

SISTEMA DE LOCALIZACION Y SEGUIMIENTO  
DEL FOCO DE UN CONCENTRADOR SOLAR<sup>†</sup>

J.J.Nicolás

Comisión Nacional de Energía Atómica  
Avda. del Libertador 8250 - (1429) Buenos Aires

Resumen

Se analizan las funciones que debe realizar un sistema de seguimiento del foco de un concentrador solar y sus posibles alternativas de operación: programado, de localización por búsqueda y combinado, explicándose las razones por las cuales se adoptó la segunda alternativa para el Concentrador Fijo a Espejo Facetado construido en la CNEA. Se determina la lógica de operación del sistema elegido y se muestra el diagrama funcional del sistema completo, describiéndose detalladamente el funcionamiento de sus distintas partes: las unidades sensoras, la unidad de control, la unidad motriz y los dispositivos auxiliares que vinculan a las anteriores entre sí.

Se describe el modelo de laboratorio ya construido, así como también la experiencia de simulación de operación del sistema. Se analizan las principales dificultades que surgen en un sistema real, las que hacen necesario introducir una zona de indeterminación en el centrado del receptor.

LOCALIZATION AND TRACKING SYSTEM OF  
THE FOCUS OF A SOLAR CONCENTRATOR

Abstract

Operations to be accomplished by a tracking system for a solar concentrator are analysed. Three alternatives are considered: a programmed operation, a localization by search operation, and a combination of both. Factors leading to use the second alternative in the Faceted Fixed Mirror Solar Concentrator built at the Argentine Atomic Energy Commission are discussed. The logic for the operation of the selected system is determined, the block diagram of the whole system is shown and a detailed description of its different components is given. These are: the sensor unit, the control unit and the motor, interconnected through auxiliary devices.

The laboratory prototype already built is described. The operation of the system has been simulated in the laboratory. An indetermined zone in the centering of the receiver is introduced on account of the difficulties foreseen in the actual operation of the system.

-----  
†) Trabajo parcialmente financiado con un subsidio del Programa Nacional de Energía no Convencional de la Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología.



## 1. Introducción

Dado que los concentradores de radiación solar con factor de concentración mayor que 10, a los fines prácticos, hacen uso exclusivamente de la radiación solar directa, la posición y el ancho de su foco se modifican con el movimiento aparente del Sol. Para que la posición del receptor de la radiación concentrada coincida a lo largo del día con la del foco es necesario mover algunas de las partes componentes del conjunto concentrador-receptor.

La implementación del sistema que permita cumplir la condición antes mencionada tendrá diferentes grados de complejidad según: a) los grados de libertad del conjunto concentrador-receptor, b) los elementos del mismo a los cuales se les impone movimiento, c) la ley de variación de la posición del foco debida al movimiento aparente del Sol y d) la precisión con que se desee hacer coincidir las posiciones del foco y del receptor (precisión en la condición de enfoque). Todos estos factores intervienen directamente en el diseño del sistema de movimiento y a continuación los analizaremos en forma general para cualquier tipo de concentrador, para luego discutir en particular el caso del concentrador fijo a espejo facetado (CFEF).

a) *Grados de libertad del conjunto concentrador-receptor*: tienen, en general, estrecha relación con el tipo de simetría del concentrador y se pueden distinguir básicamente dos casos:

- 1) simetría cilíndrica, un grado de libertad (foco lineal);
- 2) simetría de revolución, dos grados de libertad (foco puntual).

Este factor determina el número de unidades motrices necesarias para producir el movimiento.

b) *Elementos del conjunto concentrador-receptor a los cuales se les impone movimiento*: según el tipo de concentrador es necesario mover éste, el receptor o ambos a la vez, lo cual determina la mayoría de los parámetros de las unidades motrices, siendo los principales la potencia y el par motor.

c) *Ley de variación de la posición del foco*: para la determinación de esta ley es necesario conocer:

- 1) el movimiento aparente del Sol de acuerdo con la posición geográfica del concentrador;
- 2) la posición del foco del concentrador en función de la dirección de la radiación solar incidente.

Hay tres posibles sistemas para mantener la coincidencia de las posiciones del foco y del receptor: I) programable (circuito abierto) que reproduce la ley de movimiento ya sea por un dispositivo mecánico (p.ej. de relojería) o por computadora; II) de seguimiento del foco (circuito cerrado) que, previa localización del mismo, mantiene mediante sensores la coincidencia independientemente de la ley de variación de su posición y III) combinado de los anteriores.

