

6. Instrumentación para campo cercano y análisis de acelerogramas

ANTONI M. ROCA
Servei Geològic de Catalunya

1. INTRODUCCION

Registrar y analizar el movimiento producido por terremotos en la región donde daños y efectos observables son mayores es un objetivo de enorme interés, tanto para la sismología como para la ingeniería sísmica. Para la ingeniería, estos registros son los que permiten fijar las características del movimiento al cual son sometidas las edificaciones durante un terremoto; y éste es el dato inicial necesario para el diseño de edificios sismorresistentes. También el efecto de diferentes tipos de suelo durante un terremoto es un fenómeno que urge observar empíricamente.

Para la sismología, el principal interés en la obtención y análisis de registros de movimiento intenso reside en el hecho de que éstos contienen la mayor cantidad de información sobre el mecanismo del terremoto.

En las próximas páginas nos ocuparemos del tema de la instrumentación sísmica y del análisis de los registros obtenidos en esta zona de interés que es el campo cercano. Comentaremos, en primer lugar, algunas de las características propias de este denominado campo «cercano».

Un terremoto se produce por una ruptura súbita del equilibrio elástico de una región del interior de la tierra. La ruptura ocurre en una superficie de contacto más o menos compleja, a partir de la cual se propagan las ondas que originan la vibración en superficie.

Cuando se estudia esta vibración en una zona lo suficientemente alejada del epicentro (registro en el campo lejano) las dimensiones de la fuente se pueden despreciar, siendo una buena aproximación considerar un foco puntual generador de las ondas sísmicas. Las diferentes llegadas que se obtienen en los registros corresponden a distintos tipos de ondas elásticas (compresionales o de cizalla) y a diferentes trayectorias y polarizaciones de las mismas.

No obstante, cuando nos acercamos a la región epicentral campo próximo, donde los movimientos en superficie son más intensos— la hipótesis de foco puntual es totalmente inconsistente a la hora de analizar los registros. La distancia de la superficie de fractura al punto de observación está dentro del orden de magnitud de las dimensiones mismas de la fractura. El registro que se obtiene en el punto de observación es una superposición de diferentes tipos de ondas procedentes de distintos puntos de la fractura, siendo su interpretación en este sentido más compleja que la de un sismograma intermedio o lejano.

Por otra parte, en el campo cercano, tiene gran interés, como hemos dicho antes, registrar el movimiento producido en diferentes tipos de suelo y en edificaciones, con objeto de conocer su respuesta frente a excitaciones sísmicas.

Las diferencias en el tipo de movimiento a registrar, en el campo cercano con respecto al campo lejano, exigen lógicamente instrumentos de distintas características, fijadas principalmente por los siguientes factores: *a)* intensidad de las vibraciones, *b)* rango de frecuencias y *c)* períodos de retorno de los eventos:

a) La vibración del suelo (o de una estructura) en un punto puede caracterizarse por la historia temporal del desplazamiento $z(t)$, de la velocidad $\dot{z}(t)$ o de la aceleración $\ddot{z}(t)$. Los sismógrafos para estudios de microsismicidad o de sismicidad regional o global registran velocidades o desplazamientos. Los instrumentos de registro de movimientos intensos en el campo próximo son normalmente acelerógrafos. Estos registran aceleraciones y no desplazamientos por dos razones fundamentales:

— Una vibración de 0.2 g a una frecuencia de 2 Hz corresponde a un desplazamiento máximo de unos 1.2 cm; una vibración de 0.5 g a 1 Hz produciría un desplazamiento de 12 cm; en cambio, en frecuencias altas, estos valores de aceleración corresponderían a desplazamientos muy pequeños. Un registro de desplazamiento exigiría la utilización de instrumentos de rango dinámico muy grande.

— Es, generalmente, más fácil obtener velocidades y desplazamientos a partir de registros de aceleración (integración numérica), que efectuar el proceso inverso de derivación.

b) Cuando se observa el campo próximo, interesa registrar un amplio rango de frecuencias, por una parte para poder estudiar mejor el proceso de ruptura y, por otra, para cubrir una amplia gama de períodos de vibración que pueden afectar a estructuras y otros elementos como tuberías o maquinaria. En el campo lejano se registran oscilaciones producidas por ondas que han recorrido una trayectoria de mayor longitud; muchos efectos locales de la fuente han sido filtrados por el medio, registrándose, por tanto, vibraciones de frecuencias generalmente más bajas.

c) Para un tiempo de observación fijado, el número de registros que se espera obtener en un instrumento de campo próximo —acelerógrafo—

es muy pequeño comparado con el número de eventos que se registran con un sismógrafo clásico y, más aún, con un equipo para estudio de microsismicidad, ya que el período de retorno de movimientos intensos es mayor. Así, necesariamente, el sistema de registro debe ser diferente, no siendo práctico en un equipo de campo cercano, registrar de forma continua.

Es muy importante la evaluación del movimiento que se produce en el campo próximo; los valores instantáneos de aceleración deben obtenerse con la mayor exactitud posible, ya que de su cuantificación dependerán las acciones a introducir en el diseño de edificaciones. Así, el análisis de los acelerogramas incluye una serie de procesos necesarios para llegar a la definición del movimiento a medir, siendo la respuesta del instrumento uno de los principales factores que deben conocerse con precisión.

2. SISTEMAS DE REGISTROS SISMICO. FUNCION DE TRANSFERENCIA

Un instrumento de registro sísmico es, de forma general, un dispositivo capaz de proporcionar información sobre algún parámetro característico del movimiento del suelo durante un terremoto. Normalmente, en cada instante de tiempo t , este instrumento proporcionará una salida $s(t)$, al ser sometido a una excitación de entrada $e(t)$ (fig. 1).

La entrada $e(t)$ es la vibración del punto de observación en cada instante de tiempo t ; la amplitud de la vibración puede caracterizarse por el desplazamiento $z(t)$, la velocidad $\dot{z}(t) = dz(t)/dt$ o la aceleración $\ddot{z}(t) = d^2z(t)/dt^2$.

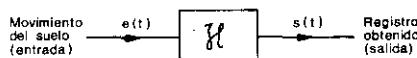


Figura 1.—Instrumento de registro sísmico.

