

## UN SISMOGRAFO ELECTRONICO DE CONSTRUCCION SENCILLA.

J. Merino y Coronado.

Instituto de Geofisica de la Universidad Nacional de México  
e Instituto Nacional de la Investigación Científica.

(Recibido: Abril 15, 1953)

## RESUMEN

*In the following lines a method for coupling a seismometer to a recording galvanometer by means of a photoelectric cell and a linear amplifier is presented.*

*The theory shows that such a system operates as if the recorder were mechanically coupled to the seismometer, i.e., the response is practically linear.*

*The purpose of the instrument is to record on smoked paper in such a way that friction of the stylus is practically overcome by the final amplifier current and no effect on the pendulum itself is present, so the seismometer behaves*

*Practically as a photographic pendulum with the added advantage of cheap operation. The recorder itself may be installed in any convenient place where the record is visible all the time.*

*The apparatus can be built in any mechanical shop and the principle may be successfully applied to register on smoked paper any phenomenon which may be measured by means of a rotation or torsion, such as is provided by the deflections of a galvanometer coil or rotating mirror.*

*Magnifications of the order of 3,000 to 5,000 are easily obtained.*

La tendencia de la Sismología moderna es abandonar poco a poco los instrumentos de masas pendulares grandes y de registro mecánico, para substituirlos por sismógrafos de masas pequeñas con registro fotográfico. Pero los observatorios de pocos recursos no se sienten inclinados a hacerlo así debido principalmente al costo elevado del mantenimiento de tales instrumentos: en efecto, si la velocidad de avance del papel ha de ser lo suficientemente grande para que los sismogramas sean comparables a los que se obtienen con registro mecánico, el gasto de materiales fotográficos puede llegar a ser considerable.

Si bien los sismógrafos fotográficos pueden amortiguarse linealmente, cosa que no es absolutamente cierta para los de registro mecánico que tienen grandes masas pendulares, los trazos de los primeros son muy anchos comparados con los de los segundos y su claridad disminuye conforme aumenta la velocidad con que se mueve el punto luminoso so-

bre el papel.

El autor se ha dedicado a tratar de resolver algunos problemas instrumentales de la Sismología. En otra ocasión (Congreso Científico de la U.N.A.M.) se ocupó de la construcción en México de un acelerógrafo tipo Montana, instrumento que en la actualidad funciona en la Estación Sismológica de Tacubaya. El presente artículo presenta una posible solución al problema que presenta el registro fotográfico en los observatorios de pocos recursos. Las condiciones exigidas a un aparato como el que proponemos son las siguientes:

- 1.- El Sismómetro o péndulo ha de ser de una masa pequeña, del orden del kilogramo.
- 2.- El amortiguamiento del péndulo ha de ser lineal, lo cual solamente se obtiene con un amortiguamiento electromagnético.
- 3.- El registro ha de ser mecánico sobre papel, pero sin que el rozamiento de la pluma o el estilete intervenga en el funcionamiento del sismómetro propiamente dicho.
- 4.- El sismómetro ha de poderse usar con registro fotográfico ordinario o con registro galvanométrico del tipo Galitzin.
- 5.- El registrador mecánico ha de poderse instalar en una sala diferente y alejada de la sala de instrumentos.

Las condiciones anteriores parecen ser muy severas y de realización bastante dificultosa. Sin embargo, las cosas no son así en modo alguno. Basta dividir el problema en dos porciones: el sismómetro y el mecanismo registrador.

EL SISMOMETRO. El sismómetro más conveniente será uno del tipo de Galitzin, con masa pequeña, aún cuando el dispositivo registrador puede adaptarse a cualquier péndulo. Para ello basta con fijar un espejo, ya sea a la masa misma, ya sea al extremo de una palanca amplificadora. Nosotros recomendamos un péndulo horizontal fácil de construir, cuyos detalles pueden verse en la figura No. 1. Este péndulo horizontal puede utilizarse tanto para registro fotográfico ordinario, del tipo usado en los instrumentos Wood-Anderson o Milne-Shaw, como para registro galvanométrico del tipo Galitzin. Datos completos sobre la construcción del sismómetro o sobre adaptaciones que puedan hacerse a instrumentos existentes pueden obtenerse del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., Puente de Alvarado 71, México, D.F.

EL MECANISMO REGISTRADOR. Es en realidad sencillo y puede utilizarse de tres maneras: con un péndulo fotográfico cualquiera, por intermedio de una celda fotoeléctrica; con un galvanómetro auxiliar, constituyendo así un registro de Galitzin modificado, o directamente acoplado a la bobina generadora de impulsos del péndulo horizontal descrito ya.