Según cuales sean la ley de variación de la posición del foco y la precisión de seguimiento requerida, se elegirá el sistema apropiado tratando de lograr la mayor simplicidad.

d) *Precisión en la condición de enfoque*: la precisión que se exija en la coincidencia de las posiciones del foco y del receptor determina la complejidad del sistema motriz (incluyendo los mecanismos de transmisión), a-



sí como la del programa de comando en sistemas programados, la estabilidad de la velocidad angular en sistemas de relojería y la elección del tipo y de la cantidad de sensores en sistemas de localización por búsqueda y combinados.

## 2. Análisis del sistema de movimiento del CFEF

Como mencionamos en la Introducción, a continuación se discutirán en particular para el CFEF los factores que intervienen en el diseño del sistema de movimiento. La descripción detallada del CFEF y de sus parámetros se encuentra en las Refs. [1] y [2]. En la Fig. 1 se muestra una sección del mismo con los parámetros necesarios para la discusión de los factores mencionados.

a) *Grados de libertad del conjunto concentrador-receptor*: debido a su simetría cilíndrica, este conjunto sólo requiere un grado de libertad necesitándose, por lo tanto, una única unidad motriz.

b) *Elementos a los cuales se les impone movimiento*: el grado de libertad antes mencionado está dado por el giro del receptor alrededor del eje de simetría  $O_c$  del cilindro directriz. Debido a que el sistema estará balanceado de forma tal que sólo se deban vencer las fuerzas de rozamiento en los rodamientos y la transmisión, la potencia requerida para moverlo es pequeña.

c) *Ley de variación de la posición del foco*: en la Fig. 2.5 de la Ref. [2] se da la variación horaria del ángulo  $\phi$  para distintas épocas del año y dos orientaciones extremas del concentrador (N-S y E-O), para una inclinación del plano de abertura igual a la latitud de Buenos Aires ( $34^{\circ}30' S$ ). Dado que la posición angular  $\theta_f$  del foco es igual a dos veces el ángulo  $\phi$  [1], la obtención de su variación horaria es inmediata. En la Fig. 2 se grafica la misma habiéndose tomado, a los fines prácticos, únicamente los valores de  $\phi$  entre  $45^{\circ}$  y  $135^{\circ}$  lo cual significa seis horas de aprovechamiento diario del sistema. En la figura se ve claramente que sólo para la orientación N-S con inclinación igual a la latitud (polar) la velocidad angular es constante. Por lo tanto, sólo para este caso se podría utilizar un sistema programable del tipo relojería. Siendo todos los demás sistemas programables más complicados y costosos que uno de seguimiento del foco, se optó por este último a fin de utilizar el mismo sistema para ambas orientaciones.

En la Fig. 3 se muestra el diagrama de flujo de la lógica de operación del sistema seleccionado, en el que se observa que la localización del foco se realiza mediante la búsqueda del mismo por parte del receptor (localización por búsqueda).

Dado que para orientación N-S el foco no invierte su sentido de movimiento en momento alguno y que para orientación E-O sólo lo hace en el mediodía solar, a fin de evitar pérdidas de tiempo en la localización del foco en caso de interrupciones por nubosidad, se introdujo una memoria de sentido de movimiento que lleva al receptor a reiniciar la búsqueda en el mismo sentido en que se desplazaba antes de la interrupción.

d) *Precisión en la condición de enfoque*: para determinar la coincidencia de las posiciones del foco y del receptor de un CFEF con el sistema de localización por búsqueda, como mínimo son necesarios dos sensores ubicados simétricamente respecto del eje longitudinal del receptor. En la Fig. 4.a. se muestra un esquema de este último y la ubicación relativa de los sensores, así como una distribución arbitraria de intensidad de la radiación que llega a la zona focal. La posición relativa receptor-foco que maximiza la energía incidente



en el receptor se logra cuando las intensidades registradas por ambos sensores son iguales ( $I_A = I_B$ ); esto vale siempre que la distribución (simétrica o no) tenga un único máximo y sea monótonamente decreciente a ambos lados.

El sentido de movimiento del receptor al modificarse la posición del foco es determinado por el signo de la diferencia de intensidad ( $I_A - I_B$ ) en ambos sensores (Fig. 4.b.): si  $I_A - I_B > 0$  ( $I_A - I_B < 0$ ) el receptor debe moverse en el sentido que va el sensor B(A) al A(B). Este análisis sólo es correcto si los ejes longitudinales del receptor y de la zona focal son perfectamente paralelos. Para tener en cuenta la falta de paralelismo que cabe esperar por problemas constructivos, es conveniente colocar pares adicionales de sensores a lo largo del receptor a fin de efectuar un promedio y determinar así la posición más favorable.

