

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISMÓGRAFOS

El instrumento más antiguo que se conoce utilizado para indicar la llegada de un movimiento sísmico es el *sismoscopio* inventado por el astrónomo chino Hang Chen, que data del año 132 d.C. (Figura 1); éste consistía en un jarrón adornado con ocho cabezas de dragones, cada uno sujetando una pequeña bola de bronce entre sus fauces, las que estaban distribuidas según la dirección de ocho puntos cardinales (N, S, E, O, NE, NO, SE, SO). Ante la ocurrencia de un terremoto, un mecanismo interno liberaba la bola que caía en la boca de uno de los sapos ubicado debajo de la cabeza; indicando, de manera aproximada, la dirección del sismo. Un péndulo interior era el encargado de accionar el mecanismo que liberaba la bola sujeta por el dragón.

El movimiento del terreno (flecha roja horizontal, Figura 1) desplaza el péndulo, liberando la bola sujeta por el dragón que es coincidente con la dirección del movimiento sísmico.



Figura 1: Sismoscopio inventado por el científico chino Hang Chen (Año 132 d.C.).

El principio del *sismoscopio* ideado por Hang Chen fue usado hasta el siglo XVIII en instrumentos europeos, como el construido en 1703 por el abate francés Jean de Hautefeuille (1647-1724). Éste consistía en un recipiente de madera (Figura 2), con una base circular de aproximadamente 12 centímetros de diámetro colocada en el centro de un pedestal; en su parte superior contenía mercurio con ocho pequeñas ranuras en su borde, cuatro en correspondencia con los cuatro puntos cardinales y cuatro en puntos intermedios. Debajo de cada una de estas canaletas estaban colocados ocho envases pequeños que, fijados a la base, eran utilizados para recoger el mercurio que se vertía ante un movimiento sísmico.



Figura 2: Sismoscopio construido en 1703 por el abate francés, físico e inventor, Jean de Hautefeuille (1647-1724).

Estos instrumentos proporcionaban una evidencia visible de la ocurrencia de un evento sísmico, pero solamente indicaban la dirección aproximada en la que se había originado el terremoto; si bien detectaban los terremotos y su procedencia, no eran capaces de realizar un registro continuo de la onda sísmica en sí.

SISMÓMETROS y SISMÓGRAFOS

Se denominan **sismómetros** a los instrumentos diseñados para medir el *movimiento* de la Tierra en una dirección dada. Dependiendo del tipo de sismómetro estos podrán responder al movimiento vertical u horizontal de la perturbación.

Por su parte los **sismógrafos** son equipos conformados por un instrumento que detecta el movimiento del terreno debido a un sismo (*sismómetro*), y por un sistema que realiza el registro del mismo en función continua del tiempo. Esta invención se da recién a fines del siglo XIX.

SISMÓGRAFO MECÁNICO

Un esquema simplificado de un *sismógrafo mecánico* está ilustrado en la Figura 3. Una *base* anclada al suelo, una *pesa* sujeta a un resorte, y un *sistema de registro* conformado por una banda de papel arrollado a un tambor solidario a la base, que gira a velocidad constante, y un marcador sujeta a la pesa.

Un movimiento del terreno hacia arriba generará el desplazamiento de la base junto con el tambor en la misma dirección; por el *principio de inercia* la pesa permanecerá en su posición original y registrará el movimiento sobre la banda de papel hacia abajo.

En este caso, el movimiento relativo entre la masa (pesa) y la base se ve registrado en la traza obtenida sobre el tambor, proporcionando una medida del movimiento *vertical* de la tierra.

El movimiento vertical del suelo, detectado durante el paso de una onda sísmica, es transmitido directamente a la carcasa, pero no así a la masa ni a la pluma debido al principio de inercia, esto hace que se mantengan estacionarios ante el movimiento de la carcasa.

Posteriormente cuando la masa salga del reposo, tenderá a oscilar. Esta posterior oscilación del péndulo no refleja el verdadero movimiento del terreno, por lo que resulta necesario amortiguarla.