La salida, $(s(t))$, es el registro obtenido, o sismograma. Esta salida puede obtenerse, en general, por aplicación a la entrada, $e(t)$, de un operador \mathcal{H} , independientemente de la amplitud de la señal de entrada.

$$s(t) = \mathcal{H}\{e(t)\} \quad [2.1]$$

Para que un sistema sea más fácilmente utilizable como equipo de registro sísmico, debe ser lineal, es decir, si $e(t)$, $e_1(t)$ y $e_2(t)$ son distintas funciones de entrada del sistema y a es una constante, deben cumplirse las dos relaciones siguientes:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}\{a \cdot e(t)\} &= a \cdot \mathcal{H}\{e(t)\} \\ \mathcal{H}\{e_1(t) + e_2(t)\} &= \mathcal{H}\{e_1(t)\} + \mathcal{H}\{e_2(t)\} \end{aligned} \quad [2.2]$$

Una forma general de caracterizar un sistema es por su función de respuesta $h(t)$. Esta representa la salida del sistema cuando la entrada es el impulso unitario $\delta(t)$. La salida $s(t)$ puede representarse como la convolución de la entrada $e(t)$ por $h(t)$, es decir,

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad [2.3]$$

que se representa:

$$s(t) = e(t) * h(t) \quad [2.4]$$

Si se aplica la transformada de Fourier a los dos miembros de la ecuación [2.4] se obtiene:

$$S(\omega) = E(\omega) \cdot H(\omega) \quad [2.5]$$

donde ω es la frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$, siendo f la frecuencia) y $S(\omega)$, $E(\omega)$ y $H(\omega)$ son funciones complejas de ω transformadas de $s(t)$ $e(t)$ y $h(t)$, respectivamente.

Mediante transformación de Fourier hemos pasado del dominio del tiempo (ecuación 2.4), al dominio de la frecuencia, en el cual las expresiones que se manejarán a continuación se simplifican. La convolución se corresponde con un simple producto, y la integración y derivación se corresponde con una simple división o multiplicación, respectivamente, por $i\omega$, donde i es la unidad imaginaria.

La función compleja $H(\omega)$, que caracteriza el comportamiento del sistema, se denomina *función de transferencia*. De la ecuación [2.5], se tiene

$$H(\omega) = S(\omega)/E(\omega),$$

es decir, la función de transferencia del sistema, $H(\omega)$, se obtiene por el cociente entre dos funciones complejas $S(\omega)$, transformada de Fourier de la salida $s(t)$ y $E(\omega)$, transformada de la entrada $e(t)$.

Un instrumento de registro sísmico (sismógrafo) está constituido por tres partes: i) *sensor*, ii) *acondicionador de señal* y iii) *regrador*.

i) El *sensor* (sismómetro) es generalmente una masa oscilante suspendida por un sistema amortiguado, es decir, un oscilador lineal amortiguado con un solo grado de libertad. Incluye, generalmente, un transductor, sistema capaz de proporcionar una señal medible a partir del movimiento de la masa. Los transductores pueden ser de tipo óptico (un simple espejo situado sobre la masa oscilante), electromagnético como en los geófonos (una bobina fija a la masa oscilante y un imán permanente fijo al chasis del instrumento), capacitivo, etc.

ii) El sistema acondicionador amplifica y/o modifica la señal de salida del sensor. En la mayoría de equipos es un simple sistema amplificador con filtros. En los sistemas mecánicos-ópticos es un conjunto de espejos o de brazos mecánicos que producen una amplificación del movimiento de la masa. En otros puede ser un circuito integrador analógico (filtro) o numérico, previa conversión de la señal analógica en digital. En los equipos «servo» un circuito proporciona al transductor del sensor una realimentación opuesta a la señal generada por el movimiento virtual de éste (como en el caso de los servoacelerómetros, cuyo funcionamiento básico se explicará más adelante).

iii) El último elemento del sistema es el *registrator*; éste puede ser de tipo gráfico directo (fotográfico, térmico, a tinta...), grabación en FM sobre un soporte magnético (bobina de cinta o cassette), grabación digital...

Cada uno de los tres elementos mencionados —sensor, acondicionador y registrador— puede representarse por su función de transferencia. La respuesta del sistema completo vendrá representada por el producto de las tres funciones de transferencia correspondientes a los citados componentes.

3. EL SISMOMETRO INERCIAL

El primer componente de un sistema de registro sísmico es el sensor; éste incluye, generalmente, como elemento primario, un simple oscilador armónico amortiguado de un grado de libertad, como el que se representa esquemáticamente, en la figura 2. Consta de una masa, m , suspendida de un mecanismo elástico de constante K , sujeta, además, a un sistema de amortiguación de coeficiente C .

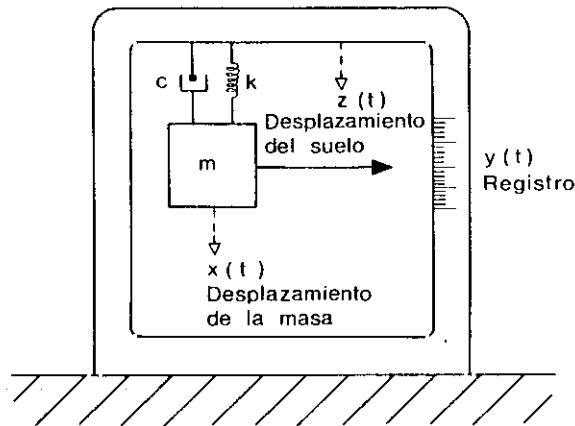


Figura 2.—Esquema de funcionamiento de un sismómetro mecánico.

Al aplicar a la base del instrumento una excitación $z(t)$ —desplazamiento absoluto del suelo— la masa experimenta un desplazamiento absoluto $x(t)$. El desplazamiento relativo, $y(t)$, de la masa respecto al suelo es:

$$y(t) = x(t) - z(t) \quad [3.1]$$

3.1. Instrumento con transductor mecánico u óptico

En los sensores con transductor mecánico u óptico, este desplazamiento relativo $y(t)$, amplificado es, precisamente, el registro obtenido.

La ecuación del movimiento del sistema de la figura 2 es:

$$m\ddot{x} + C\dot{y} + Ky = 0 \quad [3.2]$$

donde, como se ha indicado, m es la masa oscilante, K la constante elástica (fuerza/desplazamiento) y C el coeficiente de amortiguamiento (fuerza/velocidad).

Teniendo en cuenta [3.1], puede escribirse la ecuación [3.2] en su forma habitual:

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_n\dot{y} + \omega_n^2 y = \ddot{z} \quad [3.3]$$

donde $\omega_n = \sqrt{K/m}$ es la frecuencia angular propia del sistema no amortiguado y $\xi = C/2m\omega_n$ es el factor de amortiguamiento, o fracción de amortiguamiento crítico, es decir:

$$\xi = C/C_c$$

C = coeficiente amortiguamiento actual

C_c = coeficiente amortiguamiento crítico.

Tal como se ha indicado en el apartado 2, el comportamiento de un sistema viene caracterizado por su función de transferencia, que se obtiene dividiendo la entrada por la salida, cuando ambas se expresan como funciones complejas de la frecuencia.

Sean:

$y(t)$ = salida del sistema (registro)

$Y(\omega)$ = transformada de Fourier de $y(t)$

$z(t)$ = desplazamiento del suelo

$Z(\omega)$ = transformada de Fourier de $z(t)$

Entonces, la función de transferencia en desplazamiento del sistema o *sensibilidad en desplazamiento*, S_d , viene definida por la siguiente relación:

$$S_d(\omega) = \frac{Y(\omega)}{Z(\omega)} \quad [3.4]$$

$S_d(\omega)$ es una función compleja que puede descomponerse en dos funciones:

$$S_d(\omega) = M(\omega) \cdot \exp(i\phi(\omega)) \quad [3.5]$$

$M(\omega)$ es la respuesta en amplitud, denominada *magnificación*. $\phi(\omega)$ es la respuesta en fase.