En realidad, el mecanismo registrador es solamente un amplificador lineal que se excita mediante una celda fotoeléctrica (o con el voltaje desarrollado en el inducido de un péndulo de tipo Galitzin) y que opera un galvanómetro diferencial que registra sobre una tira de papel enrollada en un cilindro. El registro se hace con un estilete sobre papel ahumado, según los métodos usuales en sismología, o con tinta, mediante un registrador de sifón.

En el caso de la operación fotoeléctrica, el instru-

mento funciona como sigue:

En la figura 2,  $e$  es un espejo plano unido al péndulo y que oscila con él, constituyendo un sismómetro fotográfico ordinario;  $H$  es un haz de luz de rayos paralelos que viene de una lámpara  $L$  cuyo filamento se encuentra en el foco de una lente  $l$ . La lámpara  $L$  se alimenta con una fuente de energía eléctrica  $P$  de potencial constante y la intensidad de la corriente se regula con la resistencia variable  $Res$ . El haz de rayos  $H$  incide sobre el espejo en reposo de tal modo que se refleja sobre la ranura  $R$  detrás de la cual se encuentra la celda fotoeléctrica  $C$ , de manera que la mitad del haz pasa por la mitad de la ranura y la otra mitad es detenida por la lámina opaca en la cual aquélla está abierta, tal como lo indica la figura 2.

Las rotaciones del espejo  $e$  se traducirán en desviaciones del haz de rayos luminosos  $H$ , el cual iluminará más o menos la superficie sensible de la célula fotoeléctrica  $C$ , según que una mayor o menor porción del haz  $H$  sea detenida por la ranura  $R$ .

En la célula fotoeléctrica se producirá una diferencia de potencial eléctrico  $E$ , variable con las rotaciones del espejo. Escogiendo una célula fotoeléctrica de respuesta lineal (hay varias en el comercio que pueden considerarse como tales dentro de los límites que requiere la sismología) las variaciones del voltaje  $E$  serán proporcionales a los ángulos de rotación del espejo, o más exactamente al duplo de dichos ángulos.

Mediante el análisis y también experimentalmente, se puede demostrar que es posible construir un sistema óptico sencillo que produzca un haz de rayos cuya intensidad sea

prácticamente uniforme a cierta distancia, aún cuando el filamento de la lámpara no sea igualmente brillante en toda su longitud.

La intensidad lumínica ha de mantenerse muy constante, cosa que no ofrece muchas dificultades por lo demás. Y si quedan algunas variaciones, pueden eliminarse con un diseño adecuado del amplificador, según se verá luego.

Si las variaciones del potencial  $E$  proveniente de la célula fotoeléctrica se inscribieran mediante un voltímetro de válvula de diseño ordinario, la línea del cero experimentalmente variaciones imposibles de evitar. Pero si se utiliza un montaje simétrico (Push-Pull) dichas variaciones se eliminan por completo. En la figura 3,  $T_1$  y  $T_2$  son dos tubos iguales de un montaje simétrico al cual se le aplica la tensión  $E$  producida por la celda fotoeléctrica.

Cuando el espejo (figura 2) del sismómetro está en reposo, el amplificador estará en equilibrio. En los circuitos de placa de  $T_1$  y  $T_2$  circularán corrientes iguales.

En  $L_1$  y  $L_2$  tenemos las dos mitades del arrollado del cuadro móvil de un galvanómetro registrador del tipo de D'Arsonval, provisto de una toma en el centro del devanado. Con el amplificador en equilibrio, las corrientes que pasan por  $L_1$  y  $L_2$ , siendo iguales, ejercerán acciones iguales y contrarias y el cuadro del galvanómetro no se moverá. Cualesquiera variaciones en el voltaje de entrada  $E$  harán que las corrientes alternas que recorran  $L_1$  y  $L_2$  se encuentren desfasadas  $180^\circ$ , produciéndose así torsiones en fase que se registrarán mediante el estilote o el sifón registrador.

Si el amplificador es de respuesta lineal, como es

prácticamente el caso de los amplificadores de acoplamiento directo (Loftin-White) las desviaciones del estilete serán proporcionales a las variaciones del voltaje de entrada. Si la célula fotoeléctrica es de respuesta lineal, el voltaje de entrada será proporcional a las rotaciones del espejo y todo el aparato funcionará como si se tratara de registro mecánico.

El análisis matemático demuestra que las cosas ocurren prácticamente de este modo.

Supongamos que el espejo oscile con una amplitud constante y una frecuencia  $\omega/2\pi$ . Supongamos igualmente que la amplificación de la fuerza electromotriz aplicada a las bobinas  $L_1$  y  $L_2$  del galvanómetro, también sea lineal, ya que esta condición es fácil de obtener en la práctica.