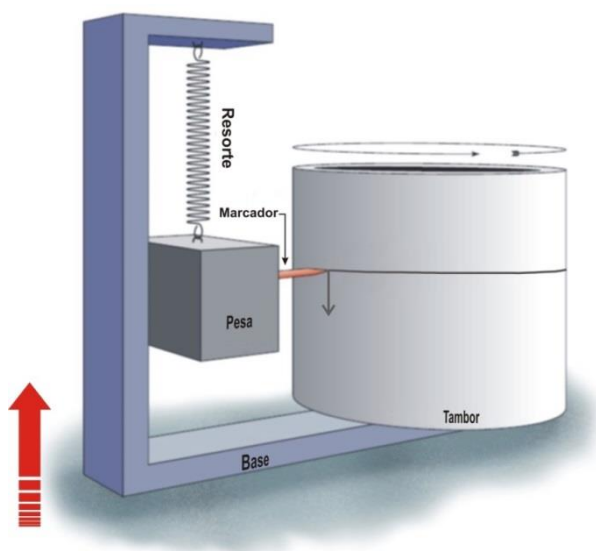


Figura 3: Esquema simplificado de un sismógrafo mecánico.

El instrumento hasta aquí descrito mide la componente vertical del movimiento del suelo y se conoce como *sismógrafo de la componente vertical*, y el papel donde se imprime la traza del movimiento se conoce como *sismograma*.

- **Principio de inercia**

En Física, *la inercia* es la propiedad que tienen todos los cuerpos de permanecer en su estado de reposo si están en reposo; o bien en movimiento si están en movimiento.

El *principio de inercia* establece que todos los cuerpos tienen una resistencia al movimiento, o a variar su velocidad (1ª ley de Newton), con lo cual el movimiento del suelo puede ser medido con respecto a la posición de una masa suspendida por un elemento que le permita permanecer en reposo por algunos instantes con respecto al suelo.

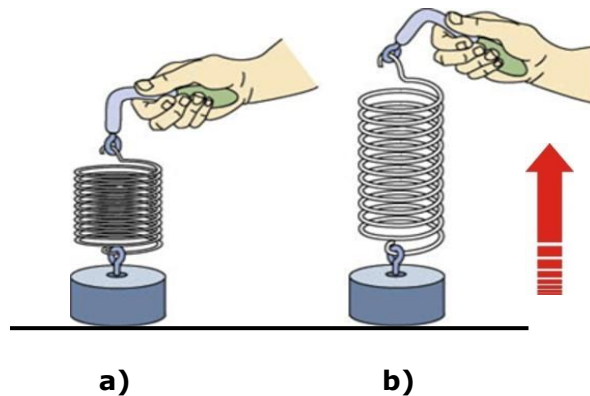


Figura 4: Sistema masa-resorte. **a)** Sostenimiento firme: Masa en reposo.

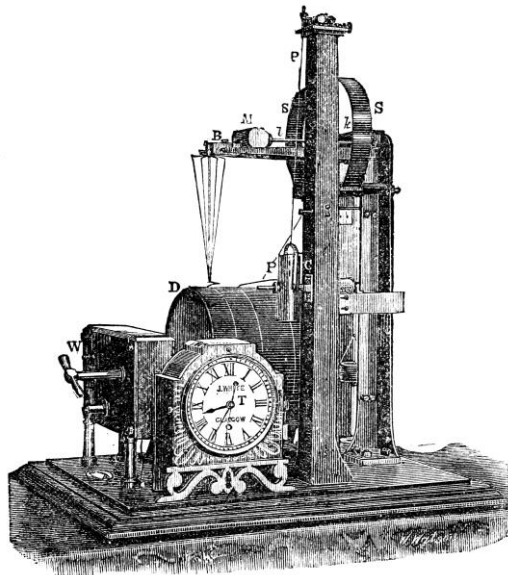
b) Movimiento brusco hacia arriba, la inercia del sistema evita que la masa se mueva, en su lugar se estira el resorte.

Este mecanismo se puede observar en una masa suspendida de un resorte, como se ilustra en la Figura 4. Un movimiento brusco hacia arriba del resorte no se verá reflejado en la posición de la masa debido al principio de inercia, permaneciendo ésta en su posición original.

