

Registro y Tratamiento de Acelerogramas

E. CARREÑO, B. BRAVO, A. SUÁREZ y J. M. TORDESILLAS
Instituto Geográfico Nacional

RESUMEN

Tanto el registro de acelerogramas como su tratamiento, han ido cambiando a medida que se han transformado los mecanismos de adquisición y el almacenamiento y procesado de los datos. En este trabajo se presentan los conceptos básicos de algunos de los parámetros de interés en ingeniería sísmológica y los principios en que se fundamentan los instrumentos de registros de aceleración, que siguen siendo básicamente los mismos; así como aquellas herramientas que se utilizan en el tratamiento de acelerogramas, sin olvidar el caso de los registros analógicos, que siguen constituyendo en algunos países con sismicidad importante, la mayoría de los registros.

ABSTRACT

The recording and analysis of the strong ground motion have been changing in parallel to the transformation of the acquisition mechanism, storage and data processing. Here we are presenting the basic concepts of the different parameters of the engineering seismology and also, the main components of the strong motion instrumentation, that remain basically the same. The main tools for the analysis of digital and analogical strong motion data are also presented.

1. REGISTRO DE LOS MOVIMIENTOS FUERTES DEL SUELO

El conocimiento de las fuerzas de los terremotos, el análisis de sus efectos sobre las estructuras, el desarrollo de normas de construcción y los métodos para determinar el riesgo sísmico sobre las construcciones son algunas de las principales motivaciones para el estudio de los acelerogramas.

En ellos, el parámetro de mayor interés es la aceleración del suelo. Son también importantes, la velocidad y el desplazamiento. Una idea de ello la podemos obtener si imaginamos el caso de una estructura simple con una masa concentrada en el tejado (Fig.1) y consideramos la fuerza lateral concentrada en los elementos verticales, que serían las paredes o columnas. La respuesta de la estructura a un terremoto viene dada por las leyes de Newton del movimiento,

$$m(\ddot{x} + \ddot{z}) = -f(x, \dot{x}, t) \quad [1]$$

El miembro de la derecha es la fuerza restauradora del edificio que es función de la desviación relativa, $x(t)$ y de su derivada; mientras que la aceleración debe incluir ambos, el movimiento relativo y el movimiento de la base;

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x}, t) = -m\ddot{z}(t) \quad [2]$$

ecuación que da la respuesta al terremoto como si la estructura estuviese fijada por la base y sometida a una fuerza dinámica $-m\ddot{z}(t)$. La fuerza efectiva de carga debida al terremoto en un punto de la masa es igual a tantas veces la masa por la aceleración del suelo. De esta ecuación vemos que los edificios construidos por ejemplo, en piedra, caracterizados por grandes masas y baja resistencia, son particularmente peligrosos durante los grandes terremotos, al menos en ausencia de otros factores.

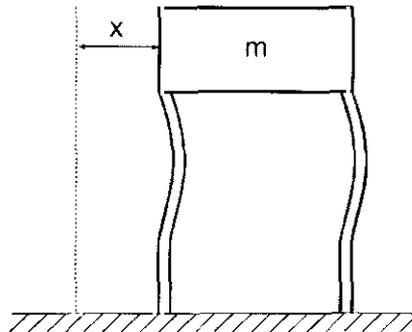


Figura 1. Estructura sometida a una fuerza lateral.

Estos registros se denominan de campo cercano, ya que el estudio se realiza en la región epicentral, en la que los movimientos en superficie al paso de las ondas sísmicas son más intensos (**movimientos fuertes del suelo**), produciéndose desplazamientos, velocidades y aceleraciones elevadas, aunque dependiendo fundamentalmente de la magnitud del sismo y de su distancia al epicentro. Aquí no se puede aceptar la hipótesis del foco puntual, ya que la distancia del punto de observación a la superficie de fractura, es del mismo orden de magnitud que la dimensión de la fractura, por lo que el registro obtenido será una superposición de ondas correspondientes a distintos puntos de la fractura, lo que hace que su interpretación sea más compleja.

Estamos pues en el ámbito ingenieril de la sismología, ya que es en esta zona donde se producen, generalmente, los mayores daños a las estructuras, por lo que será de gran interés registrar el movimiento producido en diferentes tipos de suelo y en las edificaciones, para conocer su respuesta a las excitaciones sísmicas.

Como el movimiento en esta zona no puede extrapolarse de los sismogramas obtenidos a grandes distancias (campo lejano), será necesario registrarlos directamente con instrumentos adecuados situados cerca del epicentro.

2. INSTRUMENTACIÓN PARA REGISTRO EN CAMPO CERCANO, DE MOVIMIENTOS FUERTES DEL SUELO

Al considerar los movimientos en el campo cercano, nos encontramos que el registro que hay que realizar difiere considerablemente del caso del campo lejano, por lo que será necesario utilizar instrumentos de características también distintas. Las principales diferencias son las siguientes:

- a) *La intensidad de las vibraciones.* Se puede caracterizar la vibración en un punto del suelo por la historia temporal del desplazamiento $z(t)$, de la velocidad $\dot{z}(t)$ o de la aceleración $\ddot{z}(t)$. Cuando queremos registrar movimientos fuertes del suelo, hay que tener en cuenta que una vibración de aceleración 0.2 g a una frecuencia de 2 Hz corresponde a un desplazamiento máximo de 1.2 cm y que por ejemplo, una vibración de aceleración 0.5 g a 1 Hz produciría un desplazamiento de 12 cm; en cambio, en altas frecuencias, estos valores corresponderían a desplazamientos muy pequeños. Por tanto, un registrador de desplazamientos necesitará disponer de un rango dinámico muy grande para no llegar a la saturación.

- b) *El rango de frecuencias.* Nos interesa que el instrumento que vamos a usar en campo cercano, sea capaz de registrar un amplio rango de frecuencias, tanto para estudiar en condiciones el proceso de ruptura, como para cubrir toda la gama de periodos de vibración que afectan a las estructuras.
- c) *Registro por disparo.* Debido a que estos instrumentos de campo cercano registrarán fundamentalmente los movimientos fuertes del suelo que se producen en un pequeño radio de acción, el número de registros que se supone que va a obtener este instrumento será muy pequeño con respecto al número de registros que hace un sismógrafo para registro de velocidades. Puesto que el periodo de retorno de los movimientos fuertes es mucho mayor que el caso de movimientos débiles, no va a ser práctico que el instrumento haga un registro continuo.

2.1. El acelerógrafo

El instrumento que se utiliza para registrar los movimientos fuertes del suelo, en el denominado campo cercano, y que satisface las características anteriores, es el **acelerógrafo**. Este equipo, nos va a permitir obtener la aceleración del suelo durante un terremoto, en función del tiempo.

Es un instrumento que posee además una baja amplificación, para evitar la saturación. Como el movimiento sísmico en la proximidad de la fuente tiene un elevado contenido en altas frecuencias, el periodo natural del acelerógrafo puede estar comprendido entre, prácticamente 0 s y 0.1 s. Además, el amortiguamiento oscila entre el 50 y el 100% del amortiguamiento crítico, para conseguir que después de cada oscilación el acelerómetro quede preparado para recibir nuevos movimientos. Por tanto, el sensor con estas características tendrá una curva plana de sensibilidad en aceleración para el citado rango de frecuencias.