Por otra parte, dado que el conjunto concentrador-receptor tendrá continuamente vibraciones propias así como las originadas por el viento, es necesario permitir un cierto apartamiento sin que el sistema de seguimiento corrija la posición del receptor. Esto se logra imponiendo que para accionar el dispositivo de movimiento del receptor  $I_A - I_B$  deba superar en valor absoluto un umbral prefijado. Cuando la distancia foco-receptor supera el correspondiente intervalo de indeterminación, el sistema corrige la posición del receptor llevándolo a la de centrado con un error significativamente menor que dicho intervalo.

### 3. Diagrama funcional del sistema de movimiento

En la Fig. 5 se da el diagrama en bloque del sistema completo diseñado para comandar el movimiento del receptor del CFEF de acuerdo con los factores discutidos en la sección anterior. Se especifican a continuación las funciones de cada uno de los componentes.

a) *Unidades sensoras*: Estas unidades son las encargadas de medir y comparar con valores prefijados los diferentes parámetros que determinan la necesidad de movimiento del receptor como también de enviar la información a la unidad de control a fin de que ésta pueda tomar las decisiones lógicas apropiadas. Al presente se han implementado las unidades sensoras de:

- 1) Intensidad solar: miden en forma continua la intensidad de la radiación solar determinando si aquella supera o no el nivel mínimo fijado para que opere el concentrador (la señal correspondiente se identifica con  $I_s$ ).
- 2) Posiciones extremas (topes): limitan el movimiento del receptor indicando cuando éste llega a alguna de sus posiciones extremas (las señales correspondientes se identifican con  $T_+$  y  $T_-$ ).
- 3) Localización del foco y centrado del receptor: como se discutió en la sección precedente, son los responsables de la localización del foco y del centrado del receptor respecto de aquél, indicando si el foco está localizado (señal L) o si el receptor debe moverse en el sentido horario (señal  $M_+$ ) o en el antihorario (señal  $M_-$ ).
- 4) Temperatura: verifica la temperatura del fluido a la salida del receptor y la compara con las temperaturas críticas. Si la temperatura supera un primer nivel  $T_1$ , la señal es enviada directamente a la unidad sensora de centrado a fin de realizar un desenfo-



que parcial; si supera el máximo nivel admisible  $T_2$  se informa a la unidad de control para que produzca un desenfoque total (ver Fig. 3).

b) *Unidad de control*: Procesa toda la información que le llega de las unidades sensoras y, de acuerdo con la lógica de operación determinada, proporciona la señal de comando al circuito de excitación de la unidad motriz del receptor y a los sistemas de seguridad.

c) *Circuito de excitación*: Es el encargado de suministrar a la unidad motriz la potencia eléctrica requerida para su funcionamiento. La señal para accionar el circuito de excitación puede provenir de la unidad de control o de un comando manual.

d) *Sistema de seguridad*: Involucra el comando de todos los subsistemas implementados para la seguridad del funcionamiento del concentrador, como ser alarmas acústicas frente a anomalías de varios tipos (p.ej. sobrecalentamiento).

#### 4. Modelo de laboratorio

A fin de ensayar tanto la unidad motriz seleccionada cuanto la unidad de control del sistema, se diseñó y construyó un modelo de laboratorio que permite simular las condiciones de operación del receptor (Fig. 6).

El motor utilizado es del tipo sincrónico de baja velocidad (60 rpm) y baja potencia ( $\sim 300$  W). Como unidad de excitación se utilizaron semiconductores controlados (Triac) evitándose así los inconvenientes de los dispositivos electromecánicos. La unidad de control se implementó con circuitos integrados de lógica transistor-transistor (T.T.L.) utilizando componentes de bajo y mediano nivel de integración, obteniéndose un sistema secuencial [3] que reproduce las funciones lógicas determinadas anteriormente.

Para simular el movimiento relativo entre el foco y los sensores se utilizó la reflexión de un haz luminoso sobre un espejo giratorio acoplado al motor a través de un reductor (Fig. 6). Para verificar las operaciones de localización y centrado se mantuvieron los sensores fijos y se apartó intencionalmente el haz; en cambio, para la de seguimiento se desplazaron manualmente los sensores respecto del haz, comprobándose en todos los casos la repetitividad de la posición de centrado.