Un importante adelanto se produce en 1880 partir del desarrollo de un sismógrafo de péndulo horizontal que, por primera vez, permite detectar diferentes tipos de ondas sísmicas y estimar sus velocidades, este avance fue debido al trabajo de los científicos británicos Sir James Alfred Ewing (1855-1935), Thomas Gray (1850-1908) y John Milne (1850-1913).

Este sismógrafo consistía en un péndulo con una aguja que estaba suspendida sobre una plancha de cristal ahumado donde se imprimía la traza del sismo, fue el primer instrumento utilizado en sismología que permitía discernir entre las ondas primarias y secundarias.

Estos primeros sismógrafos carecían de amortiguamiento, lo cual limitaba su respuesta a solamente una banda de frecuencias sísmicas, es decir que no todas las frecuencias presentes en la onda se lograban registrar, incluso fuertes movimientos sísmicos podían llevar al instrumento a la resonancia.



a)



b)

Figura 5: a) Ilustración del sismógrafo Milne publicada en la revista "The Popular Scieny Monthly", Vol XXIX, mayo a octubre 1886. New York. D. Appleton and Company.

b) Sismógrafo Milne (1880). Museo Victoria-Australia.

Otro gran avance se da en 1898 con el desarrollo, por parte del sismólogo alemán Emil Wiechert (1861-1928), al construir un sismógrafo mecánico utilizando como sensor un péndulo invertido (Figura 6), con una articulación en su base (tipo cardan) que le permitía oscilar en cualquier dirección horizontal, incluyendo por primera vez un amortiguamiento viscoso. El movimiento relativo de la masa respecto al suelo se resolvía a dos componentes horizontales perpendiculares entre sí, logrando por primera vez una gran eficiencia en el registro de los sismos en toda su duración. Estos primeros equipos eran extremadamente voluminosos y pesados, lo que limitaba severamente su utilización.



Figura 6: Péndulo invertido.

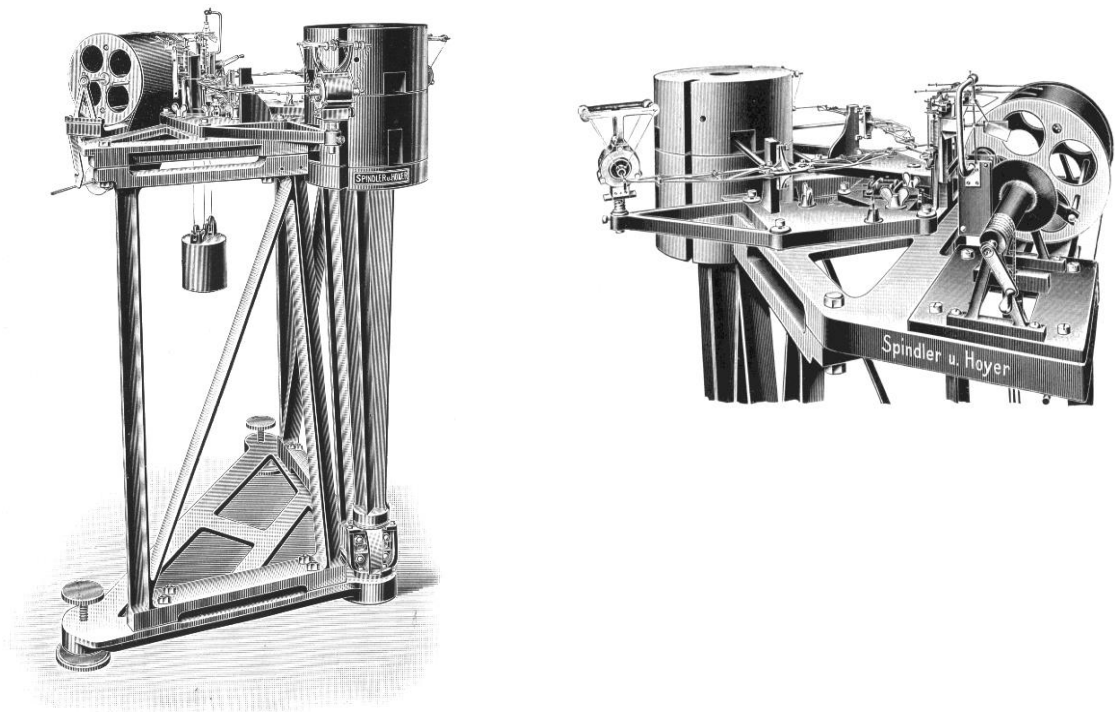


Figura 7: Sismógrafo Wiechert con registro de las dos componentes horizontales. Ilustraciones publicadas en 1910 en el Catálogo "SEISMOGRAPHEN" de la empresa "Spindler & Hoyer" (Göttingen - Alemania).