Despreciando el desplazamiento de fase ocasionado por las capacidades del circuito, ya que su valor es despreciable a las frecuencias usadas en sismología, la fuerza electromotriz en el circuito de cada una de las bobinas  $L_1$  y  $L_2$  será

$$E \text{ sen } \omega t$$

donde  $E$  dependerá de la amplitud de las oscilaciones y del factor de amplificación del amplificador.

Si el amortiguamiento del sismómetro es totalmente electromagnético y, despreciando la inductancia del galvanómetro, que es pequeña, la ecuación diferencial del movimiento será:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + k\theta = \frac{2M}{r} \left( E \text{ sen } \omega t - M \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (1)$$

en donde:

$\theta$  es el desplazamiento angular;

$I$  es el momento de inercia del elemento que gira;

$k$  es la constante de torsión del hilo de suspensión del galvanómetro;

$M$  es el momento magnético de una bobina rotatoria y

$r$  es la resistencia de uno cualquiera de los circuitos de las bobinas rotatorias.

Si sabemos que

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \left(\frac{k}{I}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

donde  $T_0$  es el período propio del galvanómetro oscilando libremente y que

$$h = \frac{M^2}{r \left(\frac{k}{I}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

donde  $h$  es el coeficiente de amortiguamiento:

la solución para  $\theta$  de la ecuación (1) es:

$$\theta = \frac{2 M E \operatorname{sen} (\omega t + \phi)}{I r [(\omega_0^2 - \omega^2) + 4 h^2 \omega_0^2 \omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

en la cual  $\phi$  se define por su tangente.

$$\tan \phi = \frac{2 M^2 \omega}{I r (\omega^2 - \omega_0^2)}$$

Como la construcción del amplificador y del péndulo

pueden llevarse a cabo fácilmente satisfaciendo las condiciones previstas, la observación de las ecuaciones anteriores nos suministra útiles indicaciones para la construcción del galvanómetro registrador, que es realmente el alma del instrumento.

Es deseable que la curva de respuesta de la combinación Sismómetro-Registrador sea tan parecida como se pueda a la curva de respuesta del Sismómetro solo. Para obtener eso es necesario que el período del galvanómetro sea menor que el menor período al cual responda el sismómetro o sistema pendular. Por otra parte, no es posible modificar grandemente el momento de inercia  $I$  del elemento rotativo, ya que -para obtener buena claridad en las graficas- es necesario que el haz inscriptor no sea muy corto. En esta forma, para variar la frecuencia propia del galvanómetro no queda otro camino que modificar la constante  $k$  de torsión del hilo de suspensión, haciéndola grande, para que la frecuencia propia también lo sea, según la ecuación (2).

Esto, que aparentemente es una desventaja, en la realidad no lo es, sino todo lo contrario: el galvanómetro puede construirse así de modo más robusto.

Sin embargo, al aumentar la frecuencia en esta forma, el coeficiente de amortiguamiento  $h$  disminuye (ecuación (3)) pero eso no constituye un inconveniente grave, ya que es posible encontrar un valor de  $k$  satisfactorio para ambas condiciones (ecuaciones (2) y (3)).

CONSTRUCCION DEL INSTRUMENTO. La parte mas difícil de construir es, evidentemente, el galvanómetro. Pero cualquier mecánico hábil puede hacerlo sin grandes dificultades.

La figura 4 ilustra dicho instrumento. Las bobinas tienen 2,000 vueltas de alambre esmaltado enrolladas sobre un marco de papel grueso impregnado de goma laca para darle rigidez.

Las conexiones de los extremos del devanado pueden sacarse por los hilos de suspensión, haciendo las tomas centrales mediante unos hilos muy delgados arrollados en hélice. El imán, de Alnico, puede tomarse de un altoparlante descartado y las zapatas polares se construyen de fierro.

El sistema óptico es muy sencillo: una lamparilla de linterna eléctrica de bolsillo se coloca en el foco de una lente biconvexa y por medio de un diafragma se utiliza solamente la parte central del haz luminoso resultante. Como fuente de alimentación puede usarse un devanado de 6.3 volts del transformador que alimenta al amplificador, aunque es siempre más conveniente utilizar una batería de acumuladores de 6 V que se mantiene "flotante", conectada permanentemente a un cargador de baterías que la conserve a plena carga. La intensidad luminosa se regula con un reóstato de 50 ohms, de alambre, de los usados comúnmente en radiotécnica.

Dos medios existen para acoplar el sismómetro al amplificador: el electromagnético y el fotoeléctrico. Con el primero, los dos extremos de la bobina del péndulo se acoplan directamente al amplificador y no se utiliza sistema óptico alguno.

