

NUEVOS INSTRUMENTOS.—SISMÓGRAFOS Y ACELERÓGRAFOS ACOPLADOS CAPACITIVAMENTE

La necesidad de grandes amplificaciones y la conveniencia de registros galvanométricos y amortiguamientos lineales ha hecho que los aparatos exclusivamente mecánicos se encuentren abandonados casi totalmente. Varias casas fabricantes hacen todavía algunos aparatos para el registro de temblores fuertes, cuyo registro es totalmente mecánico, sobre papel ahumado. Pero, en esos sismógrafos el rozamiento del estilete es casi siempre muy difícil de tomar en cuenta y los sistemas de amortiguamiento, sobre todo cuando la masa pendular es grande, no son nunca o casi nunca proporcionales a la velocidad, pues tal cosa es imposible de obtener con líquidos viscosos y paletas que se mueven dentro de ellos o con pistones que oscilan dentro de cilindros llenos de aire.

La tendencia moderna es construir péndulos de masas muy pequeñas, a veces de sólo unos cuantos gramos, amortiguados electromagnéticamente y hacer el registro de los movimientos por un procedimiento fotográfico cualquiera, directo como en los sismógrafos Wood-Anderson o indirecto a través de un galvanómetro, como en los aparatos Galitzin o Benioff. Por este medio se alcanzan fácilmente amplificaciones que varían desde unas 50 veces (acelerógrafos Montana) hasta varios miles de veces (Benioff vertical), con la ventaja de que el factor de amplificación es fácilmente regulable, con sólo acelerar o alejar el papel fotográfico.

El autor es partidario de otro tipo de solución: hacer los péndulos muy pequeños, tal como es la práctica actual, pero registrar sus movimientos sobre papel ahumado o con tinta, mediante el uso de robustos galvanómetros registradores que llevan una pluma o estilete y que son en realidad verdaderos miliamperímetros. Esta solución implica el uso de amplificadores electrónicos.

Hace algunos años fue publicado un artículo sobre el modo de construir un sismógrafo para medir desplazamientos, que utiliza un péndulo ligero y un sistema fotoeléctrico con un amplificador que alimenta un galvanómetro registrador (Merino y Coronado, J., 1955). Varios aparatos del sistema descrito se encuentran funcionando satisfactoriamente. Sin embargo, el uso de celdas fotoeléctricas no deja de ser un inconveniente.

Es posible utilizar un transductor electromagnético y acoplarlo directamente a la entrada del amplificador del galvanómetro; el autor lo ha hecho con éxito, utilizando un Benioff vertical de 120 Kg. Sus registros eran muy similares a los obtenidos con el registro galvanométrico original del aparato. Pero, este sistema registrará velocidades y no desplazamientos, y si se quieren medir aceleraciones, las cosas se complican.

En esta ocasión queremos examinar la posibilidad de construir sismógrafos o acelerógrafos cuyos registros se hagan sobre papel ordinario mediante un galvanómetro registrador, pero sin tener que usar celdas fotoeléctricas.

El problema presenta cuatro aspectos:

1. El sismógrafo mismo;
2. El transductor o mecanismo de acoplamiento;
3. El amplificador y
4. El galvanómetro.

El *galvanómetro* ha de ser robusto y fácil de construir, si se desea que el aparato completo no sea excesivamente caro. Además, ha de utilizar corrientes relativamente fuertes, con el fin de que el rozamiento del estilete o la adhesión de la tinta sobre el papel sean vencidos con facilidad. Esto obliga a construir galvanómetros de baja impedancia y hace imperativo el uso de acoplamientos por cátodo en el *amplificador*. La construcción del amplificador no ofrece dificultad alguna: haciéndolo simétrico (*push pull*) se eliminan las armónicas pares y usando acoplamiento directo entre

NEW INSTRUMENTS.—CAPACITIVELY COUPLED SEISMOGRAPHS AND ACCELEROGRAPHS

The need of great magnifications and the usefulness of galvanometric recording and linear damping has almost made obsolete the exclusively mechanical recording instruments. Several manufacturers still make some strong-motion instruments which mechanically record on smoked paper. But, in these seismographs the friction of the stylus on the paper is almost always very difficult to compute, and the damping system is never proportional to velocity, specially when the steady mass is great, since linear damping is impossible when viscous liquids and moving vanes submerged in them are used, or if they have pistons moving inside air-filled cylinders.