En la Figura 2 vemos unas curvas representativas de dos tipos de instrumentos comparadas con la curva teórica de respuesta de un acelerógrafo ideal.

Todos los acelerógrafos, independientemente del tipo de registro (analógicos o digitales), constan de cuatro dispositivos comunes:

1. *Sistema de disparo.* Puesto que el registro del acelerógrafo no es continuo, se encuentra en una situación de alerta a la espera de una excitación que lo ponga en funcionamiento. Para ello cuenta con un sensor de bajo consumo que se dispara por la llegada de las primeras ondas, cuando estas superan un umbral de aceleración y frecuencia al que ha

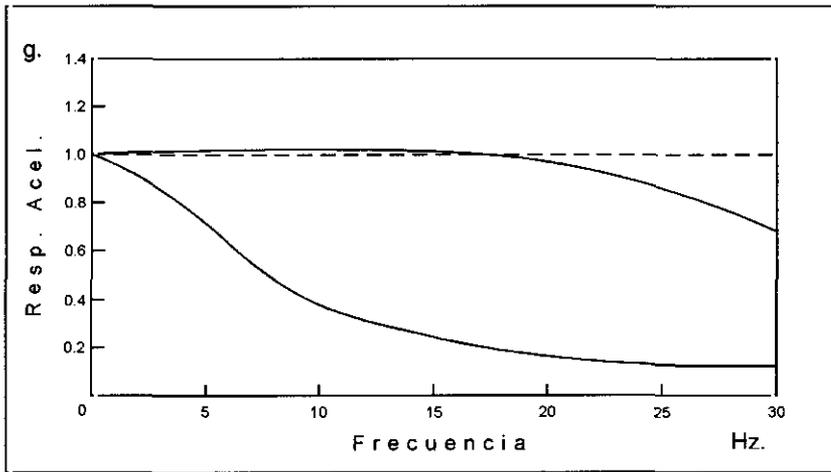


Figura 2. Respuesta de un acelerógrafo. La línea discontinua correspondería a un acelerógrafo perfecto, mientras que las continuas muestran la respuesta de dos acelerógrafos: el superior para 25 Hz. de frecuencia natural y amortiguamiento 0.6, y el inferior para 7 Hz. y amortiguamiento 1.

sido ajustado previamente. De esta forma se consigue que la pérdida de información sea pequeña, y se consigue alta autonomía y fácil mantenimiento.

Para evitar esa pequeña pérdida de información anterior a la superación del umbral prefijado, los acelerógrafos digitales cuentan con una memoria pre-evento, por la que la señal procedente del sensor es continuamente digitalizada e introducida en una memoria cíclica, y cuando se detecta un valor de aceleración igual o superior a la de disparo se acciona el sistema de registro, guardándose primero la información que hay en memoria. De esta forma no se pierden las primeras llegadas de los eventos, y se obtienen registros completos.

2. *Sensor y transductor.* Ambos forman un cuerpo común, y convierten la energía del movimiento del suelo en otro tipo de energía, bien sea mecánica, electromagnética o electrónica.
3. *Sistema de registro.* Es el encargado de almacenar los eventos que se producen. Puede ser de varios tipos:
 - Registro gráfico directo: sobre película fotográfica.
 - Registro en cinta magnética.
 - Registro en memoria de estado sólido. Es el más utilizado.

4. *Sistema de tiempo.* Nos permite hacer un registro simultáneo del tiempo. Además de contar con un reloj interno de cristal de cuarzo, que no está relacionado con ninguna base de tiempo absoluto, puede estar conectado a un receptor de tiempo GPS.

3. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL DISEÑO DE UN ACELERÓGRAFO

La esencia del funcionamiento de un acelerógrafo, tiene la misma base en que se fundamenta todo instrumento de registro de ondas sísmicas.

3.1. Sismómetro mecánico o inercial

Considerando el esquema de la Figura 3. Consideremos el soporte del instrumento anclado al suelo, y sobre él existe una regla graduada correspondiente al sistema de registro, que nos permite medir el desplazamiento de la masa vibrante en función del tiempo. El sensor es un simple oscilador armónico amortiguado de un solo grado de libertad, que está formado por una masa, m , suspendida de un mecanismo elástico de constante K (fuerza/desplazamiento), y sujeta a un sistema amortiguador de coeficiente c (fuerza/velocidad).

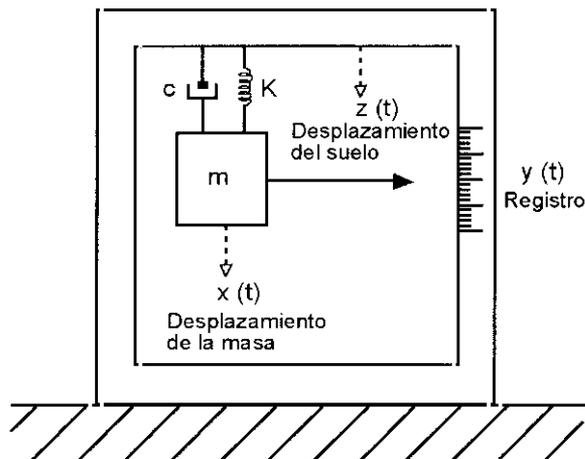


Figura 3. Esquema de funcionamiento de un sismómetro mecánico.

Si se aplica una excitación al suelo, tendremos que $z(t)$ es la función temporal del desplazamiento absoluto del suelo (y del soporte que es solidario al mismo), $x(t)$ del desplazamiento absoluto que experimenta la masa, e $y(t)$ del desplazamiento relativo de la masa respecto al suelo. El registro que se obtiene del instrumento (una vez amplificado), es $y(t)$ que viene dado como:

$$y(t) = x(t) - z(t) \quad [3]$$

La ecuación del movimiento del sistema, viene dada según la segunda ley de Newton, por lo que tendremos:

$$\begin{aligned} m \cdot \bar{a} &= \sum_i \bar{F}_i \\ m \cdot \ddot{x} &= -c \cdot \dot{y} - K \cdot y \\ m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{y} + K \cdot y &= 0 \end{aligned} \quad [4]$$

siendo $c\dot{y}$ la fuerza de amortiguamiento (proporcional a la velocidad y de signo opuesto), y $-ky$ la fuerza recuperadora del resorte.

Puesto que sabemos que la frecuencia angular propia del sistema no amortiguado es $\omega_n = \sqrt{K/m}$, podemos deducir que $\omega_n^2 = \frac{K}{m}$, y por tanto:

$$K = \omega_n^2 \cdot m \quad [5]$$

Igualmente conocemos que el factor de amortiguamiento es $\xi = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_n}$, de donde deducimos que:

$$c = 2 \cdot \xi \cdot m \cdot \omega_n \quad [6]$$

Si sustituimos estas dos expresiones [5] y [6], en la anterior [4], obtenemos que:

$$m \cdot \ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot m \cdot \omega_n \cdot \dot{y} + m \cdot \omega_n^2 \cdot y = 0$$

y dividiendo por m nos queda:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \dot{y} + \omega_n^2 \cdot y = 0 \quad [7]$$

De la ecuación [1] deducimos que:

$$\begin{aligned}x(t) &= y(t) + z(t) \\ \dot{x}(t) &= \dot{y}(t) + \dot{z}(t) \\ \ddot{x}(t) &= \ddot{y}(t) + \ddot{z}(t)\end{aligned}\quad [8]$$

Por tanto nos queda que:

$$\ddot{y} + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \dot{y} + \omega_n^2 \cdot y = -\ddot{z}\quad [9]$$

Para caracterizar el comportamiento de un sistema, se utiliza su función de transferencia, que es la obtenida al dividir la señal de entrada por la de salida cuando ambas se expresan como funciones complejas de la frecuencia. Es con la transformación de Fourier con la que pasamos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, consiguiendo así expresiones más simples, ya que la convolución se corresponde con una multiplicación, y la integración y derivación se corresponden con una división o multiplicación, respectivamente por $i\omega$, siendo i la unidad imaginaria.