El acoplamiento fotoeléctrico permite una amplificación variable, alejando el sismómetro de la celda fotoeléctrica, para aumentar la palanca óptica.

Es posible utilizar una sola celda, como se ha ex-

plicado ya, acoplada al amplificador, o utilizar dos de ellas y trabajar desequilibrando un amplificador simétrico (Push-Pull). Para el primer caso puede usarse el amplificador de la figura 5 y para el segundo, el de la figura 6, aún cuando es perfectamente posible utilizar el segundo para el primer caso.

Para utilizar un amplificador simétrico (el cual, entre paréntesis, da un mejor rendimiento por tener menos distorsión) se utiliza el dispositivo óptico de la figura 7:

Un sistema óptico formado por una lámpara F cuya intensidad luminosa se regula con la resistencia R y una lente colocada entre dos diafragmas, lanza un haz de rayos paralelos sobre el espejo colocado en la parte móvil del sismómetro.

Los rayos se reflejan en él y van a incidir sobre el vértice del ángulo diedro formado por dos espejos A y B colocados a  $90^\circ$ , de tal manera que la mitad de la luz se refleje hacia la izquierda y la otra mitad hacia la derecha, sobre dos células fotoeléctricas C y D, acopladas a la entrada de un amplificador simétrico de acoplamiento directo. Si las dos células son iguales, ambas suministrarán la misma tensión y las bobinas del galvanómetro estarán en equilibrio. Pero al girar el espejo del sismómetro en un ángulo dado, el haz reflejado sobre él se desplazará un ángulo doble y una de las dos células recibirá una iluminación mayor, con lo cual el potencial que suministre será también mayor y el amplificador se desequilibrará, produciéndose un giro en el cuadro móvil del galvanómetro: ya hemos visto que la respuesta puede hacerse prácticamente lineal.

La amplificación del instrumento puede variarse de

dos maneras: variando el coeficiente de amplificación del amplificador, cosa poco recomendable, o variando la distancia entre el espejo y las células fotoeléctricas.

El galvanómetro, cuyas dos bobinas tienen sus cuatro terminales separados, se puede tener prácticamente a cualquier distancia conveniente del sismómetro y amplificador. Para acoplarlo se necesitan solamente dos hilos que formen una línea de baja impedancia. Los tiempos se introducen simplemente poniendo en corto circuito una de las dos bobinas: una resistencia variable permite regular la desviación de la aguja al hacer las marcas de minuto.

En la figura 6 se indica un dispositivo de centrado, que permite colocar la aguja en cualquier posición conveniente. Este dispositivo puede omitirse si se desea, en cuyo caso el galvanómetro tendrá solamente una toma central. La inscripción puede hacerse con tinta o sobre papel ahumado.

No es necesario que el instrumento trabaje en la oscuridad completa: basta una luz débil, pero constante, que no impresione las células fotoeléctricas.

El aparato completo puede construirse en cualquier taller mecánico. La amplificación puede llevarse con facilidad a 4,000 ó 5,000 veces y su máxima conveniencia estriba en el bajo costo de operación, pues, reuniendo las ventajas de un aparato fotográfico, registra sobre papel ordinario. Además, el registrador se puede colocar en cualquier lugar conveniente donde sea visible todo el tiempo.