The modern tendency is to build pendular systems with very light steady masses, often only of a few grams, damped electromagnetically, and to record the motion photographically, either directly, as in the Wood-Anderson seismographs, or indirectly through a galvanometer, as is the case with Galitzin or Benioff instruments. In this way it is easy to attain magnifications varying from about 50 times (Montana accelerographs) to several thousand (Vertical Benioff) with the advantage of a variable magnification factor easily regulated by simply varying the location of the sensitive paper.

The author prefers another way to solve the problem, i. e. to use very small steady masses, as recommended by modern practice, but to record its movements on paper—either smoked or with pen and ink—by means of sturdy galvanometers with a pen or a stylus which are in reality true milliammeters. This practice implies the use of electronic amplifiers.

Some years ago an article was published on how to build a displacement meter using a light mass with a photocell and amplifier driving a recording galvanometer (Merino y Coronado, J., 1955). Several instruments of this type are satisfactorily operating at the present time. Nevertheless, the use of photoelectric cells may be inconvenient.

It is possible to use an electromagnetic transducer coupled to the input of the galvanometer amplifier. The author has successfully done that by using a 120 Kg Vertical Benioff. Its records were very similar to those obtained by the original galvanometric system which came with the instrument. However, this system will record velocities and not displacements. If we desire to measure accelerations, things become somewhat complicated.

We are now going to discuss the possibility of building seismographs or accelerographs which record on ordinary paper by means of a recording galvanometer, but without the need of using photocells.

The problem has four aspects:

1. The seismometer proper;
2. The transducer or coupling mechanism;
3. The amplifier, and
4. The galvanometer.

The *galvanometer* has to be sturdy and simple to build if we want to have a complete instrument not exceedingly high priced. On the other hand, it has to work with relatively strong currents in order to easily overcome the friction of the stylus or the adherence between ink and paper. This makes compulsory the use of low impedance galvanometers coupled to cathode follower amplifiers. The construction of the amplifier offers no problem: a symmetrical *push-pull* type eliminates the even harmonics, and direct coupling between stages avoids the use of big condensers otherwise needed to

una etapa y otra se evita el uso de grandes condensadores capaces de pasar las bajas frecuencias usuales en Sismología. El galvanómetro ha de estar intercalado en el círculo de cátodo (*cathode follower*), pues es una carga de baja impedancia. Si se usan transistores, el amplificador puede ser construido en un espacio muy pequeño.

El *sismógrafo* o péndulo mismo podría ser cualquiera. Sin embargo, su forma y tamaño están condicionados al tipo de transductor de acoplamiento.

Examinemos la posibilidad de acoplar capacitivamente un péndulo a un amplificador. La definición misma de capacidad,

$$C = \frac{Q}{E}$$

nos dice que la carga y la tensión eléctrica están relacionadas de modo lineal. Entonces es posible hacer un triodo que siga los movimientos de un péndulo, como si estuviera acoplado mecánicamente, siempre que el acoplamiento entre uno y otro sea capacitivo.

En la Fig. 1 tenemos un tal sistema. Un triodo T, que suponemos trabajando en la parte recta de su característica curva está acoplado a un péndulo P mediante una capacidad variable C, que se carga a un potencial constante V aplicado entre el péndulo y tierra (*retorno del cátodo*) de modo que la resistencia de escape de rejilla R cierra el circuito con una constante de tiempo RC.

Un desplazamiento angular Θ , del péndulo, producirá una variación dC de la capacidad C y el potencial de rejilla E_G se modificará según

$$V_1 = V \frac{dC}{C}$$

que se suma o se resta al potencial de rejilla, según la capacidad aumente o disminuya y según la polaridad de la batería que suministra el voltaje V.

