 0,1, o con voltímetro y amperímetro de errores equivalentes.

Los inconvenientes sufridos como consecuencia de la imposibilidad de efectuar la calibración por el método previsto originalmente, produjeron retrasos en la instalación del calorímetro en el banco de ensayos, e impidieron realizar mediciones que pudieran ser incluidas en este trabajo.

10. CONCLUSIONES

El equipo fue construido cumpliendo con las premisas impuestas, hallándose ya instalado y listo para su calibración y utilización.

Se espera un comportamiento acorde con los fines previstos. Es decir, que la suma de los errores sistemáticos y accidentales de la medición estén dentro de los valores admitidos para el producto $(\dot{m} \cdot C_p)$, estimándose que los mismos no deben superar el 2%.

La demora sufrida en el proceso de construcción, se debió a razones de fuerza mayor que obligaron a trasladar el equipo a través de tres centros atómicos, desde que se inició la fabricación hasta que se lo instaló.

11. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Lic. R. Nicolás por sus valiosos aportes para la concreción del proyecto, ya sea a través de las discusiones preliminares a la adopción de los criterios de diseño, como por el apoyo administrativo y económico brindado.

No menos destacable es la colaboración brindada por el personal de los Talleres Especializados de Sede Central, el Jefe del Departamento Reactores Experimentales, el personal del Taller de dicho Departamento y el personal de la División Detectores, del Departamento Instrumentación y Control; todos ellos del Centro Atómico Ezeiza.

12. REFERENCIAS

1. C.D.Franculli, J.M.Kesque, R.Nicolás, J.A.Moragues, H.Bajano, E.Mezzabolta, J.Farías, C.Tesone, L.Merino, A.Vicente, R.Weht.
2. K.A.Reed, J.W.Allen. Solar thermal collector testing calorimetric ratio technique. Proc.1978 Ann. Meeting of AS-ISES. Denver COLORADO (1978).
3. M.Collares - Pereira, J. Duque, C. Saralva, A. Rego Teixeira.
A calorimeter for solar thermal collector testing. Solar Energy 27 (6), 581 (1981).