Resolviendo la ecuación [3.3] en el dominio de la frecuencia, se obtiene:

$$S_d(\omega) = \frac{-\omega^2}{\omega_n^2 \pm 2i\xi\omega_n\omega - \omega^2} \quad [3.6]$$

donde:

ω =frecuencia angular del movimiento del suelo;

ω_n =frecuencia natural del sistema no amortiguado;

ξ =factor de amortiguamiento.

Separando, en la ecuación [3.6], el módulo y el argumento se obtiene:

$$M(\omega) = \frac{\omega^2}{[(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_n\omega)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad [3.7]$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{2\xi\omega_n\omega}{\omega^2 - \omega_n^2} \quad [3.8]$$

Estas dos funciones se representan gráficamente en la figura 3 para distintos valores de amortiguamiento.

Un sistema como el representado en la figura 2 responde a vibraciones del terreno: estas vibraciones pueden caracterizarse por su desplazamiento $z(t)$, su velocidad $\dot{z}(t)$ o su aceleración $\ddot{z}(t)$.

Así el dispositivo podrá ser considerado como un registrador de desplazamientos, velocidades o aceleraciones del suelo: es sólo la forma de su curva de respuesta lo que, para cada banda de frecuencias, lo hace más apto para una u otra clase de medidas.

De la misma forma en que anteriormente se definió la sensibilidad en desplazamiento, S_d , también puede definirse la sensibilidad en velocidad, S_v y en aceleración, S_a :

$$S_v(\omega) = \frac{Y(\omega)}{i\omega Z(\omega)} = \frac{S_d(\omega)}{-im} \quad [3.9]$$

$$S_a(\omega) = \frac{Y(\omega)}{-\omega^2 Z(\omega)} = \frac{S_d(\omega)}{-\omega^2} \quad [3.10]$$

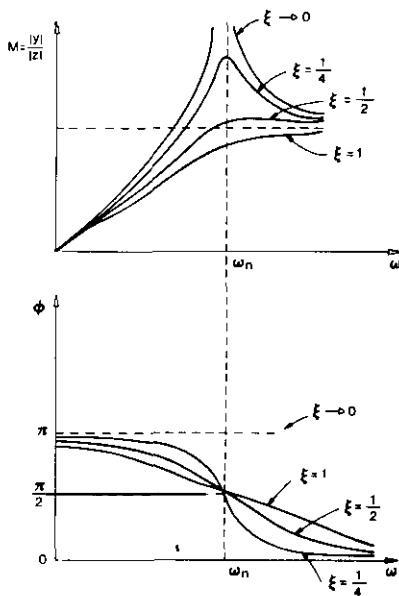


Figura 3.—Sensibilidad en desplazamiento del sismómetro inercial (mecánico), para diferentes amortiguamientos. En la curva superior se representa la magnificación (respuesta en amplitud) y en la inferior la respuesta en fase.

donde $i\omega Z(\omega)$ y $-\omega^2 Z(\omega)$ son las transformadas de $\dot{z}(t)$ y $\ddot{z}(t)$, respectivamente.

Considerando sólo los módulos, es decir, la respuesta en amplitud, se tiene:

$$M = \omega |S_v| = \omega^2 |S_a| \quad [3.11]$$

En la figura 4 se representan conjuntamente en un diagrama bilogarítmico las gráficas asintóticas aproximadas correspondientes a las tres sensibilidades M , $|S_v|$ y $|S_a|$ para un sistema mecánico muy amortiguado ($\xi > 0.6$). Los diferentes tramos tienen pendientes que varían entre -2 y 2 . Al lado de cada una se representan las correspondientes respuestas en fase.

A partir de las gráficas de la figura 4, se deduce que el sistema mecánico representado en la figura 2 es un instrumento adecuado para medir desplazamientos dinámicos, siempre que las frecuencias de vibración, ω , se hallen por encima de la de resonancia del sistema ω_n (tramo horizontal de la figura 4a). El mismo dispositivo mecánico será un buen registrador de aceleraciones para $\omega < \omega_n$ (tramo horizontal de la figura 4c). Sin embargo, este instrumento no puede usarse para registro de velocidades, ya que la zona que se representa (asintóticamente) como plana para S_v (zona estrecha horizontal de la figura 4b) no lo es realmente, corresponde

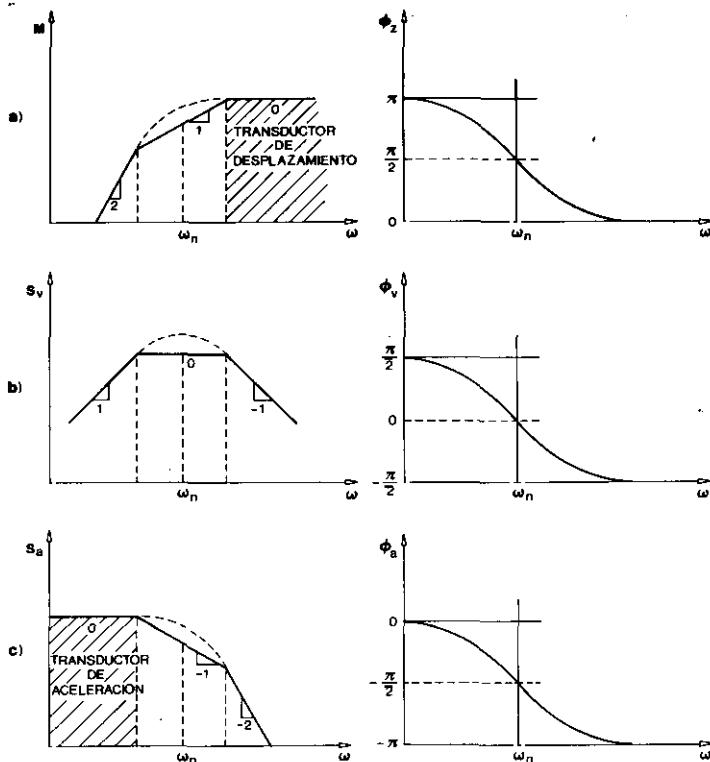


Figura 4.—Gráficas asintóticas aproximadas para un sistema mecánico muy amortiguado ($\zeta > 0.6$). Sensibilidad a) en desplazamiento; b) en velocidad, c) en aceleración.

a la banda de resonancia del sistema. Para registrar velocidades es preciso modificar el sensor mecánico de la figura 2 incorporándole un transductor electromagnético, como se explica en el apartado siguiente.

3.2. Transductor electromagnético

Los sismómetros con transducción mecánica u óptica presentan una serie de problemas prácticos que los hacen inadecuados para muchas aplicaciones. Citaremos los siguientes:

- Su sensibilidad es baja.
- Los registros tienen que hacerse sobre papel fotográfico, mediante un sistema de espejos en los que incide un haz luminoso, o bien por medio de un conjunto de piezas articuladas que terminan en un estilete que traza una línea sobre papel ahumado, o con tinta. Ambos sistemas son delicados y de manejo complicado.