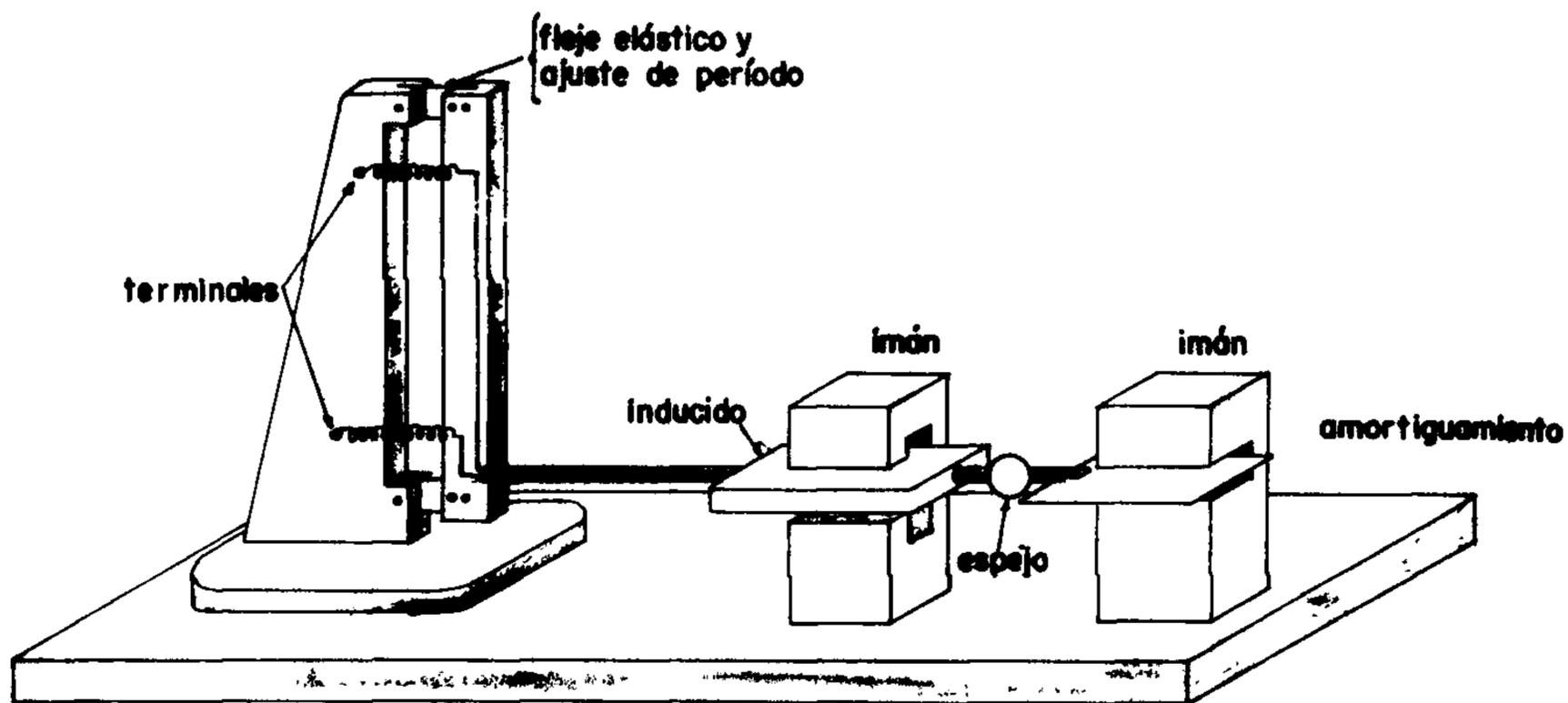


FIG. 1 ESQUEMA DEL SISMÓMETRO