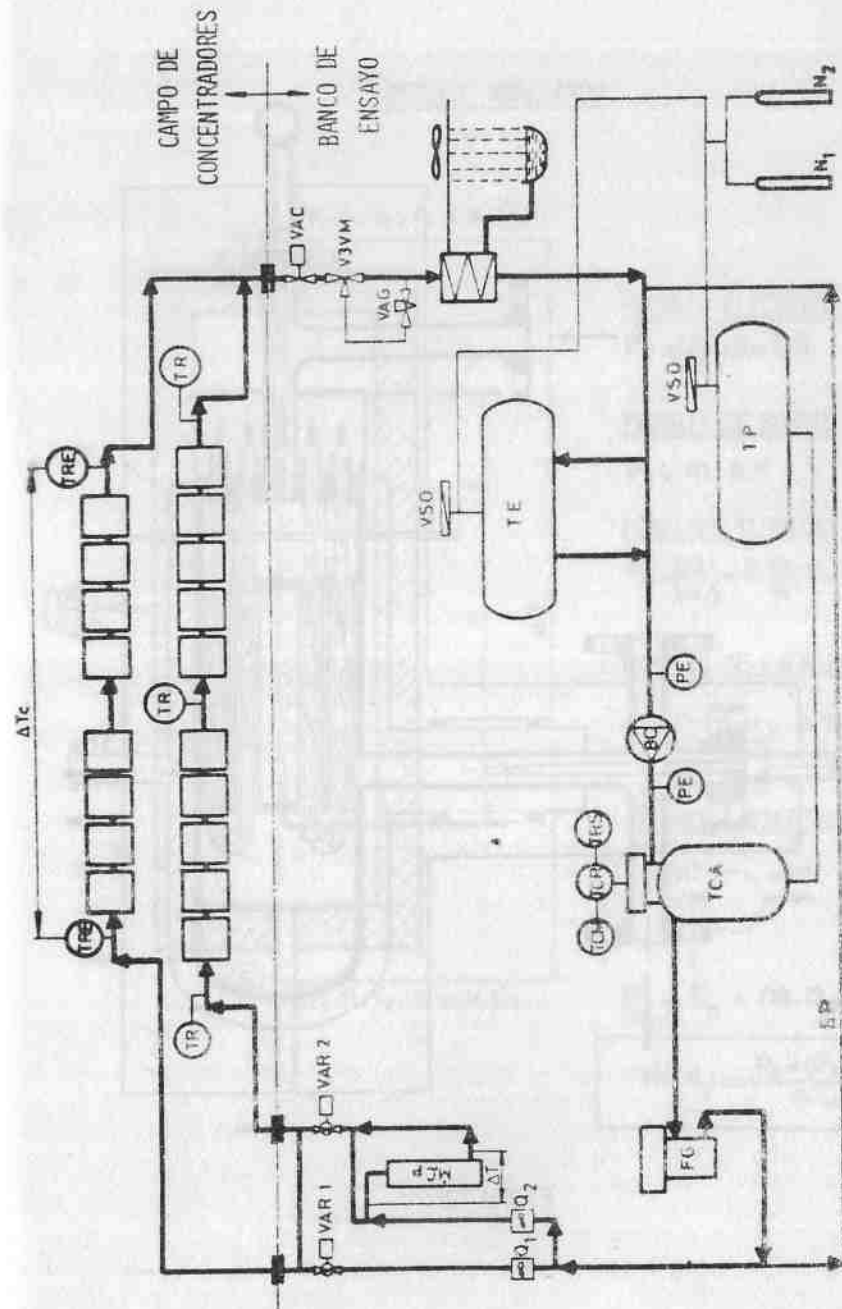


FIGURA 1 - UBICACION DEL CALORIMETRO (M.C.P.) EN EL BANCO PARA ENSAYO DE CONCENTRADORES SOLARES.

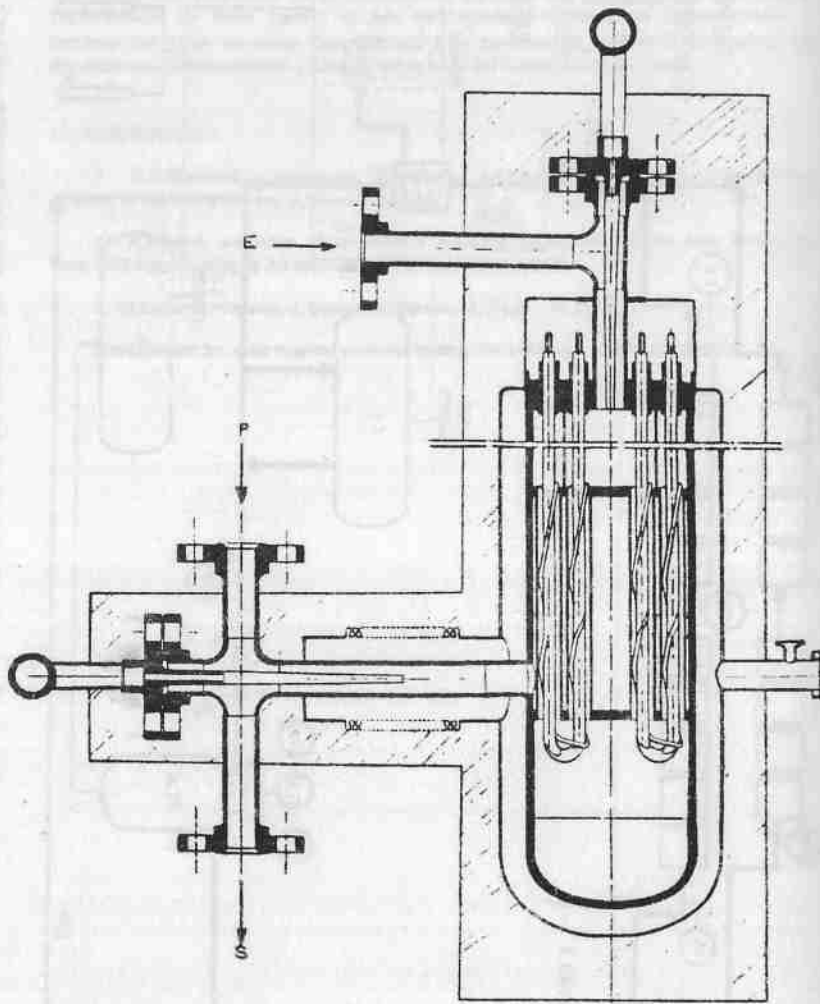
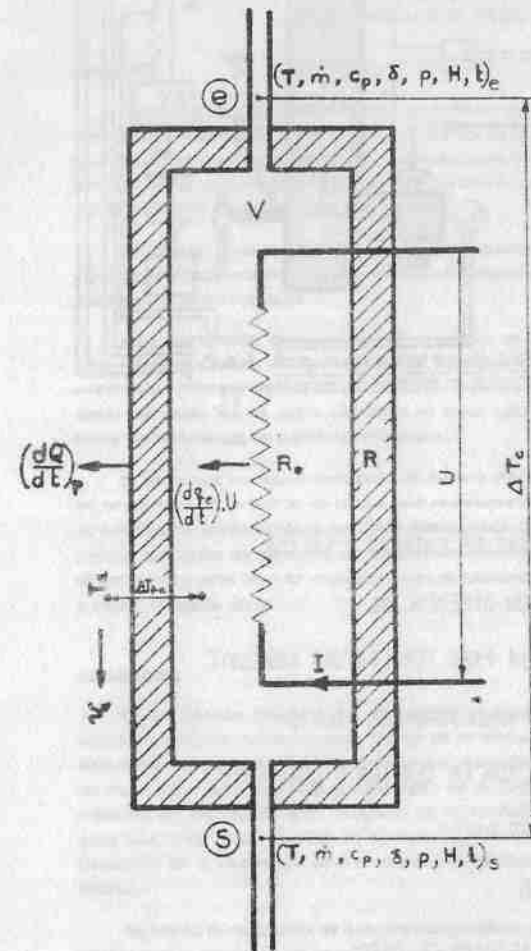