El modelo efectuó satisfactoriamente estas operaciones, como también la de inversión del sentido de movimiento en los topes. La precisión deseada en la posición de centrado se determinó mediante tensiones de referencia y se comprobó que si se pretende una precisión mejor que 0,5 mm el sistema oscila debido a las vibraciones de la mesa de trabajo y las de otros componentes del mismo; dado que en el caso real son de esperar vibraciones mayores que en el laboratorio, aquel valor es indicativo de la mejor precisión obtenible en la práctica con el sistema.

En el modelo de laboratorio se utilizaron fotoresistores de alta velocidad de respuesta (tiempo característico de  $\sim 1$  ms) como sensores de centrado, mientras que como sensor de topes se utilizó una resistencia variable rotativa adosada al espejo, la cual, operada como divisor de tensión, da la señal requerida a través de comparadores. Por razones de simplicidad no se incluyeron en el sistema los sensores de radiación solar y de temperatura, como tampoco los sistemas de alarma.



Debido a la dificultad de reproducir la distribución de la intensidad en la zona focal, se utilizó una imagen de intensidad aproximadamente uniforme y cuya longitud es igual a la distancia entre sensores. Se hizo corresponder la posición de centrado a iguales superficies iluminadas de éstos compensando electrónicamente sus diferentes respuestas.

Si las condiciones de temperatura en el sistema real obligan a utilizar sensores distintos de los empleados en el modelo, sólo se modificarán los circuitos auxiliares relacionados con ellos, pero no la lógica de operación. Por otra parte, esta misma lógica puede ser usada para cualquier sistema que posea un solo grado de libertad o en aquéllos con dos grados de libertad en los cuales uno de los movimientos se pueda realizar con, por ejemplo, un sistema de relojería.

### Agradecimientos

Agradezco especialmente a J.A.Moragues, W.Scheuer y J.C.Durán, el haber leído el manuscrito con fructífero espíritu crítico, lo que indudablemente contribuyó a mejorar y clarificar su contenido.

### Referencias

- 1.- J.L.Russell, Jr., E.P.De Plomb y R.K.Bansal, "Principles of the Fixed Mirror Solar Concentrator", Informe GA-A 12902 de la General Atomic Company, California, EE.UU. de N.A. (1974).
- 2.- R.Nicolás, R.Platzeck, J.C.Durán, J.A.Moragues y W.Scheuer, "Concentrador Cilíndrico Fijo a Espejo Facetado para Aprovechamiento de la Energía Solar", publicación CNEA N.T. 35/78.
- 3.- E.Mandado, "Sistemas Electrónicos Digitales", 3ª Edición, Editorial Marcombo, Barcelona, España (1977).