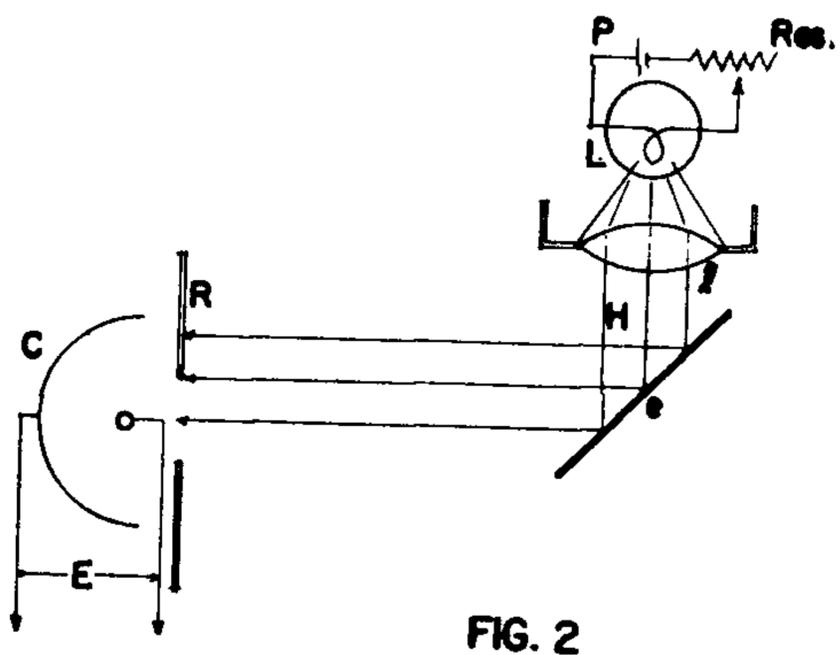


FIG. 2

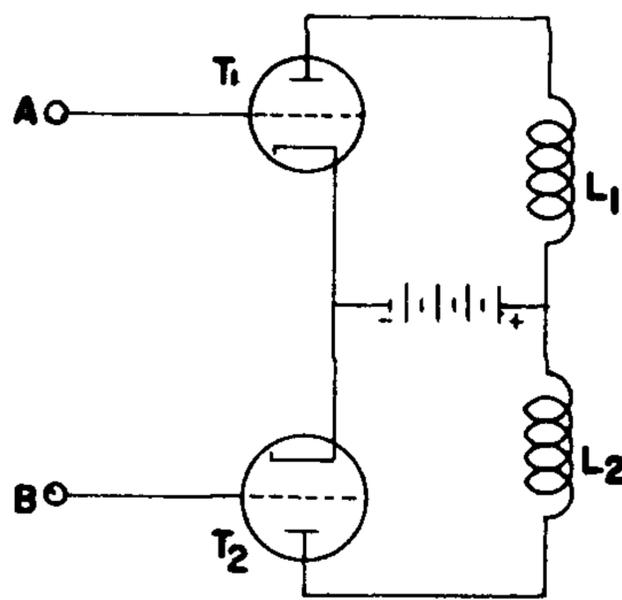