Tenemos, así, el caso del micrófono condensador conocido por todos los ingenieros electrónicos, quienes saben por experiencia que este tipo de micrófono es de los que más fielmente convierten el sonido en corrientes eléctricas.

Si el triodo de la Fig. 1 está trabajando en la parte recta de la característica curva, las variaciones de la corriente de placa registradas por el miliamperímetro mA serán una reproducción fiel de las variaciones del potencial V_1 . Como este potencial es una medida de las variaciones de la capacidad C, lo será también de los desplazamientos del péndulo, porque —como está representado en la figura— para ángulos pequeños,

$$dC = k\Theta$$

donde K es una constante de proporcionalidad.

En primera aproximación se puede escribir

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC} q = \frac{V}{R} \left(1 - \frac{dC}{C}\right)$$

en la cual $R \frac{dq}{dt}$ es precisamente el voltaje V_1 , que es medible. De modo similar a lo que ocurre con un micrófono condensador,

$$\frac{dV_1}{dt} + \frac{1}{RC} V_1 = -Vk \frac{d\Theta}{dt}$$

pass the very low frequencies usual in Seismology. Of course, the galvanometer has to be coupled to the cathode circuit of the amplifier (*cathode follower*) since it represents a low impedance load. If transistors are used, the amplifier may indeed be very small.

The *seismometer* or pendulum proper could be anyone. Nevertheless, its for and size will be conditioned to the type of coupling transducer.

Let us see the possibility of capacitively coupling a pendulum to an amplifier. The definition of capacity,

says that the charge and the voltage are related by a linear equation. Then, it is possible to make a triode follow the motion of a pendulum as if both were mechanically coupled, provided the coupling is capacitive.

Fig. 1 shows such a coupling system. A triode T working in the straight part of its characteristic curve is coupled to a pendulum P by means of a variable capacity C, which is charged to a constant electrical potential V, and applied between the pendulum and ground (*cathode return*) in such a way that the grid resistance R closes the circuit with a time constant RC.

Any angular displacement Θ in the pendulum will produce a variation dC in the capacity C, and the grid bias E_G will vary according to

which will be added or subtracted to the grid bias when the capacity increases or decreases, and according to the battery polarity providing voltage V.

This is the case of the condenser microphone, as is well known by every electronic engineer. They know that this type of microphone faithfully reproduces sound, converting it into electric current.

If the triode is operating in the straight part of its characteristic curve, variation in the plate current as recorded by milliammeter mA will be a faithful reproduction of voltage variations in V_1 . This voltage, being a measure of variations of capacity in C, will also be a measure of pendulum displacements, because in small angles, as shown in the figure,

in which k is a proportionality constant.

As a first approximation we may write

where $R \frac{dq}{dt}$ is voltage V_1 , and can be measured. Similarly as in condenser microphone,

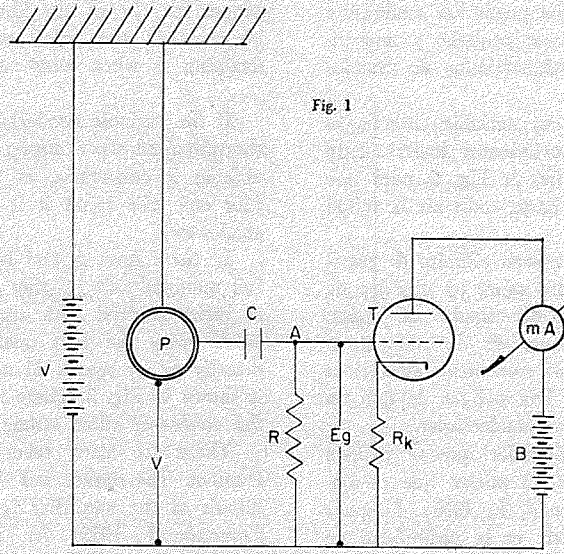
Esta ecuación es de una forma muy conocida en electrónica, pues corresponde a un acoplamiento simple por capacidad y demuestra que el circuito eléctrico transmitirá fielmente los movimientos mecánicos del péndulo, al menos en el caso que el período de los mismos no sobrepase mucho la constante de tiempo RC. (Para movimientos sinusoidales de pulsancia ω el rendimiento de la transmisión estaría dado por