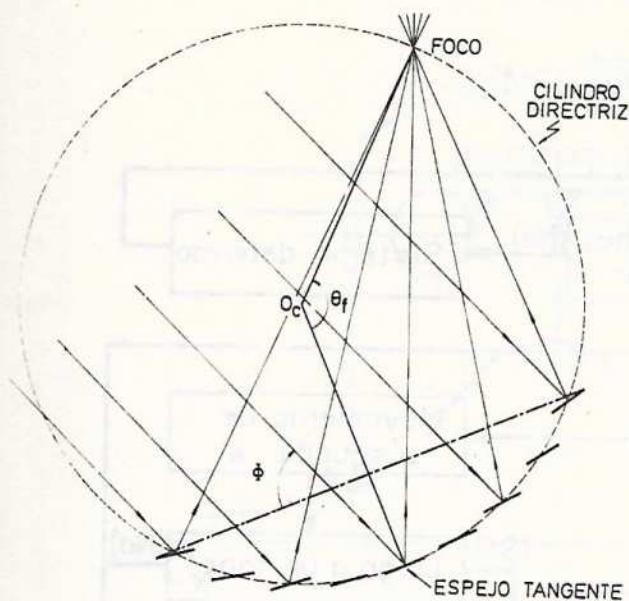


Fig. 1

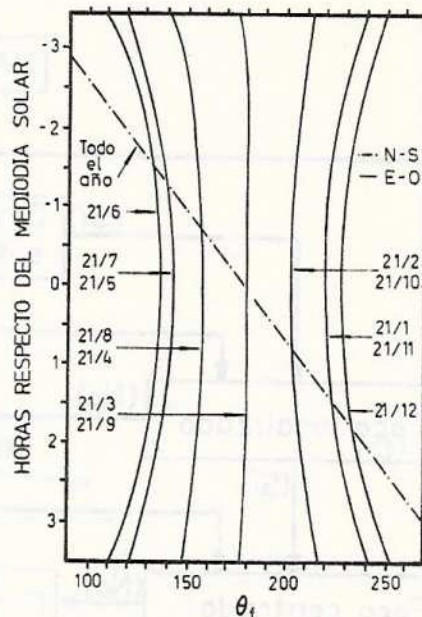


Fig. 2

Fig. 1: Sección del concentrador fijo a espejo facetado. Los rayos incidentes han sido proyectados sobre el plano  $P_t$  perpendicular al eje de simetría  $O_c$  del cilindro de referencia imaginario. En ángulo  $\phi$  está determinado por la proyección de los rayos incidentes sobre el plano  $P_t$  y por el plano de apertura; se lo considera positivo cuando se lo mide en el sentido horario. El ángulo  $\theta_f$  determina la posición angular del foco lineal respecto del espejo tangente; se lo considera positivo cuando se mide en sentido antihorario.

Fig. 2: Variación de  $\theta_f$  a lo largo del día correspondiente a distintas épocas del año para un concentrador ubicado a  $34^\circ 30'$  S con su plano de apertura inclinado  $34^\circ 30'$  hacia el Norte y para las orientaciones E-O y N-S.