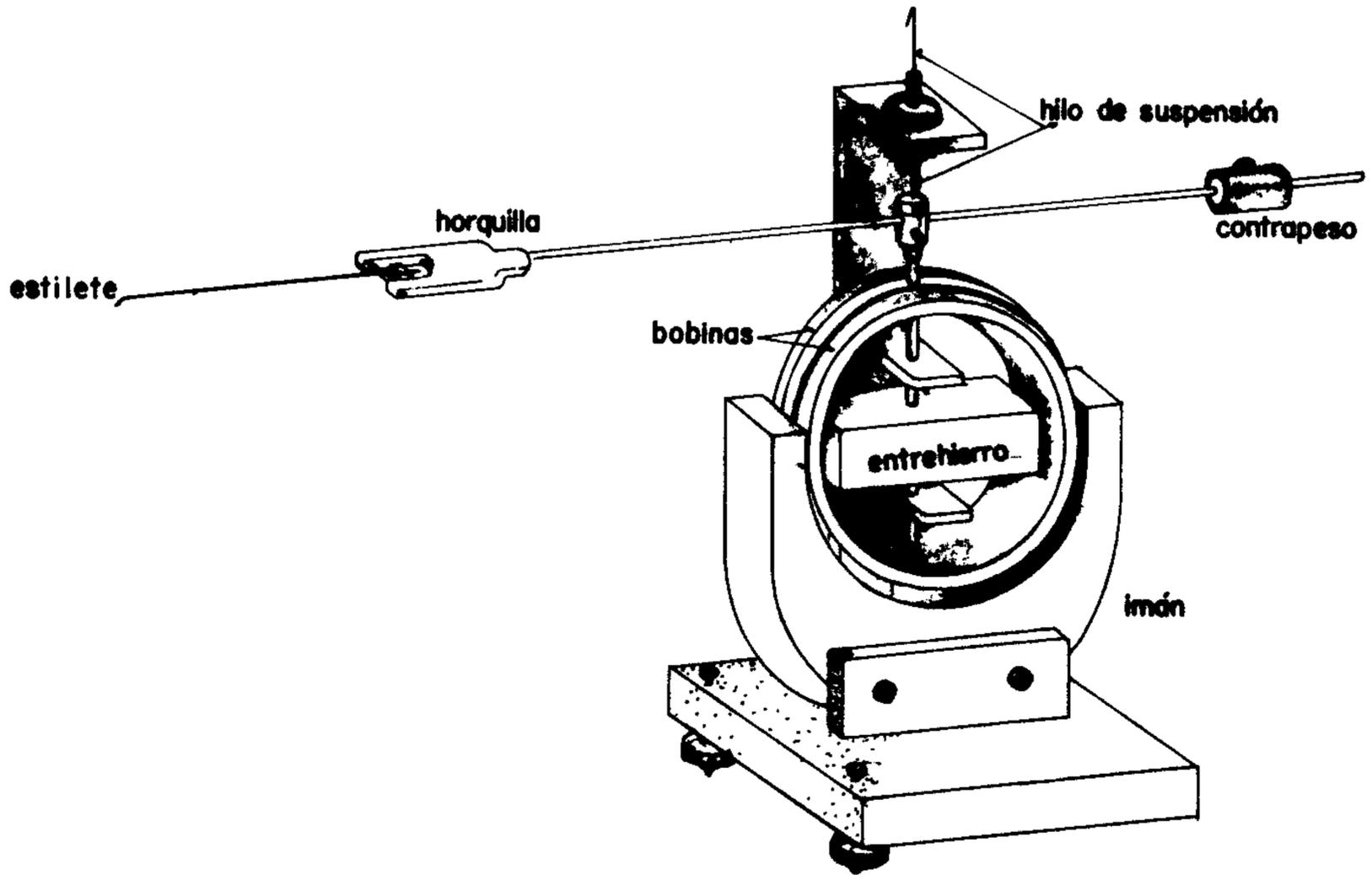
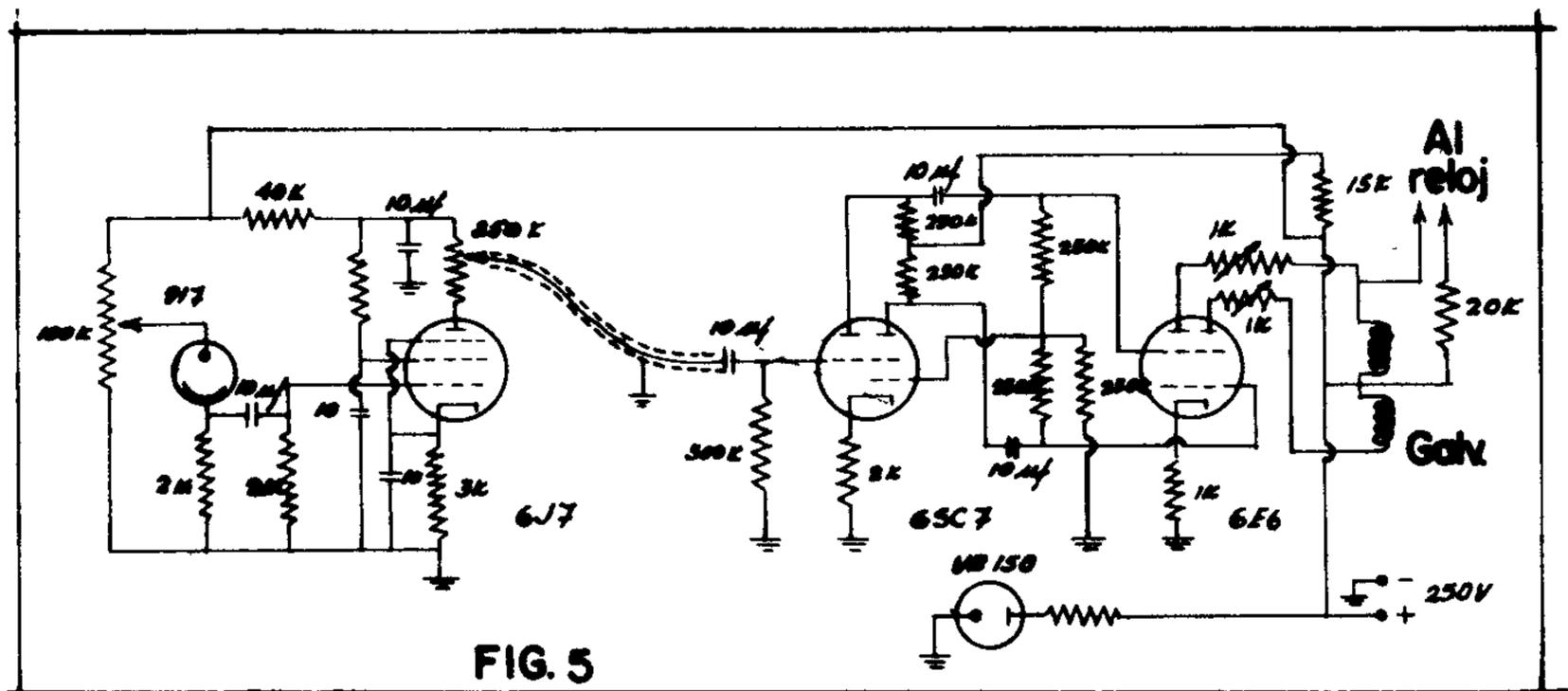