Si denominamos:

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

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

$z(t)$ = desplazamiento del suelo

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

tendremos que la función de transferencia en desplazamiento del sistema, o sensibilidad en desplazamiento (S_d) viene dada como:

$$S_d = \frac{Y(\omega)}{Z(\omega)}\quad [10]$$

que por ser una función compleja podemos descomponer en dos funciones (módulo y argumento):

$$S_d = M(\omega) \cdot e^{i\phi(\omega)}\quad [11]$$

siendo $M(\omega)$ la respuesta en amplitud o magnificación, y $\phi(\omega)$ la respuesta en fase.

Si a la ecuación [7] le aplicamos la transformada de Fourier en ambos miembros:

$$L[y(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \cdot e^{-i\omega t} dt = Y(\omega)$$

$$L[z(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} z(t) \cdot e^{-i\omega t} dt = Z(\omega)$$

obtenemos la expresión:

$$-\omega^2 \cdot Y(\omega) + 2 \cdot i \cdot \omega_n \cdot \omega \cdot \xi \cdot Y(\omega) + \omega_n^2 \cdot Y(\omega) = -(-\omega^2 \cdot Z(\omega))$$

de donde:

$$S_d = \frac{Y(\omega)}{Z(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega_n^2 + 2 \cdot i \cdot \omega_n \cdot \omega \cdot \xi - \omega^2} \quad [12]$$

siendo ω la frecuencia angular del movimiento del suelo.

Si separamos el módulo y el argumento de la ecuación [12], obtenemos:

$$M(\omega) = \frac{|Y(\omega)|}{|Z(\omega)|} = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \omega)^2}} \quad [13]$$

$$\phi(\omega) = \text{arc. tg} \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \omega}{\omega^2 - \omega_n^2} \quad [14]$$

que se representan gráficamente en la Figura 4, para distintos valores de amortiguamiento.

Cualquier sismógrafo puede ser considerado como un registrador de desplazamientos, velocidades o aceleraciones del suelo; es solo la forma de su curva característica de respuesta lo que, sobre una banda de frecuencias determinada, le clasifica como más apto para una u otra clase de medidas.

Análogamente a la sensibilidad en desplazamiento, podemos definir la sensibilidad en velocidad y aceleración, obteniéndose:

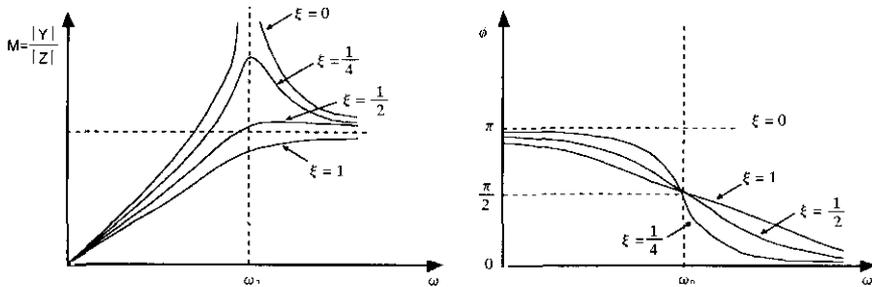


Figura 4. Sensibilidad en desplazamiento del sismómetro mecánico, para diferentes amortiguamientos, representado por las curvas de respuesta en amplitud y de respuesta en fase.

$$S_v(\omega) = \frac{Y(\omega)}{i \cdot \omega \cdot Z(\omega)} = \frac{S_d(\omega)}{i \cdot \omega}$$

$$S_a(\omega) = \frac{Y(\omega)}{-\omega^2 \cdot Z(\omega)} = \frac{S_d(\omega)}{-\omega^2}$$

Y considerando solamente la respuesta en amplitud obtenemos:

$$M(\omega) = \omega \cdot |S_v(\omega)| = \omega^2 \cdot |S_a(\omega)|$$

Para construir un instrumento para registro sísmico, tendremos en cuenta que nos interesa trabajar en un rango de frecuencias con respecto a la frecuencia natural donde la magnificación permanezca constante, lo que significa que no debe depender mucho de la frecuencia (estaremos en la parte plana del espectro).

Por eso es común hacer una representación en un diagrama bilogarítmico de las gráficas asintóticas (Fig. 5), para cada una de las sensibilidades: M , S_v , S_a , considerando un sistema muy amortiguado ($\xi = 0.6 \leftrightarrow 0.7$). Obtenemos así unas rectas de intervalos de frecuencia, de modo que en cada intervalo la magnificación será constante.

Como puede verse (Fig. 5), el sistema mecánico que hemos definido será adecuado para medir desplazamientos cuando las frecuencias de vibración del suelo, ω , sean mayores que la frecuencia de resonancia del sistema, ω_n . Sin embargo, cuando la frecuencia ω sea menor que la propia del sistema ($\omega \ll \omega_n$), estaremos registrando aceleraciones, y el instrumento definido será un acelerógrafo.

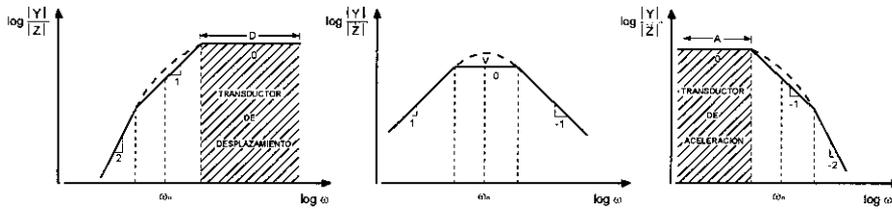


Figura 5. Gráficas asintóticas aproximadas para un sistema mecánico muy amortiguado ($\xi > 0.6$) (Blázquez, 1982).

Podemos ver que este dispositivo no será útil para registrar velocidades, ya que la zona aparentemente plana para S_v se corresponde con la banda de resonancia del sistema.

3.2. Transductor electromagnético

Se utiliza para obviar las limitaciones de los sensores mecánicos, como su baja sensibilidad, el registro en papel fotográfico, o su gran tamaño. El transductor electromagnético nos va a permitir trabajar con distintos sistemas de amplificación electrónica y de registro.

Como vemos en el esquema de la Figura 6, tenemos una bobina solidaria a la masa del sismómetro y un imán fijo a la carcasa (o viceversa). Al moverse la bobina dentro del campo magnético creado por el imán, se induce entre los bornes de la bobina una fuerza electromotriz $V(t)$.