# LOGICA DE OPERACION

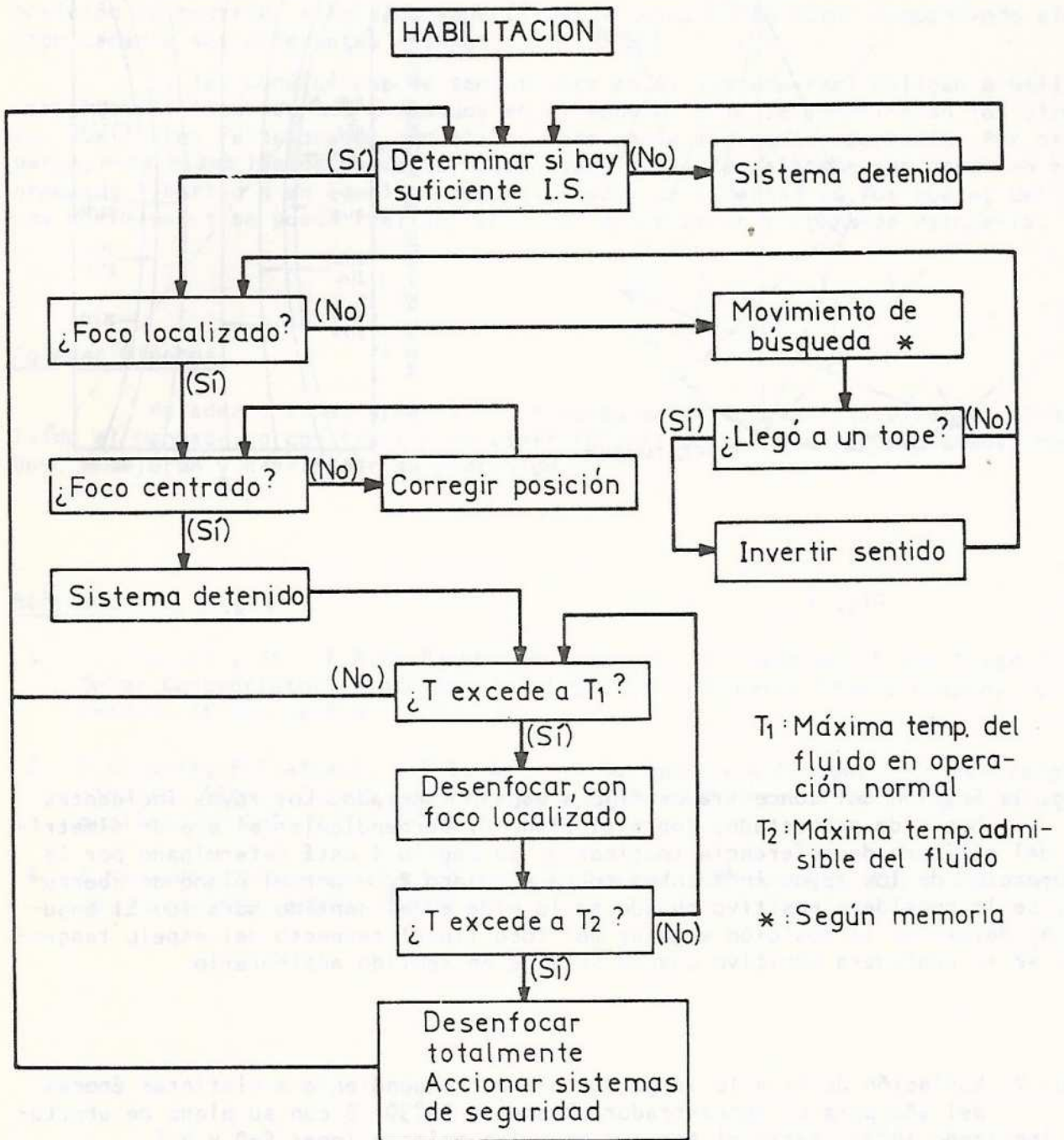


Fig. 3: Diagrama de flujo de la lógica de operación.



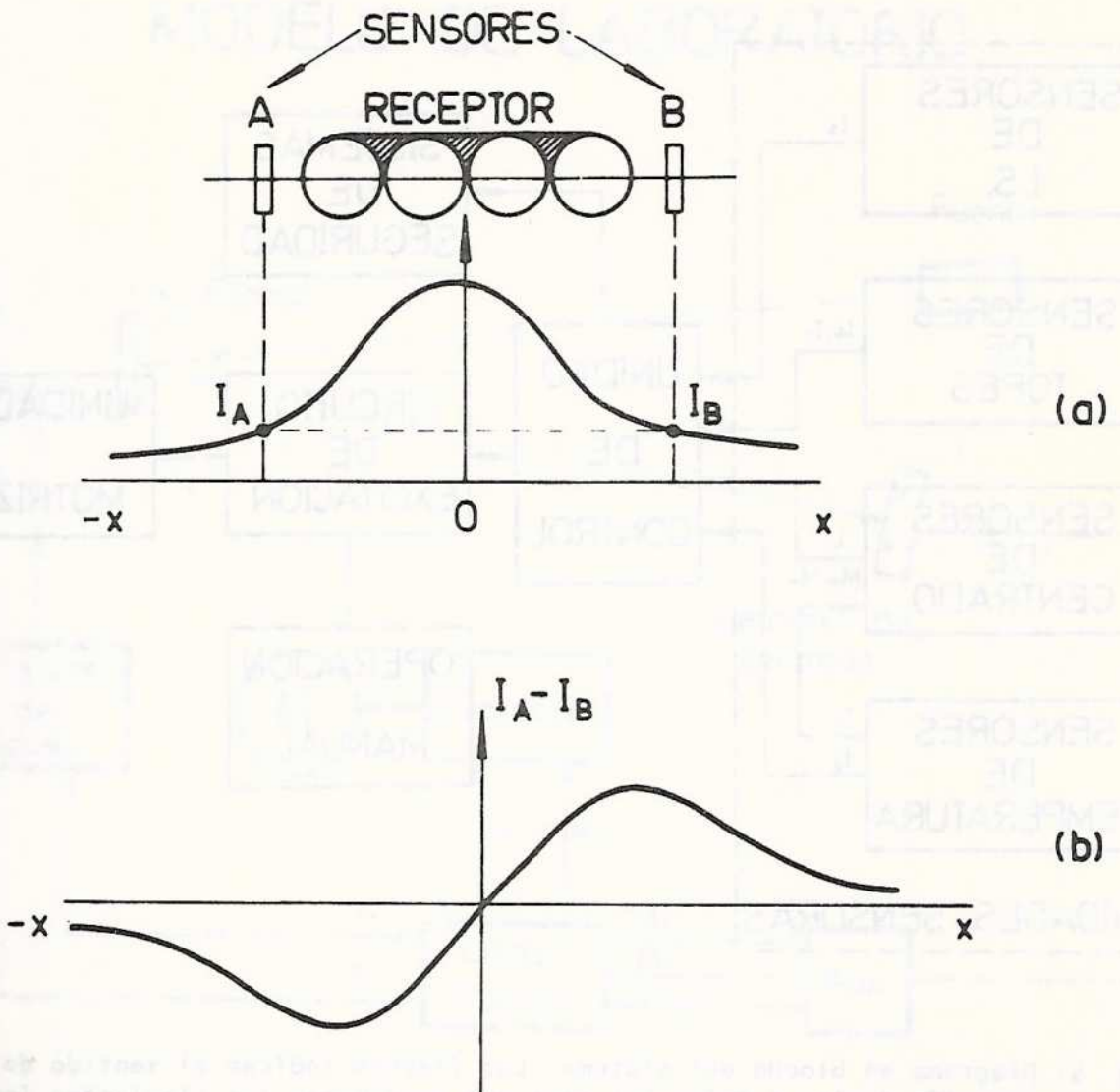


Fig. 4: a) Esquema de la ubicación del receptor y de los sensores de centrado; se indica una distribución arbitraria de intensidad para la condición de coincidencia foco-receptor ( $I_A = I_B$ ).

b) Diferencia de intensidad en ambos sensores en función del desplazamiento relativo foco-receptor respecto de la posición indicada en a).