— Si se quiere aumentar su sensibilidad el equipo aumenta de tamaño, siendo inutilizable en trabajos de campo.

Para evitar estos problemas y disponer de sensores versátiles conectables a diferentes sistemas de amplificación electrónica y registro, se usan los transductores electromagnéticos (figura 5). Una bobina es solidaria a la masa del sismómetro y un imán está fijado a la carcasa (o viceversa). Al tener lugar un movimiento relativo entre la masa y la carcasa, se induce entre los bornes de la bobina una fuerza electromotriz $V(t)$, proporcional a la velocidad relativa $\dot{y}(t)$.

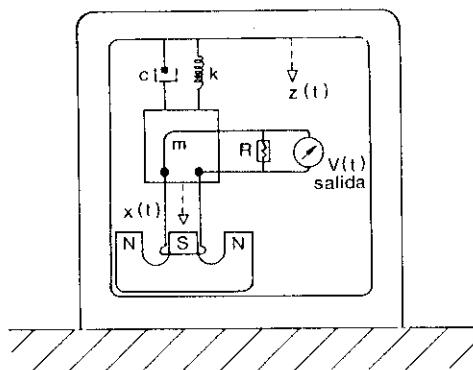


Figura 5.—Esquema de funcionamiento de un sismógrafo con transductor electromagnético.

El registro no es, pues, en este caso, proporcional a y (como en los sismógrafos mecánicos), sino a su derivada, \dot{y} . Así, aplicando las definiciones [3.4], [3.9] y [3.10] se tiene que, para un sismómetro con transductor electromagnético:

$$M \text{ [transductor electromagnético]} = \omega M \text{ [transductor mecánico]}$$

$$|S_v| \text{ [transductor electromagnético]} = M \text{ [transductor mecánico]}$$

$$|S_a| \text{ [transductor electromagnético]} = |S_v| \text{ [transductor mecánico]}$$

Los resultados anteriores se muestran en la figura 6, donde se han trazado las curvas aproximadas de respuesta (M , S_v y S_a) del sensor mecánico y del electromagnético conjuntamente. Se han sombreado las bandas normales de trabajo de los instrumentos, que son las correspondientes a los tramos de respuesta plana (horizontal) que resumido son:

— Mecánico,

- (1) $M = \text{const.}$ para $\omega \gg \omega_n$
(registro de desplazamientos).
- (2) $S_a = \text{const.}$ para $\omega \ll \omega_n$
(registro de aceleración).

— Electromagnético:

$$(3) S_v = \text{const. para } \omega \gg \omega_n \\ (\text{registraror de velocidad}).$$

Dentro del grupo (1) están algunos equipos de observatorio —principalmente de período largo—, dentro del (2) los acelerógrafos con registro fotográfico directo, y dentro del (3) los sismómetros (geófonos) de período corto más usados para registro de sismicidad regional y local, estudios de vibraciones en general y en equipos de prospección.

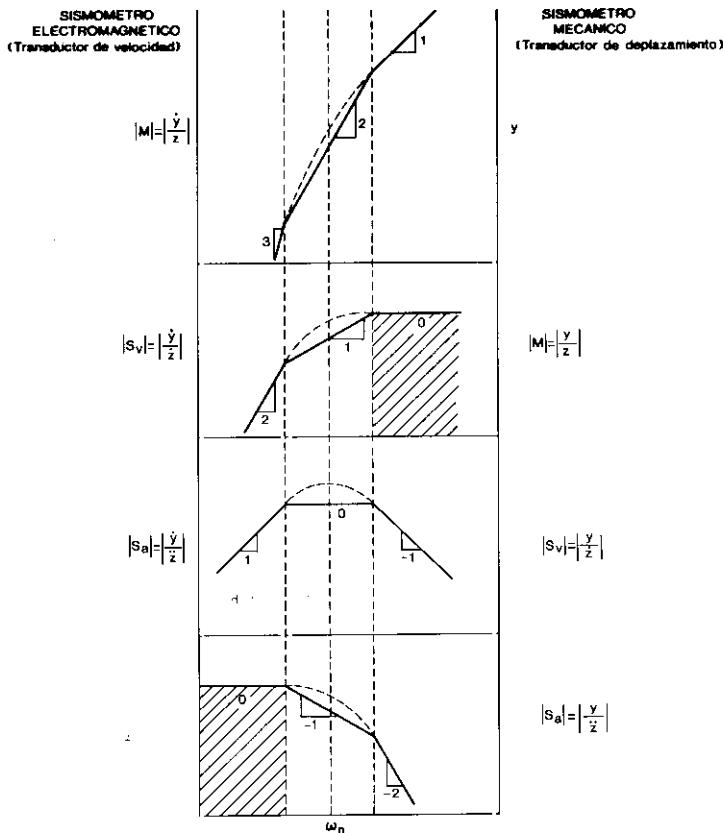


Figura 6.—Curvas aproximadas de respuesta. Se representan conjuntamente las del sensor mecánico (transductor de desplazamiento, y) y las del sensor con transductor electromagnético (transductor de velocidad, \dot{y}).

4. INSTRUMENTOS PARA CAMPO CERCANO

De forma general pueden considerarse tres tipos de instrumentos sísmicos para campo cercano: i) instrumentos que registran la historia temporal del movimiento; ii) instrumentos que suministran solamente información sobre valores máximos de aceleración y iii) instrumentos que proporcionan parámetros especiales distintos de la aceleración (McEvilly, 1976).

El instrumento en la actualidad más utilizado es el acelerógrafo, que proporciona un registro temporal de aceleración. No obstante, para el control de la respuesta de estructuras y por razones de tipo económico, siguen utilizándose algunos aparatos más simples que el acelerógrafo, que registran únicamente valores máximos. También, para estudios especiales, son a veces necesarios equipos con los que se pueden obtener directamente otros parámetros, de interés en ingeniería, como son las deformaciones relativas o los espectros de respuesta.

A continuación se describen brevemente, de entre estos instrumentos, los más utilizados en la práctica.

4.1. Registradores de máximo de aceleración

Los registradores de máximo de aceleración, también llamados registradores de aceleración pico («peak recording accelerometers») son, como su nombre indica, instrumentos en los que, después de un terremoto, puede leerse el valor de la aceleración máxima alcanzada en una dirección dada, horizontal o vertical; o en tres direcciones cuando se dispone de una configuración triaxial.

Un registrador de máximo de aceleración es generalmente un instrumento pasivo (no requiere alimentación eléctrica). Esquemáticamente se trata de un sistema mecánico como el que se representó en la figura 2, con respuesta en aceleración como en la figura 4c, plana desde continua (0 Hz) hasta un valor de 12 a 30 Hz. Mediante un estilete deja una marca en una placa en la que posteriormente se puede leer el máximo o valor pico de aceleración alcanzado dentro del rango de frecuencias del instrumento.