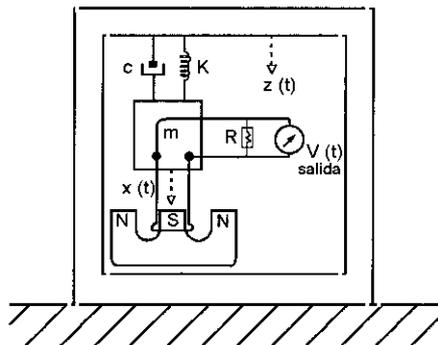


Figura 6. Esquema de funcionamiento de un sismómetro con transductor electromagnético.

La magnitud que ahora podemos observar y medir, es el potencial, ya que la diferencia de potencial creada es proporcional a la velocidad relativa $\dot{y}(t)$ de la bobina respecto del imán:

$$V(t) = -G \cdot \frac{dy}{dt} \tag{15}$$

siendo G una constante de proporcionalidad.

Como el registro es proporcional a $\dot{y}(t)$, tendremos que la magnificación del transductor electromagnético es:

$$|S_d(\omega)|_{(T.E.)} = M(\omega)_{(T.E.)} = \frac{|\dot{Y}(\omega)|}{|Z(\omega)|} = \frac{\omega \cdot |Y(\omega)|}{|Z(\omega)|} = \omega \cdot M(\omega)$$

y análogamente:

$$|S_v(\omega)|_{(T.E.)} = \frac{|\dot{Y}(\omega)|}{|Z(\omega)|} = \frac{|Y(\omega)|}{|Z(\omega)|} = M(\omega)$$

$$|S_a(\omega)|_{(T.E.)} = \frac{|\dot{Y}(\omega)|}{|\ddot{Z}(\omega)|} = \frac{|Y(\omega)|}{\omega \cdot |Z(\omega)|} = \frac{M(\omega)}{\omega}$$

Análogamente al caso anterior, podemos hacer una representación de las gráficas asintóticas para cada una de las sensibilidades (Fig. 7), y en ellas observamos que este instrumento no es adecuado para registrar desplazamientos ni aceleraciones. la respuesta es proporcional a la velocidad del suelo cuando la frecuencia de vibración es superior a la del instrumento.

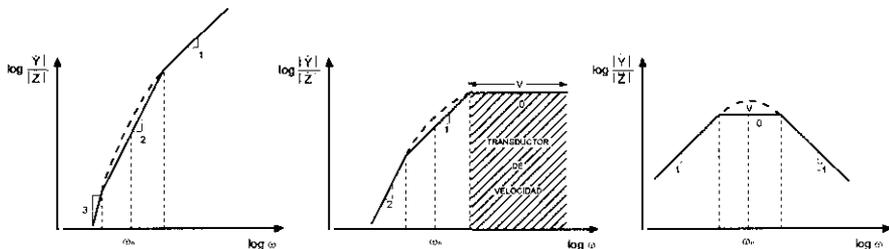


Figura 7. Gráficas asintóticas aproximadas para un sismómetro electromagnético.

Puesto que nuestro objetivo es poder medir aceleraciones, será necesario ecualizar la respuesta del sensor para conseguir una respuesta plana en aceleración dentro de la zona de interés ($\omega \ll \omega_n$). La ecualización la realizaremos por medio de un circuito electrónico que actúa como un filtro paso-bajas sobre la respuesta del sensor, y cuya función de transferencia en amplitudes es:

$$H(\omega) = \frac{1}{\left(1 + \frac{\omega^2}{\omega_c^2}\right)^{1/2}} \quad [16]$$

siendo ω_c la frecuencia de corte.

La respuesta final del sistema (Fig. 8), será el producto de la del sensor por la del ecualizador, quedando:

$$M_T(\omega) = |S_a(\omega)| \cdot H(\omega) \quad \text{Voltios/ms}^{-2}$$

obteniéndose una respuesta plana para frecuencias de trabajo por encima de la frecuencia de corte, y por debajo de la natural del sistema.

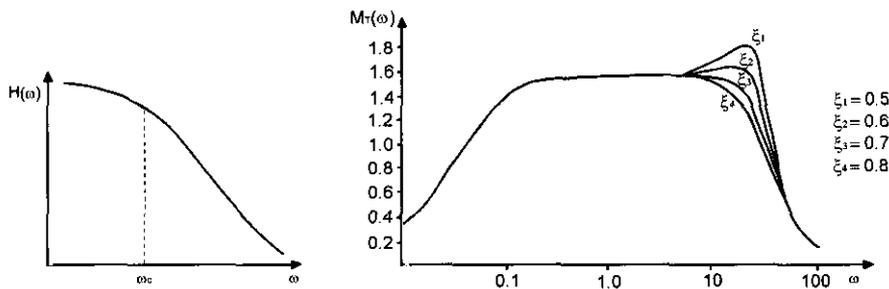


Figura 8. A la izquierda, curva de respuesta del ecualizador. A la derecha, curva de respuesta del sistema sensor más ecualizador.

3.3. Transductor electrónico

Los acelerógrafos digitales actuales, en lugar de un sensor electromagnético convencional, llevan un sensor de tipo captador: el **servoacelerómetro** o acelerómetro de equilibrio de fuerzas (“force-balance accelerometer”). Para

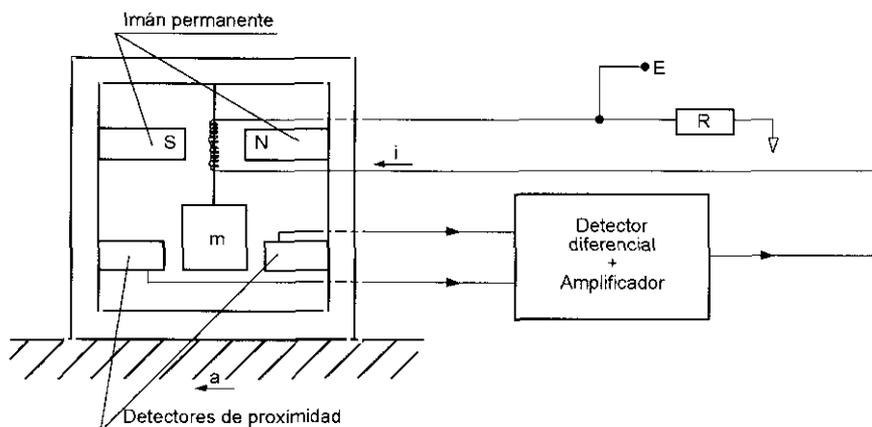


Figura 9. Esquema de funcionamiento de un servoacelerómetro.

su diseño, se parte de un sistema electromagnético similar al anterior, en el que se introduce un sistema de realimentación (Fig. 9).

Suponemos una aceleración horizontal $a(t)$ en la base del acelerógrafo (Fig. 9). La masa m tiende a sufrir un desplazamiento relativo respecto a la carcasa del instrumento que es solidaria al suelo, y cuando los detectores de proximidad detectan el movimiento, se induce en la bobina una corriente de intensidad I que origina una fuerza opuesta al movimiento de la masa, obligándola a que permanezca en reposo.

La fuerza de inercia asociada a la aceleración del suelo es:

$$F = m \cdot a \quad [17]$$

y la fuerza generada por la corriente I es:

$$F_I = B \cdot l \cdot n \cdot I \quad [18]$$

siendo B la intensidad del campo magnético que crea el imán, l la longitud de una espira, y n el número de espiras de la bobina. Los tres son constantes del instrumento.