## ESQUEMA DE CONEXION

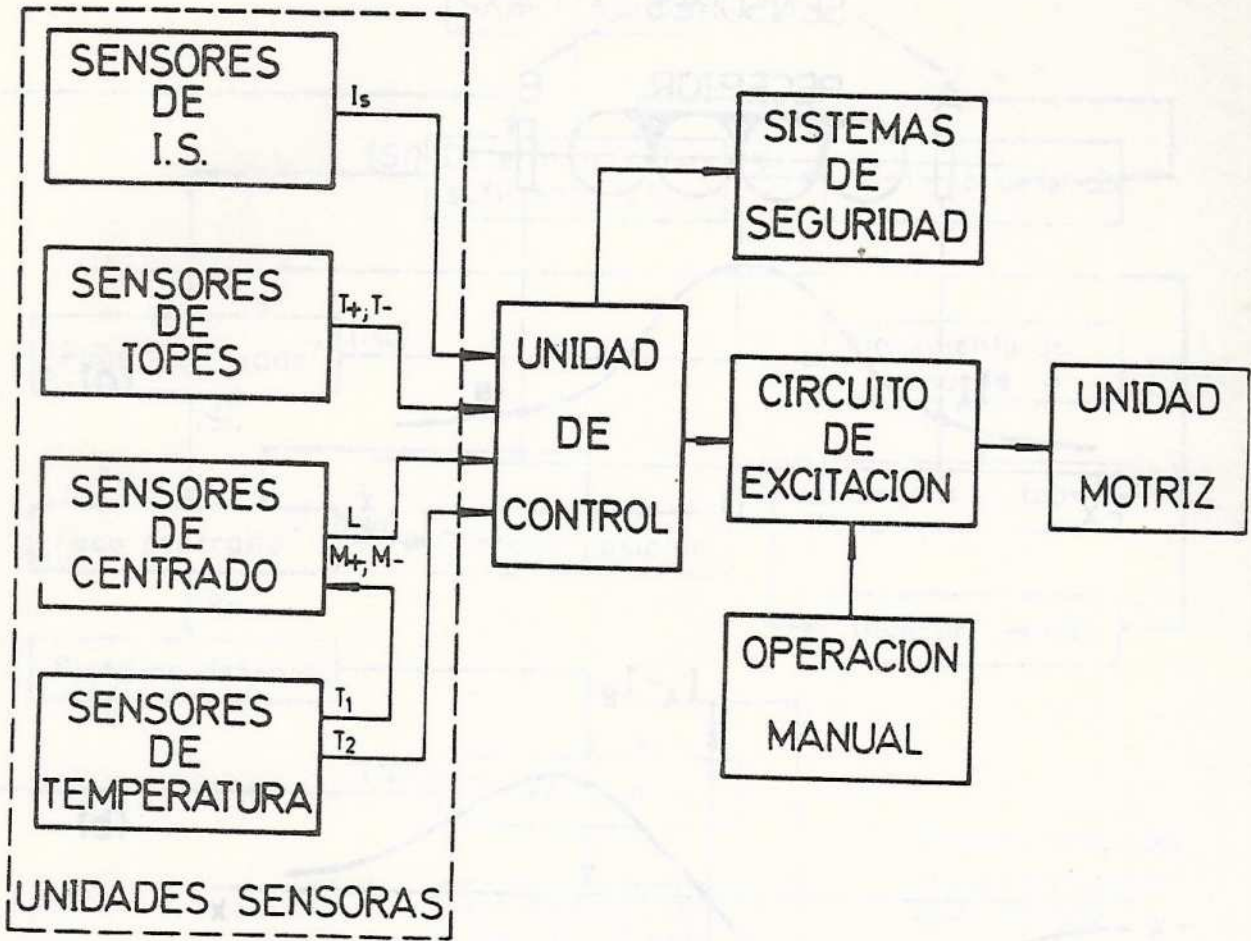


Fig. 5: Diagrama en bloque del sistema. Las flechas indican el sentido de circulación de las señales binarias que transmiten las siguientes informaciones:

- $I_s$ : Nivel de radiación superior al mínimo necesario para que el concentrador opere.
- $T_+$ : Llegada del receptor a la posición extrema en movimiento horario.
- $T_-$ : Llegada del receptor a la posición extrema en movimiento antihorario.
- $L$ : Foco localizado.
- $M_+$ : Corrección de la posición del receptor mediante movimiento horario.
- $M_-$ : Corrección de la posición del receptor mediante movimiento antihorario.
- $T_1$ : Temperatura del fluido mayor o igual que la primera temperatura crítica.
- $T_2$ : Temperatura del fluido mayor o igual que la máxima permitida.