Otros detectores de aceleración pico pueden ser equipos electrónicos constituidos por un sensor, un acondicionador de señal y un dispositivo que memoriza los valores máximos (una pantalla numérica —«display»— o impresora). Una variante de estos equipos son los *interruptores sísmicos*: cuando se excede un valor umbral pefijado de aceleración abren o cierran un contacto que provoca la acción de avisadores o alarmas; estos sistemas son requeridos por las regulaciones vigentes, como parte integrante de los sistemas de vigilancia sísmica que se instalan en las centrales nucleares.

4.2. Sismoscopio

Un sismoscopio es básicamente un péndulo que puede oscilar en cualquier dirección horizontal. En el extremo superior se aloja un estilete que origina una traza en un vidrio cóncavo que previamente ha sido ahumado.

Este instrumento proporciona gráficos como el de la figura 7, que reproducen el movimiento de la partícula. Pueden leerse aceleraciones en las diferentes direcciones; no obstante, esta gráfica no dispone de base de tiempos, con lo que no puede, de forma precisa, reconstruirse a partir de ella el registro temporal del terremoto. Si los registros obtenidos en sismoscopios no son muy complicados puede intentarse sintetizar —siempre dentro de unos considerables márgenes de error— un acelerograma, por métodos como el de Scott (1973).



Figura 7.—Registro de sismoscopio obtenido durante el terremoto de San Fernando del 9 de febrero de 1971.

El sismoscopio proporciona mejor información que un simple registrador de máximos. Sin embargo, cuando se desea obtener una descripción completa del movimiento hacen falta los valores de aceleración en cada instante de tiempo, datos que sólo pueden proporcionar los acelerógrafos.

4.3. Acelerógrafos

El acelerógrafo es un instrumento que sirve para registrar la aceleración de un terremoto en función del tiempo. Consta de dos partes: sensor

triaxial y sistema de discriminación y registro, que pueden estar incluidos en una misma caja o separados (en sistemas centralizables).

Dependiendo del tipo de registro que se obtiene, los acelerógrafos pueden ser de dos tipos:

a) *Analógicos.*

— Con registro *gráfico directo*. Son equipos generalmente compactos (fig. 8); cada uno de los sensores que constituyen la configuración triaxial lleva, solidario a la masa oscilante, un espejito sobre el que puede incidir un haz luminoso, que se refleja sobre el sistema de película fotográfica. Cuando se supera un cierto umbral de aceleración el sistema de arrastre de la película es accionado automáticamente, y la lámpara que produce el haz de luz incidente se ilumina. Una vez producido el registro la película debe revelarse.

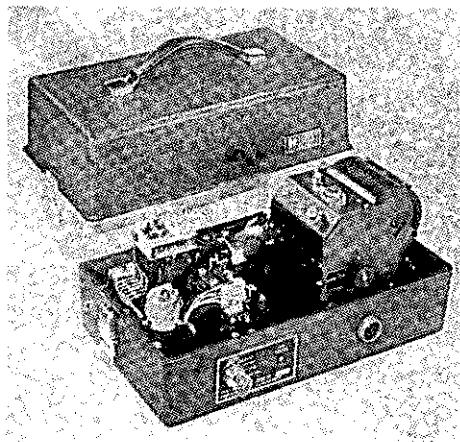


Figura 8.—Acelerógrafo analógico con resgitro en película fotográfica (modelo SMA-1, Kinematics).

— *Con registro en cinta magnética.* En este tipo de acelerógrafo, el registro se realiza en modulación de frecuencia (FM) (Tejedor *et al.*, 1984). El sistema modulador y de grabación en cassette es accionado automáticamente por un detector de nivel, cuando la aceleración observada supera el valor umbral prefijado.

Mediante una unidad de reproducción se obtienen registros gráficos a partir de las grabaciones contenidas en los cassettes.

b) *Digitales.*

Las principales ventajas de los acelerógrafos digitales son las siguientes:

- Mayor rango dinámico: Pueden registrarse con el mismo instrumento, y con mayor precisión, movimientos muy intensos y movimientos moderados.
- Memoria pre-momento: En los equipos analógicos el sistema de grabación se acciona cuando el detector de nivel identifica un valor de aceleración superior al umbral prefijado. Así se pierde toda la información anterior a este momento y también en una fracción de tiempo posterior debido a la inercia del sistema mecánico. En los equipos digitales, la señal procedente del sensor es continuamente digitalizada e introducida en una memoria cíclica. Al detectarse un valor de aceleración igual o superior a la de disparo se acciona, como en el caso de los analógicos, el sistema de registro, pero, con la particularidad de que se registra primero la información contenida en la memoria; así no se pierden las primeras llegadas de los eventos, información ésta de gran importancia en sismología.
- Facilidad de proceso posterior: Al estar los datos almacenados en forma digital, se facilita el análisis numérico de los registros, eliminando el laborioso paso de la digitalización.

Atendiendo al modo de registro, los acelerógrafos digitales actualmente en el mercado son de dos tipos:

- *Con registro en cinta magnética*, tipo cassette. Las cintas registradas en el acelerógrafo son reproducidas en otra unidad, para obtener un registro gráfico y/o introducir los datos en un ordenador.
- *Con registro en memoria de estado sólido*. La grabación se realiza íntegramente en memoria; de esta manera se eliminan partes mecánicas cuyos fallos, en la práctica, junto con los sistemas de alimentación, son la principal causa de pérdida de registros.

Los módulos de memoria en los que se almacena la información registrada pueden ser fijos o removibles. Para la transferencia de datos a un ordenador algunos equipos utilizan una unidad de reproducción. En otros, esta transferencia se realiza directamente.

4.4. Servoacelerómetro

La mayoría de acelerógrafos digitales actualmente en el mercado sustituyen el sensor electromagnético convencional por otro tipo de captador, el servoacelerómetro, también llamado acelerómetro de equilibrio de fuerzas (*«force-balance accelerometer»*). En éste se parte de un sistema electromagnético, en principio similar al de la figura 5, en el que se introduce un sistema de realimentación.

En la figura 9 se muestra el esquema de funcionamiento de un servoacelerómetro. Sea a la aceleración (en este caso horizontal) en la base. La masa m tiende a sufrir un desplazamiento relativo respecto a la caja del

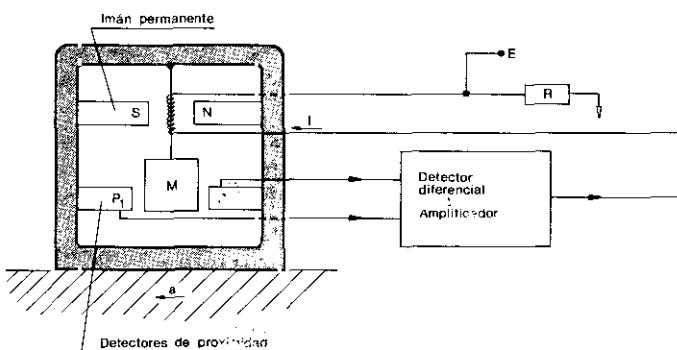


Figura 9.—Esquema de funcionamiento de un servoacelerómetro.

instrumento, que se supone solidaria al suelo. Cuando los detectores de proximidad P_1 y P_2 detectan el movimiento, instantáneamente se introduce en la bobina una corriente de intensidad I , que origina una fuerza opuesta al movimiento de la masa, obligando a que ésta siga en reposo.