Cuando se consigue el equilibrio de fuerzas, tendremos:

$$F = F_I$$

$$m \cdot a = B \cdot l \cdot n \cdot I$$

con lo que:

$$I = \frac{m}{B \cdot l \cdot n} a \quad [19]$$

Tenemos entonces, que la intensidad I es proporcional a la aceleración absoluta del suelo, por lo que midiendo I obtenemos los valores instantáneos de a .

Estos sensores tienen un mejor comportamiento dinámico que los acelerómetros electromagnéticos, porque la masa siempre está en reposo. Además tienen mayor linealidad, mayor rango dinámico y mejor respuesta en frecuencias por la ausencia de frecuencias resonantes, y mayor inmunidad al ruido.

4. TRATAMIENTO DE ACELEROGRAMAS

Para obtener una determinación lo más exacta posible de los valores de aceleración que se han producido durante el terremoto en el lugar de registro, es necesario hacer un cuidadoso tratamiento de los registros. Puesto que los datos que se recogen en campo están en un formato original propio del acelerógrafo (binario), será necesario hacer una conversión de los mismos a formato ASCII con el que, generalmente trabajaremos.

El acelerograma obtenido, presenta una serie de errores que deberán ser corregidos para que dicho acelerograma sea apto para ser utilizado. En la Figura 10 vemos el registro en sus tres componentes, sin corregir, de un sismo de magnitud 4.3.

4.1. Correcciones sobre los acelerogramas

Corrección instrumental: Consiste en la convolución del registro con la función de transferencia del instrumento. Debemos conocer para ello las constantes de calibración del instrumento, como son la sensibilidad del acelerómetro, la frecuencia natural ω_n , y el amortiguamiento ξ , obteniéndose así un acelerograma corregido.

Corrección de la línea base o corrección de ceros: A veces, ocurre que los valores del acelerograma se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración. Este error puede ocurrir porque el acelerógrafo no esté perfectamente nivelado en su emplazamiento, o bien porque el sistema de registro provoque una deriva de los datos respecto a la línea de base. Aunque este error puede ser inapreciable en aceleración, puede ser muy importante cuando se

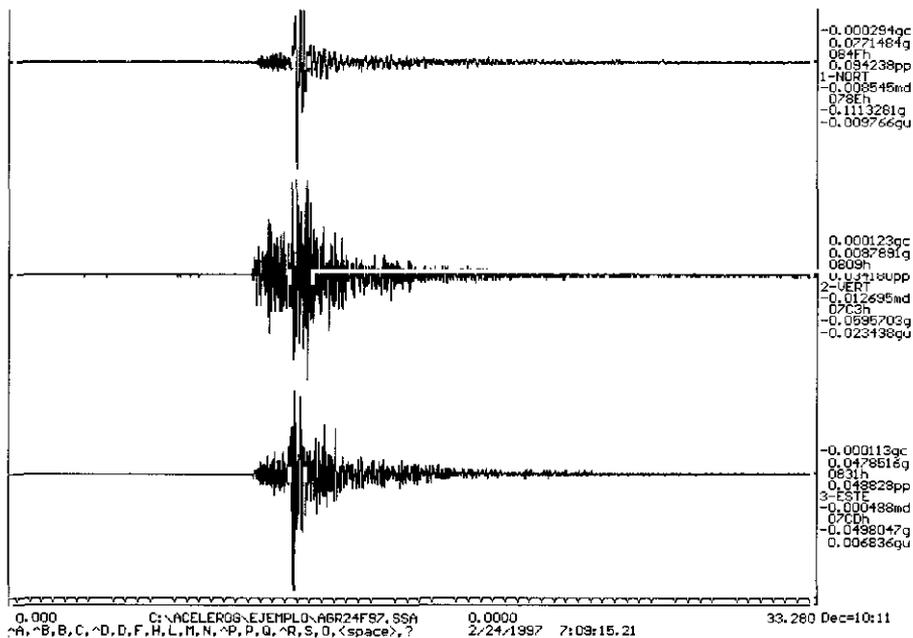


Figura 10. Visualización del fichero binario correspondiente a un acelerograma obtenido en el acelerógrafo de Agrón (GR), el 24/02/97. Corresponde al terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR), de $m_B = 4.3$.

obtienen la velocidad y el desplazamiento por integración, ya que estamos contabilizando el área que hay entre la curva de aceleración y la línea de base.

Para hacernos una idea de cómo afecta este error, suponemos un desplazamiento constante del acelerograma respecto a la línea base de 0.001 g (Fig. 11). Al integrar con este error, obtendríamos un incremento lineal de la velocidad, que si volvemos a integrar nos da un incremento parabólico del desplazamiento. Así, el error cometido en desplazamiento cuando han transcurrido 20 segundos, será de 196 cm. En la figura se ha exagerado este efecto, ya que en este caso se trata de tratamiento de acelerogramas analógicos que se han digitalizado manualmente.

4.2. El ruido y los filtros

Una vez que nuestro acelerograma ha sido corregido tanto de línea base como de corrección instrumental, habrá que tener en cuenta la repercusión

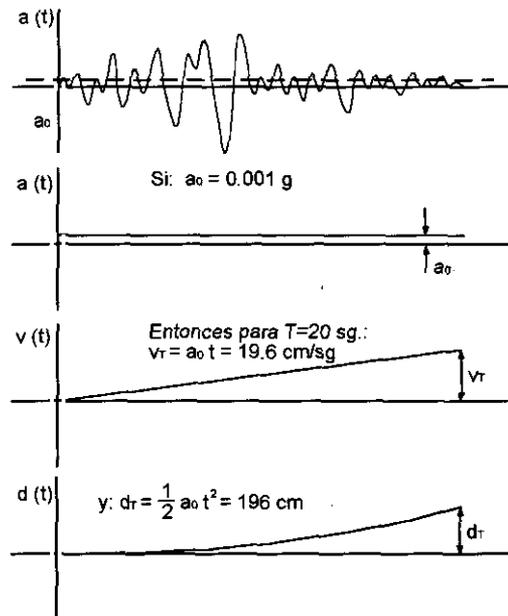


Figura 11. Error de ceros en el acelerograma (Hudson, 1979).

que el ruido tiene sobre el acelerograma. Este ruido puede estar causado tanto por fenómenos naturales como por el tratamiento de los datos. Así, podremos considerar que el acelerograma es la suma de la señal sísmica más el ruido,

$$a(t) = s(t) + r(t) \quad [20]$$

siendo $a(t)$ el acelerograma sin corregir, $s(t)$ la señal sísmica y $r(t)$ el ruido.

El ruido que afecta al acelerograma (Fig. 12), puede ser de dos tipos:

- a) *Ruido de alta frecuencia*: cuando aparece por encima de la banda de frecuencias con la que trabajamos. Este ruido afecta a los picos de aceleración fundamentalmente. Sin embargo, no afecta mucho en el proceso de integración, ya que el área bajo la curva es prácticamente la misma que para la señal corregida, dado que las desviaciones por encima y por debajo se compensan.
- b) *Ruido de baja frecuencia*: cuando éste aparece por debajo de la banda de frecuencias con la que trabajamos. Afecta al proceso de integración básicamente, ya que al integrar la aceleración para obtener velocidad y desplazamiento, estamos calculando el área bajo la curva.