Figura 8: Sismógrafo horizontal Wiechert. Museo de Geofísica (UNAM) – México. Masa del péndulo: 80 kg.

SISMÓMETRO ELECTROMAGNÉTICO

En 1906 el físico ruso Boris Galitzin (1862–1916), considerado el padre de la sismología moderna, desarrolla el primer sismógrafo electromagnético.

Este sismómetro se basa en el *principio electromagnético*, a partir del cual se obtiene una señal eléctrica que resulta proporcional a la *velocidad* del terreno debido a un movimiento sísmico. Esta señal eléctrica, obtenida del movimiento de las ondas sísmicas, produce en un galvanómetro el desvío de un haz de luz que incide sobre un papel fotográfico para obtener el registro del sismo, llegando a obtener amplificaciones del orden de 1.000 veces para períodos de 12 segundos.

Los sismómetros Galitzin son el comienzo de los desarrollos posteriores que condujeron a los equipos modernos actuales, compuestos en su mayor parte de instrumentos que combinan electromagnetismo (una pequeña masa y un imán) y electrónica.

Este método eléctrico permitió un importante avance ya que ahora el registro de la onda sísmica se encuentra aislado del sismómetro que lo detecta.

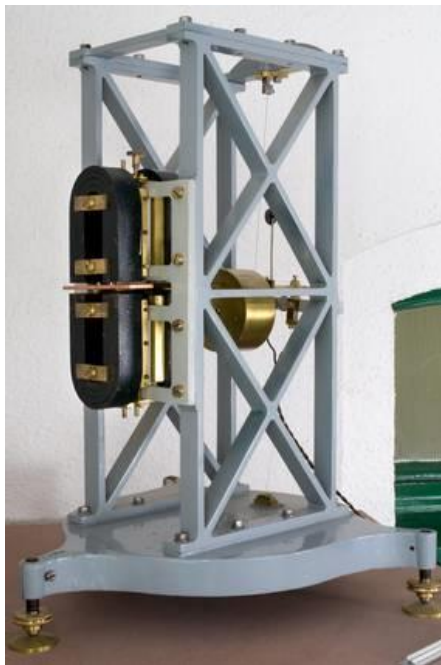


Figura 9: Sismómetros Galitzin (1910). Izquierda: Sismómetro horizontal. Derecha: Sismómetro vertical. Museo de Sismología (Jardins de l'Université). Estrasburgo – Francia.

- **Inducción electromagnética**

La *inducción electromagnética* fue descubierta en 1830, casi simultáneamente y de manera independiente, por el físico-químico inglés Michael Faraday y por el físico estadounidense Joseph Henry. Los experimentos de Faraday y Henry mostraron que un campo magnético variable produce en un circuito cerrado próximo una *corriente eléctrica inducida*. Los resultados concordantes de las experiencias de ambos físicos se resumen en un enunciado que se conoce comúnmente como *ley de Faraday*.

La *ley de Faraday* establece que las variaciones de un flujo magnético a través de un circuito cerrado generan electricidad (tensión y corriente). En otras palabras, la energía eléctrica inducida es proporcional a las *variaciones del flujo magnético*, por lo que si la variación del flujo magnético es mayor, mayor será la electricidad generada; de igual manera si el circuito eléctrico cerrado posee más vueltas (espiras) produce mayor tensión. A su vez, la corriente inducida cambia al cambiar el sentido del movimiento.

Para explicar la ley se empleará una bobina de cobre y un imán en movimiento, como se ilustra en la Figura 10. El circuito de las bobinas se cierra con un amperímetro (A), que será utilizado para medir la corriente que se genera. Un imán permanente tiene un campo magnético a su alrededor que consiste en líneas de fuerza o líneas de flujo Φ , que van desde el polo norte (N) hasta el polo sur (S). Al moverse el imán con relación a la bobina de alambre, se van cortando las líneas de flujo del campo magnético, lo cual induce una corriente a través de la bobina.