La fuerza de inercia, F , asociada a la aceleración es

$$F = m \cdot a$$

La fuerza, F_I , generada por la corriente I es:

$$F_I = B \cdot l \cdot n \cdot I,$$

donde B es la intensidad del campo magnético creado por el imán, l es la longitud de una espira y n el número de espiras de la bobina. Estos tres valores, B , l y n son constantes del instrumento.

Al conseguirse el equilibrio de fuerzas, dentro del rango de frecuencia en que el sistema es lineal, $F = F_I$, y se tiene:

$$I = \frac{m}{Bln} a$$

Es decir, la intensidad I es proporcional a la aceleración. Así, midiendo I se obtienen los valores instantáneos de a .

Este tipo de sensor tiene generalmente un mejor comportamiento dinámico que los acelerómetros electromagnéticos, mayor linealidad y rango dinámico, mejor respuesta en frecuencia y mayor inmunidad al ruido.

4.5. Registradores/analizadores de espectro de respuesta

Estos instrumentos, instalados principalmente en centrales nucleares tienen como objeto registrar directamente el *espectro de respuesta* del

movimiento. El concepto de espectro de respuesta ya ha sido explicado en otros capítulos de este libro (ver p.e. Newmark y Rosenblueth, 1971). El espectro de respuesta en aceleración se define, para cada frecuencia, f , y para cada amortiguamiento, ξ , como la aceleración máxima que experimenta un oscilador armónico simple de frecuencia natural f y amortiguamiento ξ .

Estos instrumentos acostumbraban a ser sistemas mecánicos a base de láminas oscilantes de diferentes frecuencias, con estiletes que dejan una marca sobre unas placas en las que posteriormente pueden leerse los máximos. En la actualidad se tiende generalmente a sustituir estos instrumentos por *analizadores de espectro* en tiempo real, equipos electrónicos que proporcionan directamente los valores del espectro a partir de las señales de los acelerómetros; el espectro se suministra directamente en forma de tabla en una impresora, o de forma gráfica. Los analizadores de espectro se utilizan también para obtener el espectro de respuesta no en tiempo real sino a partir de los registros de aceleración recogidos en cinta (u otro soporte) por los acelerógrafos.

5. ANALISIS DE ACELEROGRAMAS

Los registros obtenidos en los acelerógrafos son sometidos a un proceso más o menos complejo, dependiendo del tipo de instrumento y del objetivo del análisis.

En general se trata de reproducir el movimiento del suelo —o del punto de la estructura donde se halla el instrumento— con la mayor precisión posible, a partir del registro obtenido. Se desea obtener las funciones $\ddot{z}(t)$, $\dot{z}(t)$ y $z(t)$, aceleración, velocidad y desplazamiento, así como los espectros de Fourier y de respuesta.

El registro obtenido, $r(t)$, no puede leerse directamente como un simple registro de aceleración, para, a partir de él, obtener velocidades, desplazamientos y espectros, debido a que está contaminado por cada uno de los pasos implicados en la obtención misma de $r(t)$.

En la figura 10 se muestra un esquema de los diferentes pasos que se siguen desde el registro por parte del instrumento de campo hasta su introducción de forma digital en un ordenador para la obtención de las funciones aceleración, velocidad y desplazamiento en función del tiempo. Como se muestra esquemáticamente en la figura 10, el proceso depende del tipo de instrumento.

- El instrumento de campo, al ser sometido a un movimiento, produce un registro.
- En el caso de un acelerógrafo analógico con registro fotográfico, éste es sometido a un proceso de revelado y ampliación.
- Una vez revelado y ampliado el registro es digitalizado en una

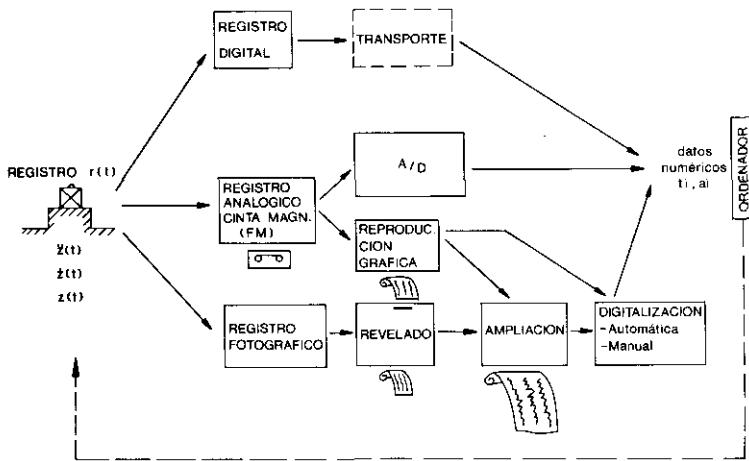


Figura 10.—Fases en la obtención y proceso de acelerogramas.

mesa digitalizadora de forma manual (un operador sigue la traza con un cursor) o por un sistema automático.

La salida del digitalizador consiste en pares de datos t_1, a_1 , tiempos y aceleraciones «no corregidas», respectivamente.

- En el caso de un registro analógico en cinta magnética (FM) puede, mediante la unidad de reproducción, obtenerse un registro gráfico que se digitaliza como en el caso anterior; o bien, por medio de un conversor analógico/digital, se digitaliza automáticamente.
- En el caso de un acelerógrafo digital, el registro de campo ya está numerizado; todo el proceso posterior —transvase de datos en una unidad intermedia, paso de cassette a ordenador— es un simple transporte que no modifica los datos.

Cada uno de los pasos anteriormente descritos puede modificar el registro, y este hecho debe tenerse en cuenta a la hora de proceder el análisis de los mismos. Los errores que se introducen en los distintos pasos afectan en algunos casos a las altas frecuencias y en otros a las bajas (Trifunac *et al.*, 1973).

Los errores en las bajas frecuencias se deben principalmente a los siguientes factores:

- Movimiento transversal de la película durante el registro.
- Deformaciones de los registros en el proceso de ampliación o copiado fotográfico.
- Error sistemático de la mesa digitalizadora.
- Errores aleatorios del proceso de digitalización.

Los errores en las altas frecuencias se deben a:

- Influencia de los modos superiores de vibración del acelerómetro.
- Armónicos en las amplitudes y corrimientos de fase debidos a la frecuencia natural finita del acelerómetro.
- Errores aleatorios del proceso de digitalización.
- Errores causados por la resolución inadecuada del equipo de digitalización.
- Filtrado paso-bajas inherentes al proceso de digitalización automática.