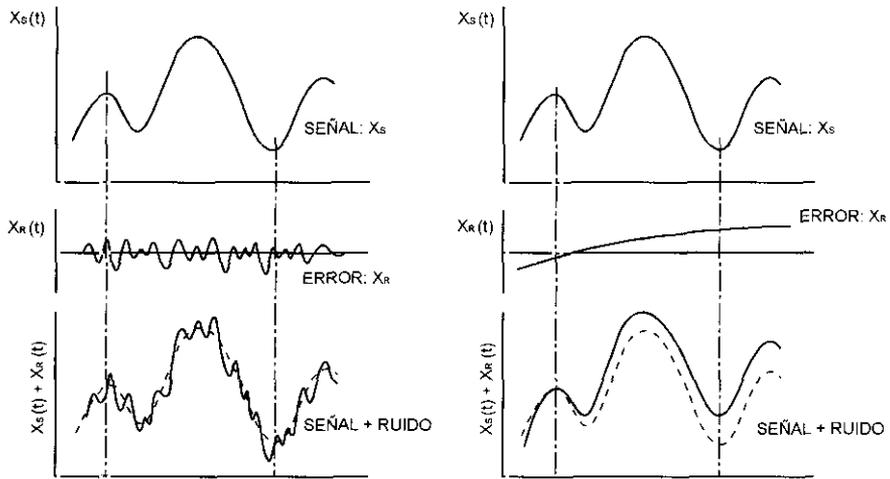


Figura 12. A la izquierda, efecto del ruido de alta frecuencia. A la derecha efecto del ruido de baja frecuencia (Hudson, 1979).

Puesto que no queremos que estos errores nos afecten, limitaremos la información a la banda de frecuencias deseada, en lugar de mantener información adicional a mayores y menores frecuencias, que pueden contener gran número de errores. Para hacerlo, se utilizan los filtros paso-baja para eliminar altas frecuencias, y los paso-alta para eliminar las bajas. Los filtros paso-banda, eliminan el ruido de alta y baja frecuencia simultáneamente.

Lo más importante a la hora de aplicar los filtros, es elegir la frecuencia de corte adecuada, ya que una mala elección puede suponer eliminar parte de la señal que nos interesa, o por el contrario no eliminar el ruido de la señal. Por eso, es necesario tener un buen conocimiento de los espectros de Fourier.

El filtrado de la señal se hace multiplicando el espectro del acelerograma por una función que reduzca el valor de la amplitud del espectro de Fourier fuera de la banda donde están contenidas las frecuencias importantes de nuestra señal. En esa banda, el filtro deja las amplitudes inalterables.

Si aplicamos la transformada de Fourier a la ecuación [20] nos da:

$$A(\omega) = S(\omega) + R(\omega) \quad [21]$$

Si $H(\omega)$ es una función filtro:

$$H(\omega) \cdot A(\omega) = H(\omega) \cdot S(\omega) + H(\omega) \cdot R(\omega) \quad [22]$$

que en la banda de frecuencias que consideramos, se puede aproximar a:

$$S(\omega) \cong H(\omega) \cdot A(\omega) \quad [23]$$

4.3. Filtros ideales

Los filtros ideales, son aquellos que están definidos como una función escalón, del siguiente modo:

- Filtro ideal paso-bajas: Elimina todas las frecuencias superiores a una dada ω_0 , y deja pasar sin atenuación las frecuencias inferiores.
- Filtro ideal paso-altas: Elimina todas las frecuencias inferiores a una dada ω_0 , y deja pasar sin atenuación las frecuencias superiores.
- Filtro ideal paso-banda: Elimina todas las frecuencias inferiores a una dada ω_1 , y las superiores a ω_2 , y deja pasar sin atenuación las comprendidas entre ω_1 y ω_2 . Un ejemplo gráfico de todos ellos lo vemos representado en la Figura 13.

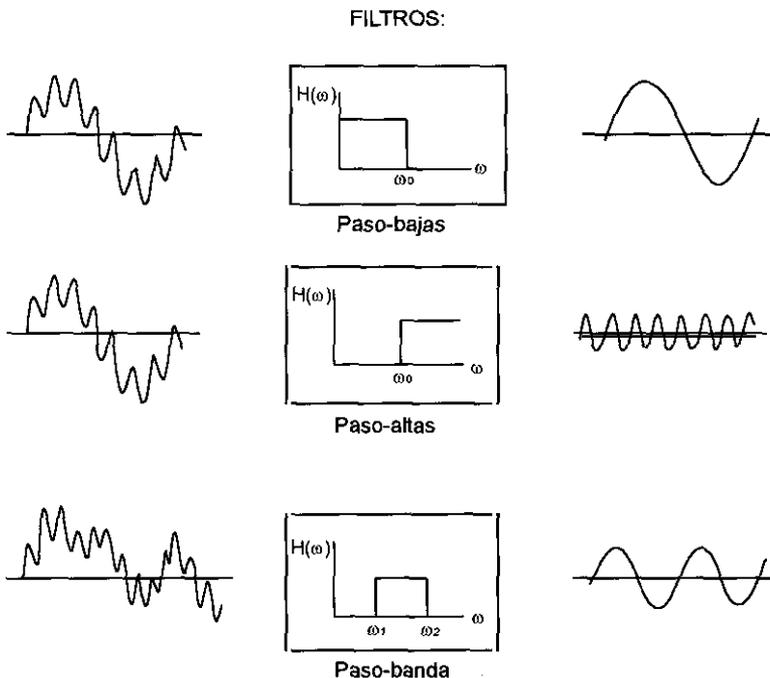


Figura 13. Comportamiento de los filtros ideales paso-bajas, paso-altas y paso banda.

Pero en la práctica, estos filtros ideales no se pueden utilizar, ya que su función de transferencia en el tiempo es de longitud infinita. Sin embargo, se utilizan aproximaciones a ellos, con filtros tales como el “box car” o “Bartlett”, el “Hanning”, el “Butterworth frecuencial” o los filtros gaussianos (Fig. 14).

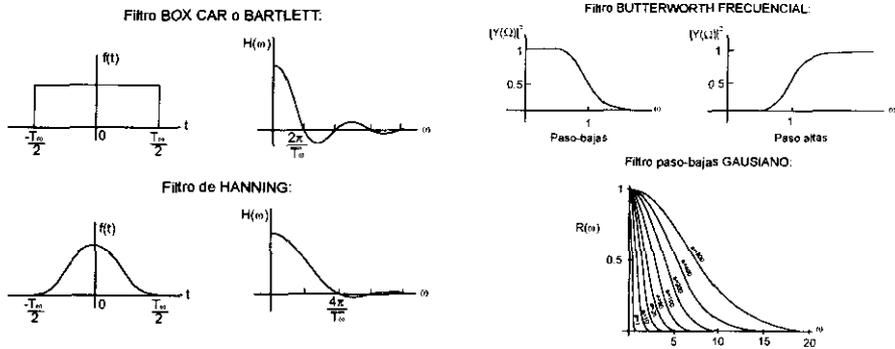


Figura 14. Ejemplo de algunos filtros digitales.