This equation is very well known in electronics, since it corresponds to a simple capacitive coupling, and shows that the electric circuit will faithfully transmit the movements of the pendulum, at least in the case when their period is not much longer than the time constant RC. (For simple harmonic motion with a pulsance ω , the efficiency of the circuit transmission is given by

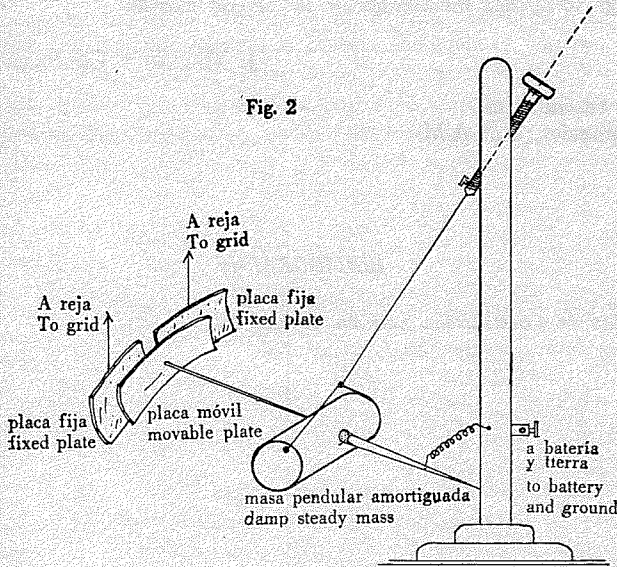
$$p = \frac{RC \omega}{\sqrt{1 + R_2^2 C_2^2 \omega^2}}$$

y es todavía del orden de 70% para el caso extremo cuando $\omega = 2 \pi RC$).

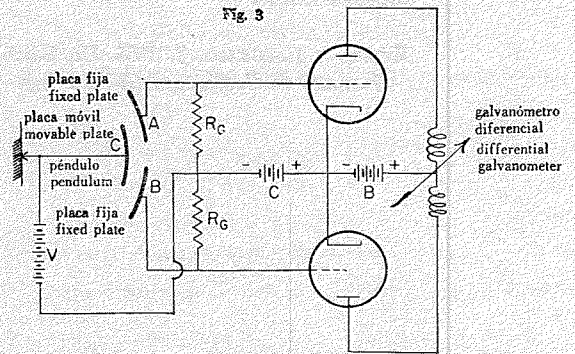
and still amounts to some 70% for the extreme case when $\omega = 2 \pi RC$).



PÉNDULO ACOPLADO A UN TRIODO
PENDULUM COUPLED TO A TRIODE



SISMÓGRAFO ACOPLADO CAPACITIVAMENTE (esquema)
CAPACITIVELY COUPLED SEISMOGRAPH (diagram)



AMPLIFICADOR PUSH-PULL ACOPLADO A UN SISMÓGRAFO
PUSH-PULL AMPLIFIER COUPLED TO A SEISMOGRAPH

Lo dicho anteriormente indica que nuestra ecuación simplificada es válida siempre que las variaciones de capacidad sean pequeñas, para que dC/C también lo sea. Sin embargo, un montaje en *push-pull* (simétrico) permitiría utilizar variaciones bastante grandes, hasta de 25% de la capacidad total, porque anula las armónicas pares y mantiene baja la distorsión.

Un sismógrafo electrostático, tal como se describe en principio en la Fig. 1, es fácilmente realizable y si el amortiguamiento del péndulo es lineal, sería un aparato muy fiel, pues no es otra cosa que un micrófono condensador para frecuencias muy bajas. Puede ocupar poco espacio y su costo de mantenimiento es relativamente bajo.

