El sensor sismológico: geófono

Por: Rommel Contreras
rommel@udo.edu.ve

Un sensor sísmico es un instrumento para medir el movimiento del suelo cuando su estabilidad ha sido perturbada. El sensor sísmico (sismómetro o geófono) debe suministrar una variable física cinemática relacionada con el movimiento del suelo (desplazamiento, velocidad o aceleración).

Medir el movimiento de la tierra en un punto de su superficie con respecto a ese mismo punto (sin perturbar la medición), no es tarea fácil; por ello, el sensor sísmico es el elemento más crítico y costoso del sistema de medición (el sismógrafo: el sismómetro y la unidad de almacenamiento).

Esos instrumentos sensorios deben cubrir un amplio rango dinámico, los movimientos más pequeños del suelo pueden llegar a ser tan sólo de unas décima de nanómetros, mientras que la ruptura de una falla puede ocasionar desplazamientos de una decena de metros (un rango dinámico de $10/10^{-10} = 10^{11}$). Esta variabilidad dinámica, representa un rango demasiado amplio para cubrir con un sensor de construcción estándar (utilizando las técnicas actuales). La sensibilidad del instrumento además será perturbada por el ruido de fondo natural micro sísmico que tiene una alta dependencia de la frecuencia. La banda de frecuencia para estudios sismológicos se considera que oscila en un rango de 0,00001 Hz hasta 1000 Hz (ver tabla).

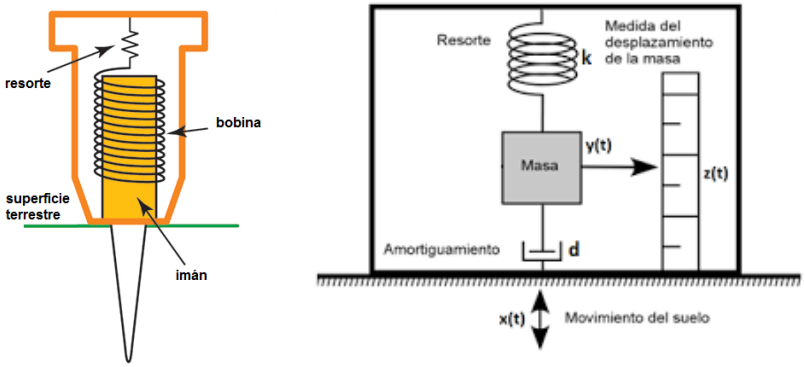
Frecuencias típicas generadas por diversas fuentes sísmicas.

Frecuencia (Hz)	**Tipo de medida**
0.00001-0.0001	Mareas de la corteza terrestre
0.0001-0.001	Oscilaciones libres de la tierra; terremotos
0.001-0.01	Ondas superficiales; terremotos
0.01-0.1	Ondas superficiales, ondas P y S; terremotos con M > 6
0.1-10	Ondas P y S; terremotos con M> 2
10-1000	Ondas P y S; terremotos con M< 2

Dado que las mediciones sismológicas se realizan en un marco de referencia inercial en movimiento (la superficie de la Tierra), casi todos los sensores se basan en la inercia de una masa suspendida oscilante (un péndulo), que tenderá a permanecer en estado estacionario en respuesta a movimientos externos. El movimiento relativo entre esa masa suspendida y el suelo será función del movimiento de la tierra. Si la frecuencia de desplazamiento del terreno está cerca de la frecuencia de resonancia, se obtiene un movimiento relativo mayor (dependiendo del amortiguamiento); por debajo de la frecuencia de resonancia el desplazamiento relativo disminuye.

El reto en la construcción de instrumentos sísmicos, consiste en que tanto los sensores como los grabadores (en nuestro caso el *datalogger*) deben tener la potencialidad de cubrir un amplio dominio de frecuencias y un amplio rango dinámico. Los valores extremos antes señalados no eximen que una estación para estudios sismológicos locales y globales, deba cubrir al menos la banda de frecuencia de 0,01 a 100 Hz, para tener la potencialidad de detectar movimientos de tierra desde 1 nm hasta 10 mm. Esa banda de frecuencia es aún imposible de resolver con un solo tipo de instrumento, pero se tiende a la fabricación de costosos instrumentos con rangos dinámicos y de frecuencia relativamente grande (los llamados sensores de banda ancha (BB) o banda muy ancha (VBB). Sin embargo, aun podemos continuar haciendo ciencia con los clásicos instrumentos de corto período (SP), largo período (LP) o con los de movimientos fuertes (SM).