Filtro Ormsby

El filtro digital más utilizado, es el filtro Ormsby, que es una aproximación a un filtro ideal en el dominio de las frecuencias, y que además tiene definición en el dominio del tiempo. Si consideramos el caso del filtro Ormsby paso-bajas, la expresión matemática de la función de transferencia, viene dada por:

$$\begin{aligned}
 H(\omega) &= & \text{si } \omega < \omega_c \\
 H(\omega) &= \frac{\omega_t - \omega}{\omega_t - \omega_c} & \text{si } \omega_c < \omega < \omega_t \\
 H(\omega) &= & \text{si } \omega > \omega_t
 \end{aligned}$$

siendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ la frecuencia angular, donde f es la lineal; ω_c es la frecuencia de corte y ω_t la frecuencia de terminación.

Su forma gráfica la podemos ver en la figura de la Figura 15.

Este filtro se aplica en el dominio del tiempo mediante la convolución de la señal con la respuesta temporal del filtro:

$$s'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau \tag{24}$$

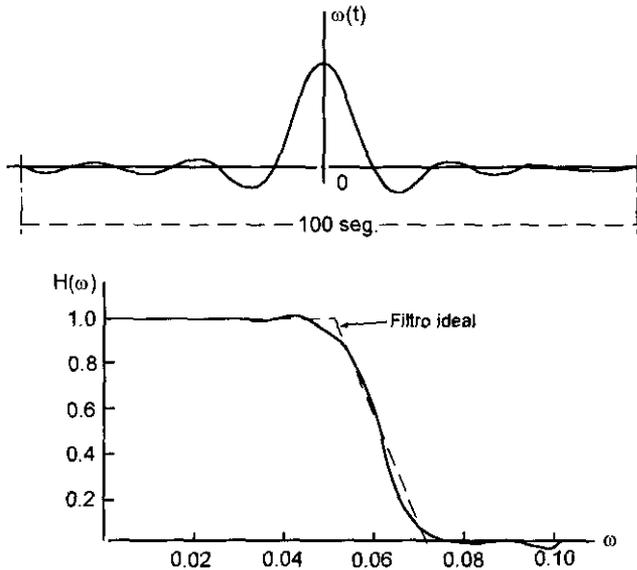


Figura 15. Filtro Ormsby.

siendo $s'(t)$ la señal filtrada, $s(t)$ la señal sin filtrar y $h(t)$ la respuesta temporal del filtro.

Una de las principales ventajas del filtro Ormsby, es que nos permite conocer el error que cometemos respecto a la función de transferencia ideal.

El filtro Ormsby paso-altas, se define como:

$$1 - H(\omega)$$

El filtro Ormsby paso-banda, es una combinación de ambos, y precisa de dos pares (ω_c, ω_l) .

5. INTEGRACIÓN DE ACELEROGRAMAS

Una vez que el registro temporal de aceleración ha sido convenientemente corregido para su posterior utilización, es preciso integrarlo para obtener los registros de velocidad y desplazamiento (Fig. 16). Si consideramos el dominio del tiempo, la integración se hace por métodos numéricos, teniendo en cuenta que:

$$\vec{v} = \int_{t_0}^t \vec{a} \cdot dt + \vec{v}_0 \quad [25]$$

$$\vec{r} = \int_{t_0}^t \vec{v} \cdot dt + \vec{r}_0 \quad [26]$$

Cada integración suaviza los componentes más altos del movimiento de las ondas, por lo que los registros de velocidad y desplazamiento son más simples y permiten una interpolación directa de los patrones de las ondas. Así, los impulsos de los primeros movimientos mayores de la onda S aparecen de forma inequívoca en los registros de velocidad, mientras que en los registros de desplazamiento se puede apreciar la presencia de un impulso de largo periodo asociado con el paso de la dislocación cerca del emplazamiento.

El pico de máxima velocidad nos da una clara medida del contenido de frecuencias intermedias del terremoto. Los picos de desplazamiento, muestran las características de largo periodo del movimiento. Por tanto, con los tres valores pico (de aceleración, velocidad y desplazamiento), tenemos una importante descripción del movimiento del suelo, mostrando cada uno una región diferente del espectro de frecuencias.

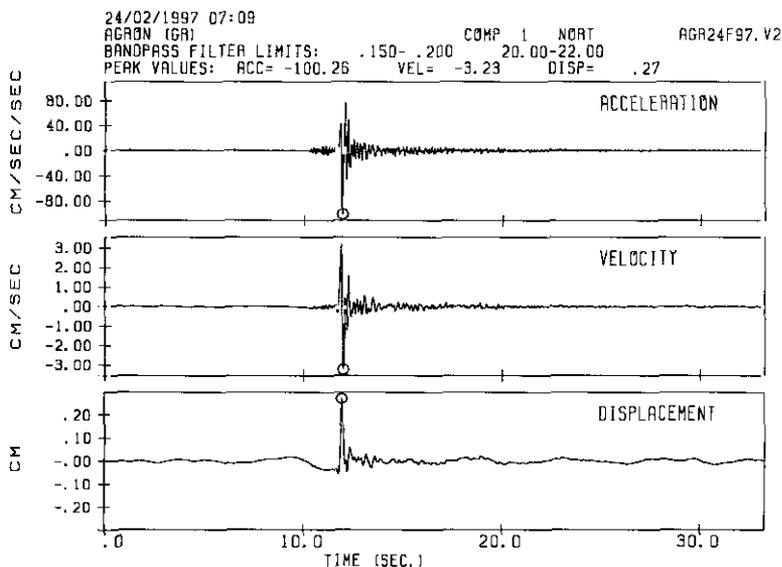


Figura 16. Aceleración, velocidad y desplazamiento, obtenidos a partir del acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97. Terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR), de $m_B = 4.3$.

En el dominio de la frecuencia, la integración se reduce a dividir la aceleración por $-i \cdot \omega$ para hallar la velocidad y por ω^2 para hallar el desplazamiento:

$$L[a(t)] = A(\omega) \cdot e^{i\phi(\omega)} \quad [27]$$

$$L[v(t)] = \frac{1}{i \cdot \omega} A(\omega) \cdot e^{i\phi(\omega)} \quad [28]$$

$$L[d(t)] = \frac{-1}{\omega^2} A(\omega) \cdot e^{i\phi(\omega)} \quad [29]$$

5.1. Análisis frecuencial

Una vez que se han obtenido los registros de velocidad y desplazamiento, es necesario hacer un análisis del contenido en frecuencias del acelerograma. Para ello, se utilizan el espectro de Fourier y el espectro de respuesta.

Espectro de Fourier

El espectro de Fourier, es un parámetro que nos proporciona un amplio conocimiento acerca de cual es el contenido en frecuencias del acelerograma, de modo que para cada periodo de oscilación del acelerograma se representa la amplitud máxima que le corresponde (Fig. 17).