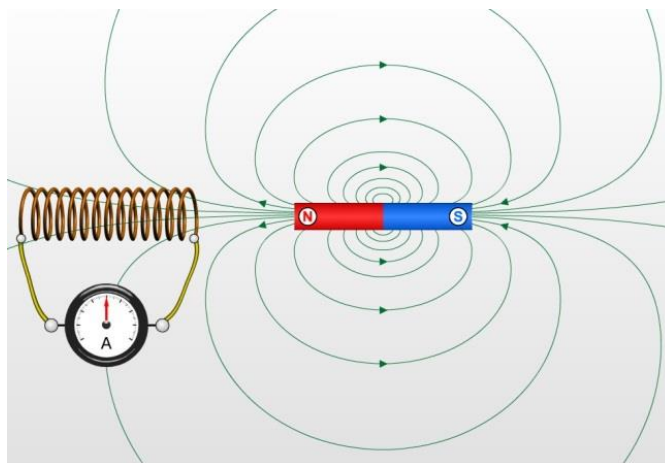


Figura 10: Bobina de cobre dentro del campo magnético de un imán.

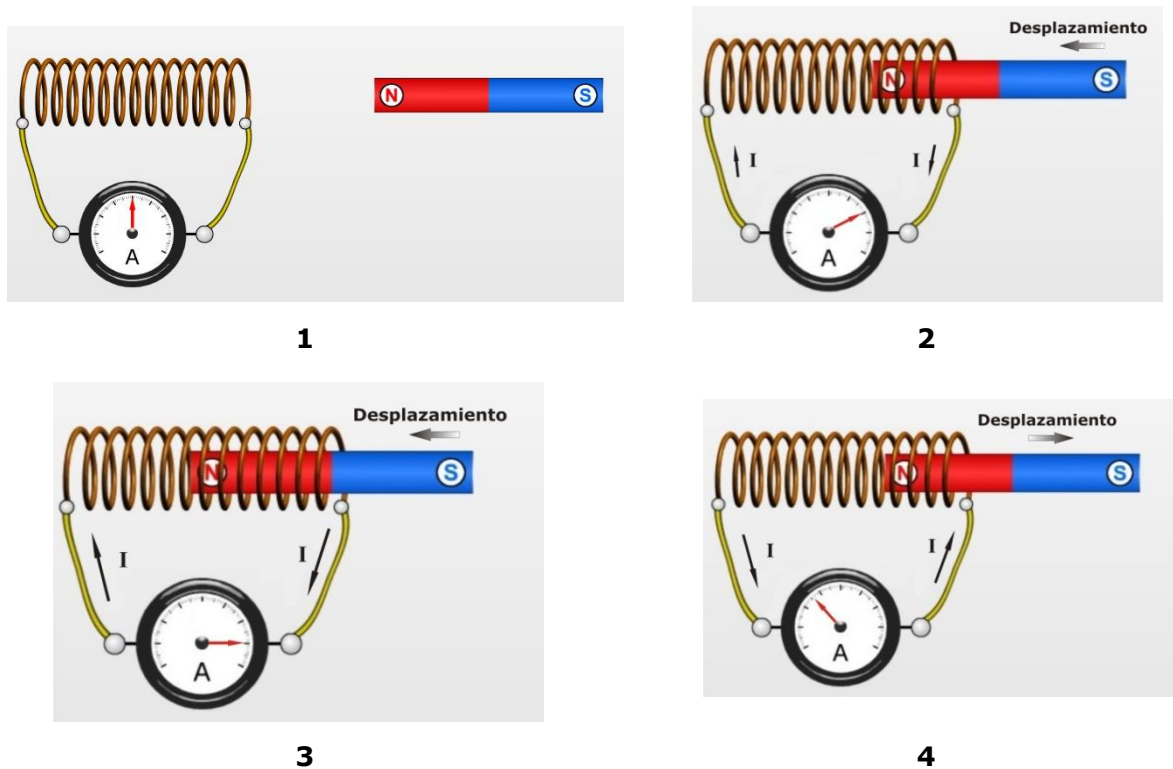


Figura 11: Movimientos de una bobina de cobre dentro del campo magnético de un imán.