El modelado de un sismómetro simple invita a suponer el sistema como una masa suspendida de un resorte, con un amortiguamiento para evitar las oscilaciones excesivas cerca de la frecuencia de resonancia del sistema. Si nominamos la constante de rigidez del resorte como ***k*** expresada en [N/m], y la constante de fricción viscosa del amortiguador como **d** en [N.s/m], el movimiento del suelo en función del tiempo como *x*(t), el movimiento absoluto de la masa como **y**(t), el sistema estaría representado de acuerdo al diagrama siguiente:



Haciendo las consideraciones antes indicadas, el desplazamiento directo de la tierra estaría representado por el desplazamiento relativo entre la masa y la tierra: $z_t = y_t - x_t$; téngase presente que estamos analizando un sistema armónico ($x_t = A.\operatorname{sen} w.t$). Se observa que si el suelo se mueve hacia arriba de manera impulsiva, la masa se "mueve" hacia abajo, movimiento verificable mediante la escala graduada en la regla del diagrama, así que hay un desfase de valor π (o 180°) en la medida obtenida por el desplazamiento del suelo. Del mismo modo, si el suelo se mueve con un movimiento sinusoidal muy rápido, uno esperaría que la masa se mantuviera inmóvil y con ello el movimiento sinusoidal del suelo se puede medir directamente en la regla graduada; la amplitud de la medida reflejada en la regla sería directamente equivalente a la amplitud del movimiento de la tierra, por lo que el sismómetro de nuestro sistema tendría una ganancia de 1. Podemos decir que el sismómetro mide el desplazamiento relativo directamente a altas frecuencias y que la función de respuesta del sismómetro (movimiento de la masa en relación con el movimiento de tierra) es plana bajo esa condición; pero hay que tener presente que el desplazamiento de fase también es π para este caso.

Cuando el suelo se mueve muy lentamente (a bajas o muy bajas frecuencias), la masa tendría tiempo para acompañar y seguir el movimiento del suelo, el movimiento relativo y el cambio de fase sería menor; por lo que la ganancia disminuiría (<1). En el caso de que la masa entre en resonancia (suponiendo una baja amortiguación), la masa podría conseguir mayor energía para moverse en el momento exacto de un nuevo impulso terrestre, por lo que se movería cada vez con una amplitud mayor; en ese caso la ganancia aumentaría (>1); los nuevos impulsos de la tierra ocurrirían cuando la masa se encuentre en los extremos de la amplitud de su movimiento, por lo que el valor del desfase sería -π/2.

Considerando la constante del resorte ***k*** y la masa inercial ***m***, podemos expresar la frecuencia de resonancia del sistema ($\boldsymbol{f}_0$), como:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

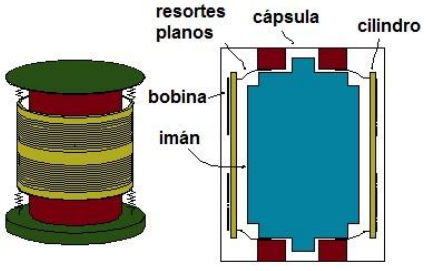
La cinemática y la dinámica del sistema armónico suelo-masa-resorte es está explicada en términos diferenciales por:

$$M\frac{d^2(z(t)+x(t))}{dt^2} + d\frac{dz(t)}{dt} + k.z(t) = 0$$

Y descrita por el conjunto de ecuaciones siguientes:

$F_{masa} = F_{amortiguamiento} + F_{resorte}$	$F_{masa} = m.a$	$F_{resorte} = -k.z$
$F_{amortiguamiento} = -d.v_z$	$F_{resorte} = -k.z$	$\frac{dz}{dt} = v_z$
$\frac{dv_z}{dt} = a_z$	$a_z = w^2\,\mathrm{sen}(w.t + \pi)$	$a = a_z + a_x$
parametros: m, k, d, w, a_x **variables de estado**: z, v **variables algebráicas**: $a, a_z, F_{masa}, F_{amortiguación}, F_{resorte}$		

Los sismólogos prefieren monitorear los débiles movimientos de desplazamientos o las pequeñas velocidades que adquieren las partículas en movimiento para facilitarse la interpretación de las fases sísmicas, mientras que los ingenieros utilizan las fuertes indicaciones asociadas a la aceleración, cuyos valores picos están directamente relacionados con el diseño y estabilidad de las estructuras. Los sistemas de conversión análogo/digital (A/D) y el consecuente almacenamiento digital de los datos, hacen posible ejecutar rápidamente las rutinas de cálculo y filtrado para la conversión de esos datos en el parámetro específico que se requiera (aceleración, velocidad, o desplazamiento).



Sismómetro tipo SM-6

Los sismómetros son más grandes que los geófonos y, a menudo más complejos, pero el diseño interno de ambos tipos de sensores se basa en principios similares. El concepto básico está representado por un resorte del cual se suspende una bobina de alambre (en sustitución de la "masa" del diagrama anterior) que rodea un fuerte imán acoplada a la tierra. Las perturbaciones sísmicas mueven al imán al compás del movimiento del suelo, mientras que la bobina de alambre permanece relativamente inmóvil: de esta manera dentro del geófono se verifica la ley de inducción electromagnética de Faraday, que describe la relación entre la corriente

cambiante que fluye en un conductor y el campo magnético que lo perturba. Considerando el caso general, es un circuito formado por una bobina de N espiras de igual radio, si Φ_B es un flujo magnético que atraviesa las espira, se genera una fuerza electro motriz (f.e.m.) inducida en cada una de las espiras; que se suman al estar conectadas todas ellas en serie. La ley de Faraday explica la f.e.m. inducida como una función proporcional al cambio del flujo magnético a través de dichas N espiras; por lo que para una bobina se expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

El significado del signo menos se explica por la ley de Lenz, que señala que la corriente inducida tiende a impedir que el flujo magnético cambie, lo que es una consecuencia de la ley de Conservación de la Energía (y también verifica el comportamiento del desfase en la respuesta del sistema masa-resorte explicado anteriormente).