El análisis de acelerogramas incluye generalmente las siguientes partes:

- i) Corrección de línea de base.
- ii) Filtrado paso bajas.
- iii) Filtrado paso altas.
- iv) Corrección instrumental: convolución del registro con la función de transferencia del instrumento.
- v) Integración para la obtención de velocidades y desplazamientos.
- vi) Análisis de Fourier.
- vii) Cálculo de espectro de respuesta.

El análisis puede realizarse en el dominio del tiempo o en el de frecuencias. La mayoría de los métodos que trabajan en el dominio del tiempo derivan del descrito por Trifunac y Lee (1973).

El proceso en el dominio de frecuencias (Khemici y Chiang, 1984; Fernández, 1984) es más simple ya que, por una parte, la corrección instrumental, que en el dominio del tiempo se realiza por una deconvolución, o bien integrando la ecuación 3.3, aquí es una simple división compleja por la función de transferencia del instrumento (ver ecuación 2.5). Por otra parte, la integración para obtener velocidades y desplazamientos a partir de las aceleraciones se reduce, cuando se trabaja en el dominio de frecuencias, a dividir dos veces por $i\omega$ (i =unidad imaginaria, ω =frecuencia angular).

Tanto si el proceso se realiza en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, uno de los puntos más críticos es la elección de las frecuencias de corte de los filtros (Shyan Sunder y Connor, 1982; Shakal y Ragsdale, 1984).

En la figura 11 se muestran como ejemplo las gráficas de aceleración, velocidad y desplazamiento en función del tiempo, corregidas a partir de un registro obtenido en un acelerógrafo durante el terremoto de Morgan Hill (California) del 24 de abril de 1984. En la figura 12 pueden verse los espectros de respuesta y de Fourier calculados, a partir del mismo registro, por el California Division of Mines and Geology (Shakal *et al.*, 1986).

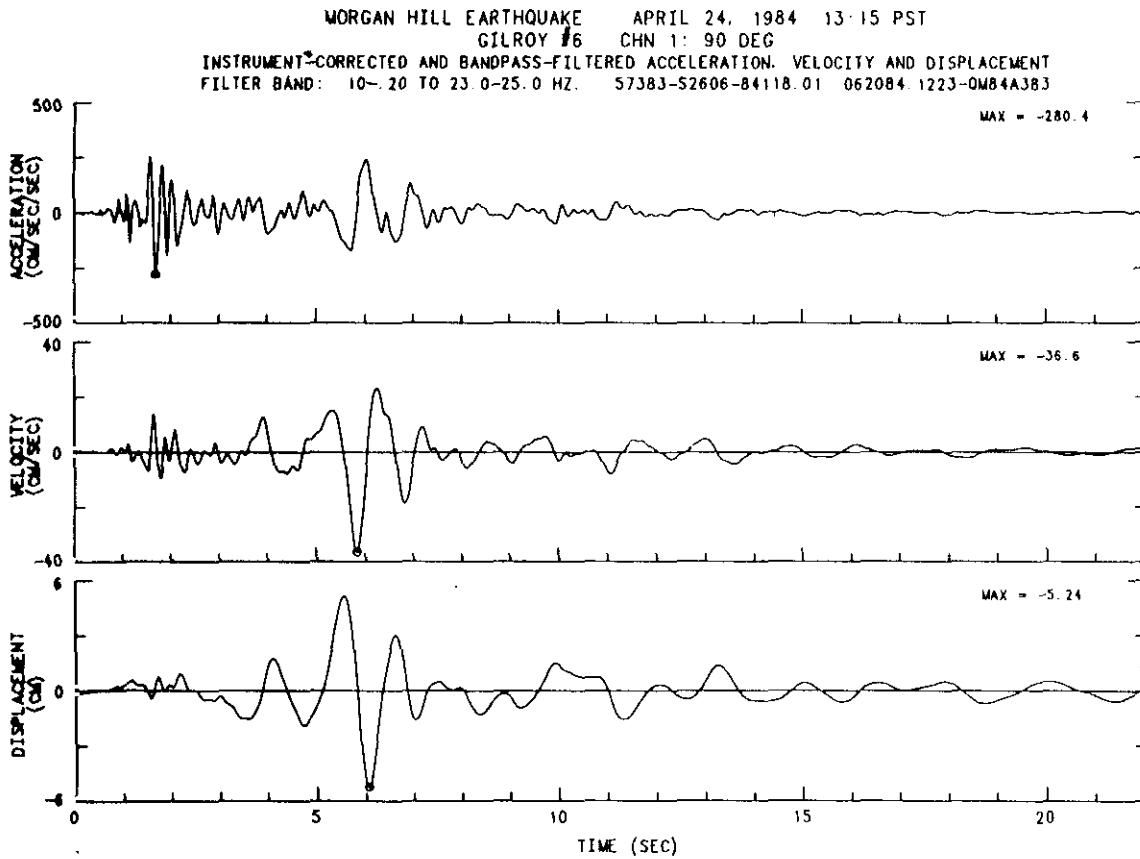


Figura 11.—Aceleraciones, velocidades y desplazamientos corregidos (Shakal et al., 1986).

MORGAN HILL EARTHQUAKE APRIL 24, 1984 13:15 PST
 CILROY #6
 CHN 1: 90 DEG
 ACCELEROGRAF BANDPASS-FILTERED WITH RAMPS AT .05-.07 TO 23.0-25.0 Hz.
 S7383-S2606-84118.01 060784.1734-QM84A383