El desplazamiento del imán en un sentido y en otro (Figura 11) generará electricidad, debido a las siguientes razones:

Mientras el imán permanece fijo (1) no existe variación alguna, por lo tanto no hay inducción; pero cuando está en movimiento la aguja del amperímetro (A) se desvía de un lugar a otro, indicando la existencia de una corriente eléctrica inducida (I), y en consecuencia la existencia de una tensión inducida en el circuito cerrado, formado por las espiras y el amperímetro; de igual manera si el imán se mantiene estacionario y la espira se mueve ya sea acercándose o alejándose del imán, la aguja también se desviará, indicando corriente inducida.

En la Figura 11-2 y 11-3 la corriente I tiene el mismo sentido de circulación debido a que el desplazamiento del imán es hacia la bobina, en la Figura 11-3 la corriente I es mayor (indicada en el amperímetro A) ya que la bobina corta más líneas del campo magnético que en Figura 11-2. Por otra parte, en la Figura 11-4 la corriente cambia de sentido porque ahora el desplazamiento del imán es en sentido contrario.

A partir de estas observaciones, se puede concluir que en un circuito cerrado se genera una corriente cuando existe un desplazamiento relativo entre un imán y una espira. Obsérvese que no existen baterías en ninguna parte del circuito.

- **Funcionamiento del sismómetro electromagnético**

El *sismómetro electromagnético* utiliza el principio de la inducción magnética y responde al movimiento relativo entre un bobinado de alambre y un imán. Uno de estos elementos se encuentra fijado a la carcasa del instrumento, y por lo tanto al suelo. El otro está suspendido por un resorte y forma el elemento de inercia.

Hay dos diseños básicos posibles: 1) En el tipo de imán móvil, la bobina está fijada a la carcasa y el imán es inercial, y 2) En el tipo de bobina móvil los roles están invertidos como el de la Figura 12, el imán está solidario a la carcasa y la bobina es el elemento que oscila.

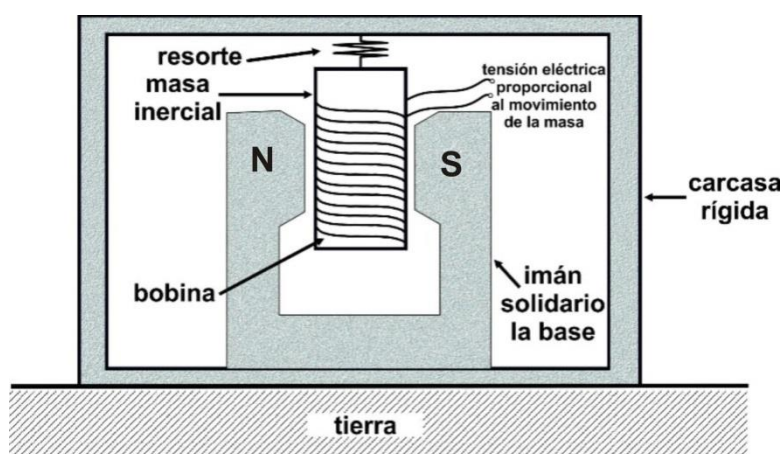


Figura 12: Diagrama esquemático que ilustra el principio de funcionamiento de un sismómetro electromagnético de movimiento vertical a bobina móvil.

En la Figura 12, una bobina de alambre solidaria a la masa inercial suspendida por un resorte, oscila entre los polos de un poderoso imán. Cualquier movimiento de la bobina dentro del campo magnético induce una tensión en la bobina que será proporcional a la velocidad de variación del flujo magnético.

Durante el arribo de una señal sísmica el movimiento de la Tierra respecto a la masa se convierte en una tensión eléctrica debido a la inducción en la bobina, esa tensión es posteriormente amplificada y transmitida por un circuito eléctrico al sistema de registro. En los primeros instrumentos, el registro se efectuaba por medio de una pluma o estilete y se inscribía sobre un papel ahumado colocado sobre un tambor giratorio, posteriormente se introdujo la inscripción sobre papel fotográfico a partir de un haz de luz reflejado que reproducía el movimiento de la masa, luego se incorporó el papel termosensible, y en la actualidad el registro se realiza digitalmente y se almacena en un disco rígido.