El cambio del flujo magnético puede efectuarse de diversas maneras, y se explica en forma genérica para una espira de superficie **A**, dentro de un campo magnético uniforme **B**; donde el flujo magnético esta expresado por B.A.cosΘ y la f.e.m. inducida es una función armónica:

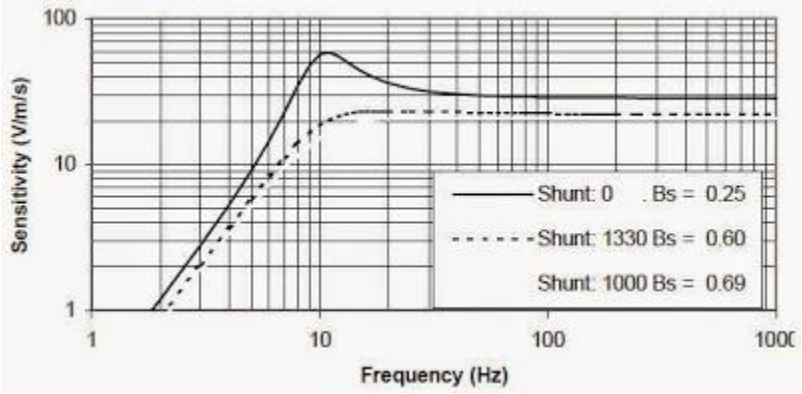
$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(B * Acos\Theta)$$

De donde se deduce que se inducirá una f.e.m. en el circuito de las espiras, si: La magnitud de **B** varía con el tiempo, el área de la espira cambia con el tiempo, el ángulo Θ entre **B** y **A** (normal a la espira) cambia con el transcurso del tiempo, o cualquier combinación de las anteriores. En todo caso la generación de una f.e.m. en los extremos terminales de la bobina requiere de un cambio en el flujo magnético: por ello, la señal o salida física de un sensor sísmico con la naturaleza descrita, es siempre una tensión variable. Es posible relacionar una corriente inducida en una espira como un campo eléctrico que debe ser tangente a la espira, resultado del flujo magnético cambiante. Incluso en ausencia de una espira conductora, un campo magnético cambiante generaría de todas maneras un campo eléctrico en el vacío.

Debido a su principio de funcionamiento y construcción, el geófono presenta varias ventajas: el elemento sensor es robusto y económico, es un sensor pasivo que no requiere ningún tipo de alimentación (fuente de voltaje); y si está bien diseñado, tendrá excelente linealidad y una amplia gama de respuesta dinámica. Se ha estandarizado el uso de dos bobinas en acoplamiento diferencial, por lo que en ausencia de algún elemento activo (que pueda introducir potencial adicional

como ruido u *offset*), el sensor tiene un nivel de ruido normalmente bajo. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes que complican su uso y operación: la limitada extensión de movimiento del elemento móvil y la estrecha respuesta de frecuencias. El movimiento de la bobina está restringido a unos pocos milímetros y debido a que ésta se encuentra suspendida por un sistema de resortes, las propiedades del sistema y la respuesta del sensor se alteran en la vecindad de la frecuencia natural del sistema.

La frecuencia natural de un geófono típico varía entre 4-14 Hz, por encima de su frecuencia natural de oscilación el geófono se comporta de acuerdo a las especificaciones del fabricante, pero por debajo de ella opera pobremente. Los sensores sísmicos con períodos alrededor de 1 a 2 Hz, son diseñados para detectar eventos regionales o locales; ellos no están diseñados para registras sismos distantes (telesismos). Para registrar eventos muy distantes, se requieren sensores de largo período o un sensor de banda ancha (BB o VBB). Los sensores con períodos de 5,5 Hz o superiores, son principalmente usados para estudios estructurales, geológicos o petroleros.



Curvas características de sensibilidad/frecuencia de un geófono SM-6: a una frecuencia de 8 Hz tiene una sensibilidad máxima de 28,8 V/m/s (los *shunt* o resistencias R_d compensan las alteraciones y el amortiguamiento en la vecindad de la frecuencia de resonancia del geófono).

Como el voltaje inducido es proporcional a la velocidad relativa: podemos resumir al geófono como un elemento sensor para medir la velocidad absoluta de las estructuras por encima de su frecuencia de vibración natural.

Nota: Gran parte de la información fue tomada, traducida y adaptada de: Instrumentation In Earthquake Seismology (Modern Approaches In Geophysics) - Jens Havskov, Gerardo Alguacil, Springer (2006), otras consultas bibliográficas son de Internet y de artículos de este mismo blog: **La bobina de Rogowski**, etc.