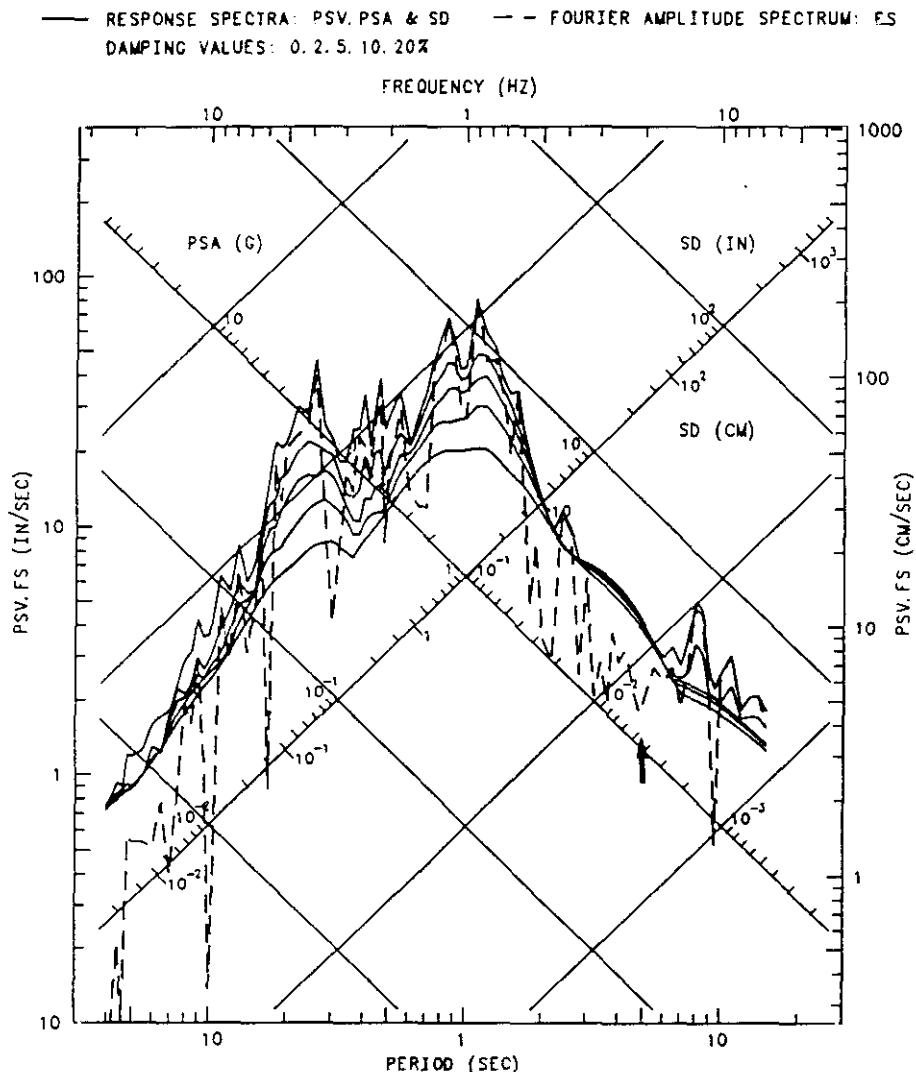


Figura 12.—Espectros de Fourier y de respuesta obtenidos a partir del acelerograma de la figura 16 (Shakal *et al.*, 1986).

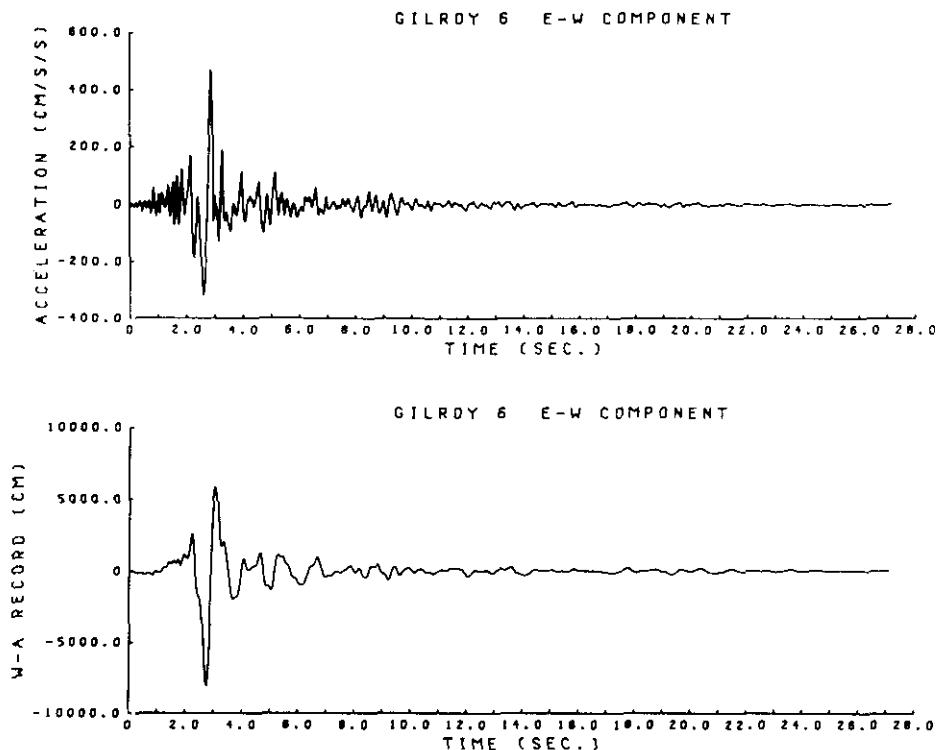


Figura 13.—Simulación de un registro Wood-Anderson (gráfica inferior) a partir de un acelerograma (gráfica superior) obtenido a unos 8 km del epicentro del sismo de Coyote Lake, California, ocurrido el 6 de agosto de 1979 (Roca, 1982).

Utilizando el concepto de función de transferencia (ver apartado 2), es, también, posible simular, a partir de los acelerogramas, los registros de otros instrumentos. Tiene especial interés la obtención del registro simulado de un sismómetro Wood-Anderson (Roca, 1982) ya que es en base a estos registros como se define la magnitud local. Obteniendo estos sismogramas (fig. 13) puede calcularse directamente la magnitud local de un terremoto a partir de los registros de campo cercano.

REFERENCIAS

- Fernández, L. M. (1984): Frequency domain processing of strong-motion accelerograms. Seismologic Series 15, Geol. Survey, Dep. of Mineral and Energy Affairs, Pretoria, 38 pp.
- Khemici, O. y Chiang, W. L. (1984): Frequency domain corrections of earthquake accelerograms with experimental verifications. *Proc. of 8th World Conf. on Earthquake Engin.*, 2, 103-110, San Francisco.

- McEvilly, T. V. (1976): Seismological instrumentation. En *Seismic Risk and Engineering Decisions*, Lomnitz y Rosenblueth (editores), Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Newmark, N. M. y Rosenblueth, E. (1971): Fundamentals of Earthquake Engineering. *Prentice-Hall Inc.* Englewood Cliffs, N. J., 640 pp.
- Roca, A. (1982): Earthquake local magnitude from accelerograms. *Rev. de Geofísica*, 38, 65-72.
- Scott, W. (1973): The calculation of horizontal accelerations from seismoscope records. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 1637-1661.
- Shakal, A. F. y Ragsdale, J. T. (1984): Acceleration, velocity and displacement noise analysis for the CSMIP accelerogram digitization system. *Proc. of 8th World Conf. on Earthquake Engin.*, 2, 111-118, San Francisco.
- Shakal, A. F., Huang, M. J., Parke, D. L. y Sherburne, R. W. (1986): Processed data from the strong-motion records of the Morgan Hill earthquake of 24 April 1984. Part I, Ground-response records. Report No. OSMS 85-04, California Strong Motion Instr. Program., California Division of Mines and Geology, Sacramento.
- Shyam Sunder, S. y Connor, J. J. (1982): A new procedure for processing strong-motion earthquake signals. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 643-661.
- Tejedor, J. M., Roca, A., Cardona, F. y Ortiz, R. (1984): Diseño y aplicaciones de un acelerógrafo de bajo coste para control sísmico. Resum. *V Asamblea Nac. Geodesia y Geofísica*, Inst. Geográfico Nacional, Madrid.
- Trifunac, M. D. y Lee, V. W. (1973): Routine processing of strong motion accelerograms. *Earthquake Engin. Res. Lab. report EERL 73-03*, Calif. Inst. Tech., Pasadena.
- Trifunac, M. D., Udwadia, F. E. y Brady, A. G. (1973): Analysis of errors in digitized strong-motion accelerograms. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 63, 157-187.