Un amplificador con acoplamiento directo, enteramente en *push-pull*, es muy sencillo de diseñar o puede encontrarse en cualquier libro de electrónica. El amplificador descrito en el artículo (Merino y Coronado, J., 1955) ya citado, puede adaptarse con facilidad a un acoplamiento capacitivo. El sismómetro mismo puede ser cualquiera y como el condensador variable puede hacerse pequeño y muy liviano, no se presentan problemas de amortiguamiento de grandes masas pendulares.

Tal como indica la Fig. 1, el condensador variable correría el riesgo de ponerse en corto circuito con movimientos fuertes. Esto se evita haciéndolo concéntrico, como lo indica la Fig. 2, para una entrada en *push-pull* (para entrada sencilla basta construir la mitad del condensador).

Los sectores A y B son secciones de un mismo cilindro de papel de aluminio, montadas una al lado de la otra sobre un cilindro de lucita. El sector C es también una sección de cilindro de lucita, concéntrico con el primero y sujeto al péndulo sea directamente o por medio de una palanca amplificadora. Las conexiones eléctricas se ilustran en la Fig. 3. En esta forma no hay peligro de que un movimiento fuerte ponga en corto circuito al condensador.

Hay muchos tipos de galvanómetro registrador que se pueden utilizar y el autor ha descrito uno de ellos, lo mismo que el amplificador correspondiente (Merino y Coronado, J., 1955). Después de todo, lo que es verdaderamente interesante es la posibilidad de construir aparatos acoplados linealmente (como si el acoplamiento fuera mecánico) y cuya amplificación puede ser extraordinariamente grande y además, variable de dos maneras independientes entre sí: por variación del voltaje de excitación, del condensador y por variación de la amplificación. Los tubos electrónicos actuales permiten trabajar los instrumentos sin interrupciones durante varios meses.

J. MERINO Y CORONADO

Instituto de
Geofísica, U.N.A.M.

What we have said shows that our simplified equation holds true when the variations in capacity are small in order that dC/C remains also small. Nevertheless, a *push-pull* circuit enables us to use comparatively large variations—up to 25% of total capacity—since it cancels the even harmonics and maintains distortion at a low level.

An electrostatic seismograph, as described in principle in Fig. 1, is easily built, and will be a very reliable instrument if the pendulum damping is linear, since it amounts to a condenser microphone for very low frequencies. Its size may be very small, and its cost of operation relatively low.

A directly coupled *push-pull* amplifier is very simple to design or may be found in any electronics book. The one described by the author in his article (Merino y Coronado, J., 1955) may be conveniently adapted for use to a capacitive coupling. The seismometer proper may be of any known type. As the variable condenser can be made in very small and light size, there are no problems of damping as when large steady masses are used.

If the variable condenser is made as shown in Fig. 1, it may be shortcircuited when strong shocks occur. This danger is avoided by making it concentric, as shown in Fig. 2 for a *push-pull* input (for one tube input it is only necessary to build one half of the condenser).

In the figure, A and B are sections of a cylinder of aluminium foil mounted side by side on a lucite cylinder. C is also a cylinder of lucite covered with aluminum foil, smaller and concentric (coaxial) with the first one. It is coupled to the pendulum either directly or by means of an amplifying lever. The electrical circuit is shown in Fig. 3. There is no danger in this way of shortcircuiting the condenser when strong shocks occur.

There are many recording galvanometers suitable for the instrument. The author has described how to make one, and also the circuit of the amplifier in the above mentioned article (Merino y Coronado, J., 1955). At any rate, what is really interesting is the possibility of building instruments with a linear coupling (as if mechanically coupled), and with a magnification that may be extraordinarily high, and also variable in two independent ways: by variations of the excitation voltage of the condenser, and by variation in electronic amplification. The electronic tubes last long enough to operate uninterruptedly for several months.

J. MERINO Y CORONADO

Institute of
Geophysics, U.N.A.M.

BIBLIOGRAFIA

MERINO Y CORONADO, J. 1955. Un Sismógrafo Electrónico de Construcción Sencilla. *Anales del Instituto de Geofísica*, I:63-77, 7 figs.

BIBLIOGRAPHY