FIG. 3



ESQUEMA DEL GALVANÓMETRO FIG. 4



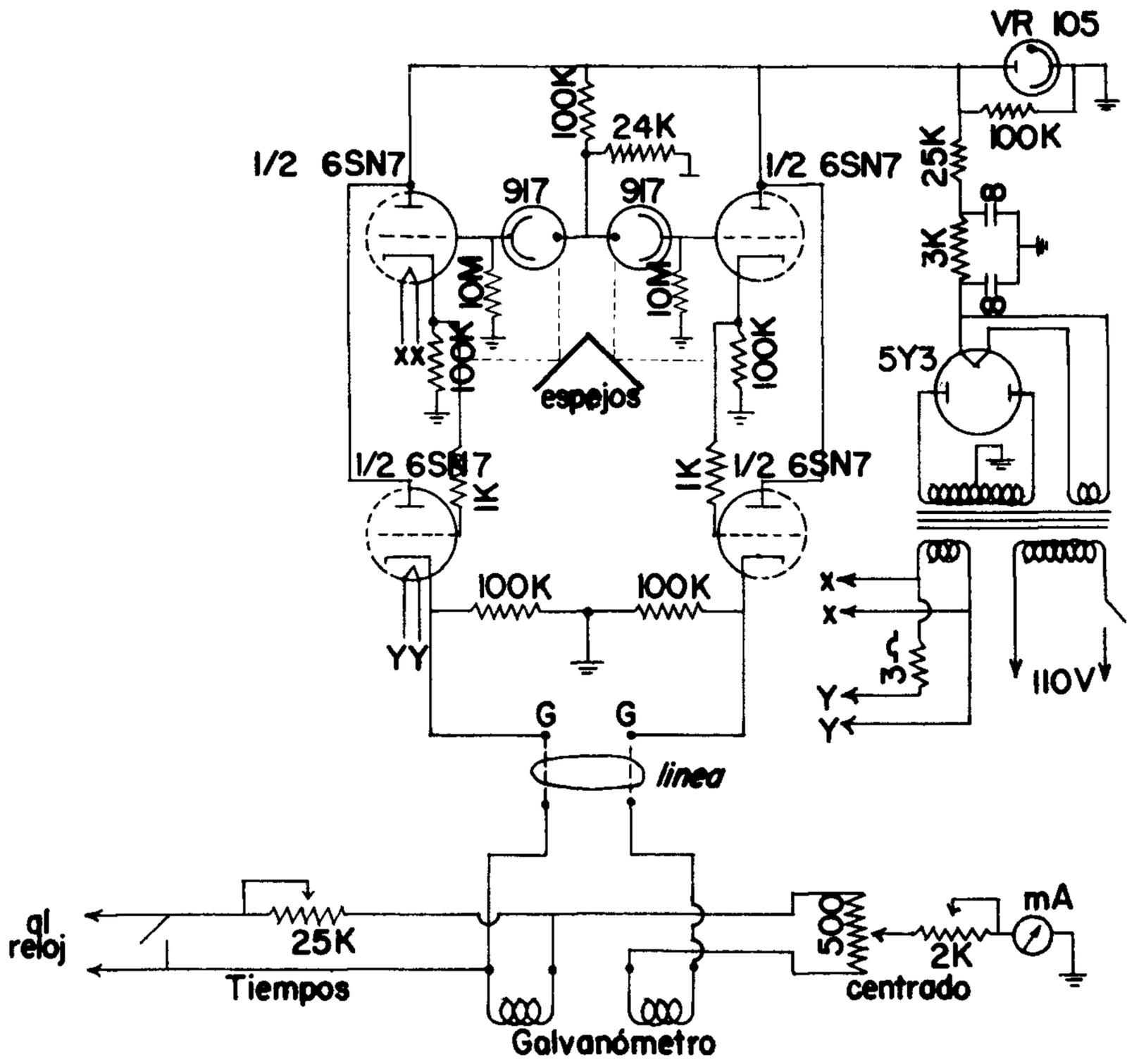


FIG. 6

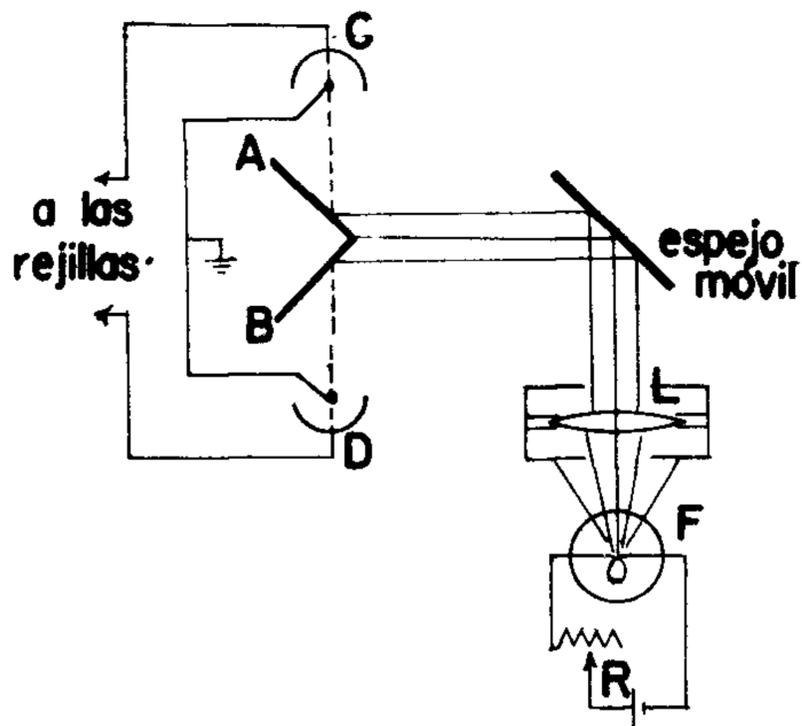


FIG. 7