FIGURA 2

MODELO ANALIZADO



ENERGIA ELECTRICA

$$P_e = \left(\frac{dq_e}{dt}\right) \cdot U = I \cdot U$$

ENERGIA DE BOMBEO

$$P_b = \dot{m} \cdot \Delta H$$

PERDIDAS TERMICAS

$$P_p = \frac{(dQ/dt)_p}{U} = \frac{\Delta T_c \cdot u}{R}$$

AUMENTO DE ENERGIA

$$\int_{T_e}^{T_s} \dot{C} \cdot dT = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_c$$

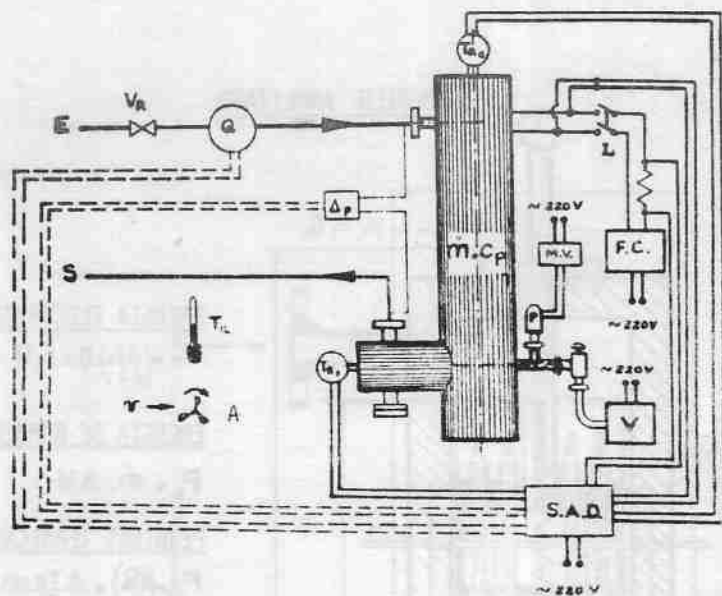
BALANCE ENERGETICO



$$P_e + P_b = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_c + P_p$$

$$\dot{m} \cdot c_p = \frac{P_e + (P_b - P_p)}{\Delta T_c}$$

FIGURA 3



Q -CAUDALIMETRO

T_R -TERMORRESISTENCIAS DE ENTRADA Y SALIDA

Δ_p -SENSOR DE PRESION DIFERENCIAL

T_A -TERMORRESISTENCIA PARA TEMPERATURA AMBIENTE

A -ANEMOMETRO PARA VELOCIDAD DEL VIENTO

FC -FUENTE ESTABILIZADA EN TENSION O CORRIENTE

V -EQUIPO PARA HACER VACIO

MV -MEDIDOR DE VACIO

SAD-SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS

V_R -VALVULA PARA REGULACION DE CAUDAL

FIGURA 4 - METODO DE MEDIDA