# MODELO DE LABORATORIO

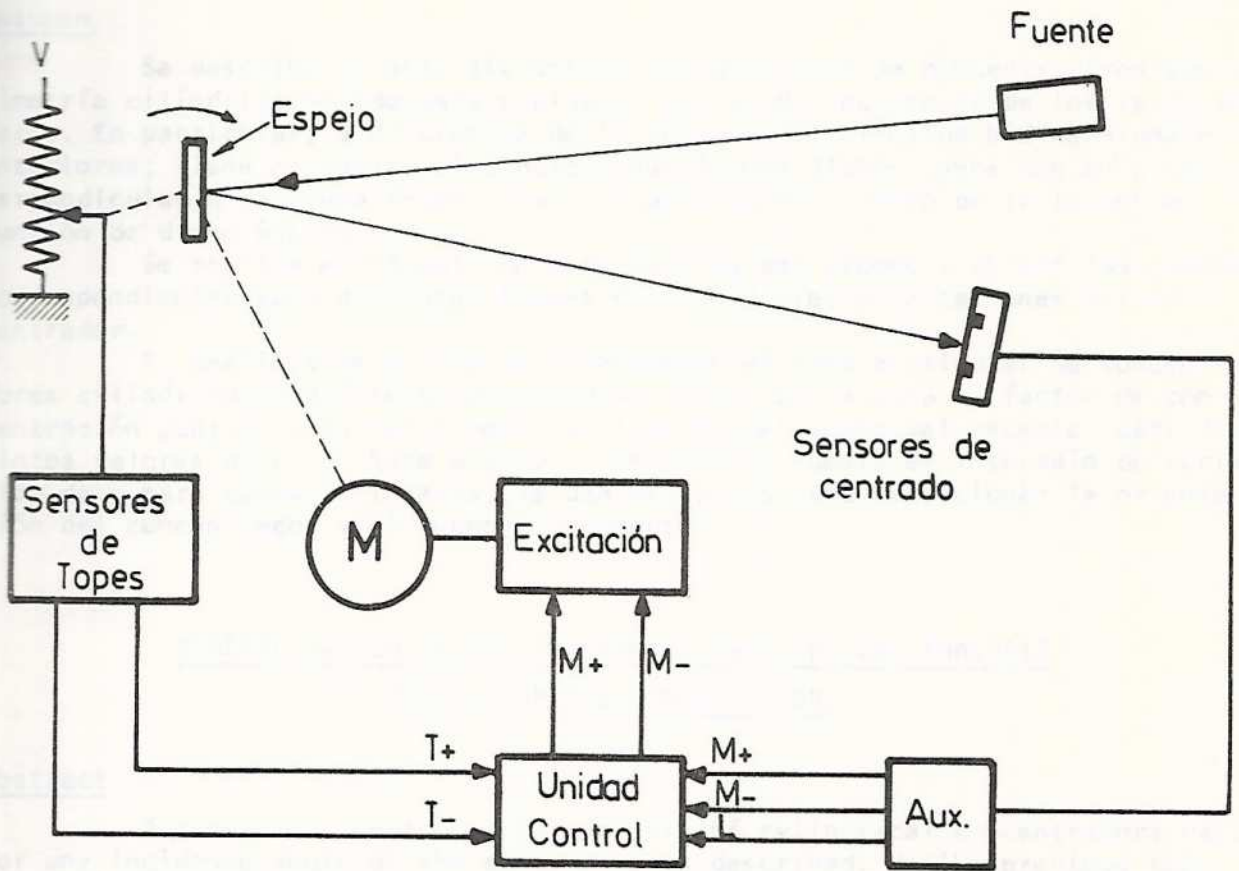


Fig. 6: Esquema del modelo de laboratorio utilizado para simular las condiciones de operación del receptor. Las líneas de trazos indican el acoplamiento directo entre el espejo y el resistor variable, y a través del reductor entre éstos y el motor.