La Figura 13 ilustra el interior del sismómetro S-13 (Teledyne-Geotech) desarrollado en la década del 60; posee una frecuencia natural de oscilación vertical de 1Hz, con una masa (imán) de 5Kg suspendida por tres resortes, la bobina transductora oscila en el interior del imán, y en ella se genera la tensión proporcional al movimiento del terreno.

En la actualidad (2017) estos instrumentos han alcanzado un alto grado de desarrollo electrónico, pero el principio básico de funcionamiento no ha cambiado; los nuevos instrumentos registran simultáneamente las tres componentes del movimiento del suelo, con un amplio ancho de banda frecuencial, y el registro de las señales se realiza digitalmente en dispositivos de memoria sólida.

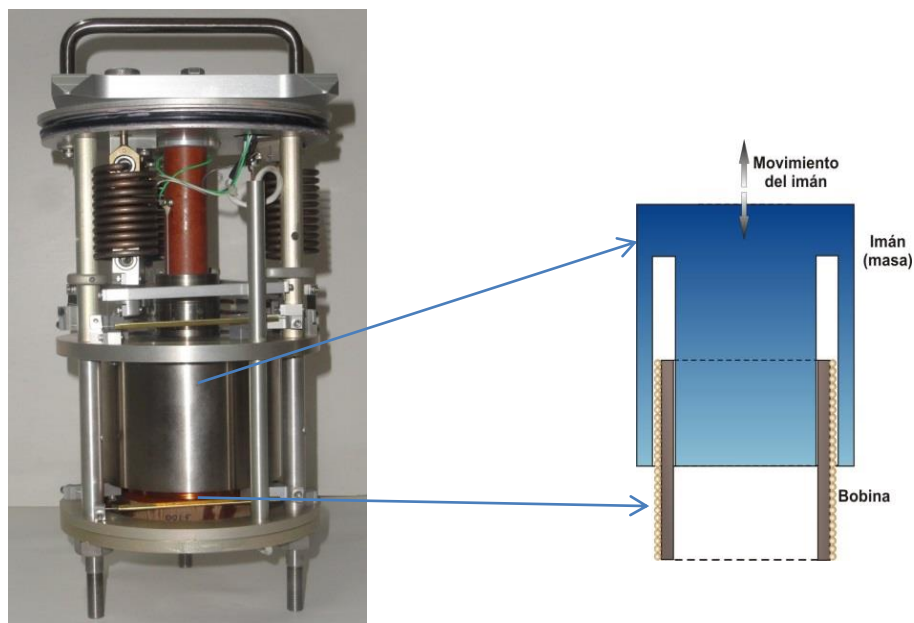


Figura 13: Sismómetro electromagnético S-13 (Teledyne-Geotech) a imán móvil. Masa 5 kg. Período natural de oscilación 1Hz.

BIBLIOGRAFÍA

DEWEY J., BYERLY P. "The history of seismometry to 1900": Earthquake Information Bulletin (USGS), v. 11, iss. 2. 1979.

DUNCAN CARR Agnew. IASPEI "International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology". Chapter One: "History of Seismology". Edited by William H.K. Lee, Hiroo Kanamori, Paul Jennings, Carl Kisslinger. Academic Press (2002)

ESPÍNDOLA J. M., Jimenez, Z. "Terremotos y ondas sísmicas". Una breve introducción. Cuaderno N° 1. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 1994
<https://books.google.com.ar/books?id=dImOiZYrpgAC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

LOWRIE William. "Fundamentals of Geophysics". Swiss Federal Institute of Technology Zürich. Cambridge University Press. 2ª edición. New York October 2007

CIBERGRAFÍA

Encyclopædia Britannica

<https://www.britannica.com/science/seismograph>

IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology)

http://www.iris.edu/hq/files/publications/brochures_onepagers/doc/SP_1pager_7.pdf

Science in School. The European journal for science teachers.

<http://www.scienceinschool.org/print/4024>

USGS (United States Geological Survey)

<https://earthquake.usgs.gov/learn/eqmonitoring/eq-mon-6.php>