El espectro de Fourier en amplitudes, se define matemáticamente como:

$$FS = \sqrt{\left[\int_0^t a(\tau) \cos(\omega \cdot \tau) \cdot d\tau \right]^2 + \left[\int_0^t a(\tau) \sin(\omega \cdot \tau) \cdot d\tau \right]^2} \quad [30]$$

De la interpretación del espectro de Fourier, podemos deducir cuales son los periodos más importantes del terremoto (que son los que lo van a caracterizar), sin más que buscar en que lugares se alcanzan los picos de amplitud. Además, podemos ver cual es la **frecuencia o periodo predominante** de un registro, que es aquel para el cual el espectro de Fourier de la aceleración alcanza su valor máximo, y que además mantiene una correlación directa con la distancia epicentral. Se suele representar con ejes logarítmicos, de modo que en el eje de abscisas se colocan los distintos periodos de oscilación, y en el eje de ordenadas se representan las amplitudes en cm/sg.

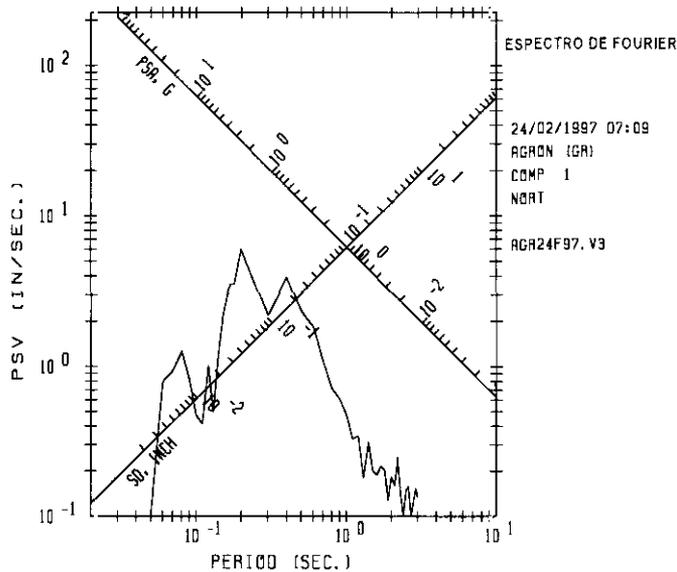


Figura 17. Espectro de Fourier del acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97. Terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR), de $m_b = 4.3$.

Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta de un acelerograma, representa la respuesta máxima de un oscilador de un solo grado de libertad y de masa unitaria, con frecuencia ω_0 y amortiguamiento ξ , cuando se le somete a un movimiento del suelo dado por dicho acelerograma (Fig. 18).

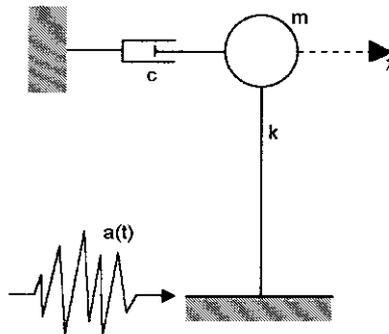


Figura 18. Modelo de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica.

Se suelen considerar distintos periodos propios del oscilador y distintos valores de amortiguamiento, de modo que para un periodo propio T y un amortiguamiento ξ del oscilador, el acelerograma provoca un movimiento cuyos picos de aceleración, velocidad y desplazamiento se recogen en el espectro de respuesta.

La solución de las vibraciones estacionarias de un sistema de un grado de libertad, viene dada por la integral de Duhamel, donde $x(t)$ es función de ξ , ω , y $a(t)$:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega_{\xi}} \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi \cdot \omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_{\xi}(t-\tau)] \cdot d\tau \quad [31]$$

donde:
$$\omega_{\xi} = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$$

que derivando nos da la historia de la respuesta en velocidades:

$$\dot{x}(t) = \left[-\int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi \cdot \omega(t-\tau)} \cos[\omega_{\xi}(t-\tau)] \cdot d\tau \right] - \xi \cdot \omega \cdot x(t) \quad [32]$$

y derivando de nuevo se obtiene la respuesta en aceleraciones:

$$\ddot{x}(t) + a(t) = \left[\omega_{\xi} \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi \cdot \omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_{\xi}(t-\tau)] \cdot d\tau \right] - 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot \dot{x}(t) - (\xi \cdot \omega)^2 \cdot x(t) \quad [33]$$

El espectro de respuesta en desplazamiento, velocidad o aceleración, será el conjunto de máximos valores de las respuestas del sistema:

$$S_d^r(\omega, \xi) = |x(t)|_{max} \quad [34]$$

$$S_v^r(\omega, \xi) = |\dot{x}(t)|_{max} \quad [35]$$

$$S_a^r(\omega, \xi) = |\ddot{x}(t) + a(t)|_{max} \quad [36]$$

donde S_d^r y S_v^r son los máximos de desplazamiento y velocidad relativos y S_a^r es el máximo de aceleración total del oscilador de un grado de libertad.

Puesto que estos valores requieren un largo proceso de cálculo, se han hecho simplificaciones para aligerarlo, obteniéndose los pseudoespectros de respuesta, que vienen dados por las siguientes expresiones:

$$S_d(\omega, \xi) = \left| -\frac{1}{\omega_\xi} \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi \omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_\xi(t-\tau)] \cdot d\tau \right|_{max} \quad [37]$$

$$S_v(\omega, \xi) = \left| -\int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi \omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_\xi(t-\tau)] \cdot d\tau \right|_{max} \quad [38]$$

$$S_a(\omega, \xi) = \left| \omega_\xi \int_0^t a(\tau) \cdot e^{-\xi \omega(t-\tau)} \text{sen}[\omega_\xi(t-\tau)] \cdot d\tau \right|_{max} \quad [39]$$

Como se puede ver, sin más que calcular S_d , podemos calcular S_v y S_a , ya que:

$$S_v = \omega_\xi \cdot S_d \quad [40]$$

$$S_a = \omega_\xi^2 \cdot S_d \quad [41]$$

Tanto para calcular los espectros sísmicos de respuesta como los pseudo-espectros sísmicos de respuesta, es necesario realizar el cálculo numérico de la integral de Duhamel [31], haciéndose determinadas simplificaciones que dan una buena aproximación y reducen sensiblemente el coste numérico.

Una forma simple y elegante de representar el espectro de respuesta, es mediante un diagrama trilogarítmico de cuatro entradas en el que aparece el pseudoespectro de velocidad frente al periodo T o frecuencia ω , y en las líneas a 45° se representan los valores constantes de pseudoaceleración absoluta para pendiente 1, y desplazamientos constantes relativos para pendiente -1 .

Además, el espectro de respuesta se suele representar para distintos valores del amortiguamiento (Fig. 19).

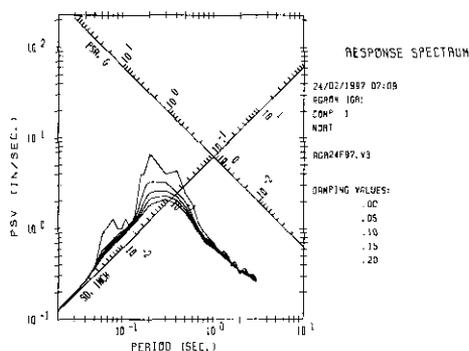


Figura 19. Espectro de respuesta del acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97. Terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR), de $m_B = 4.3$.

No obstante, a veces es conveniente representar con ejes reales y por separado, los distintos espectros de aceleración, velocidad o desplazamiento, y hacerlo para aquellos valores de amortiguamiento que se consideraran necesarios (Fig. 20).

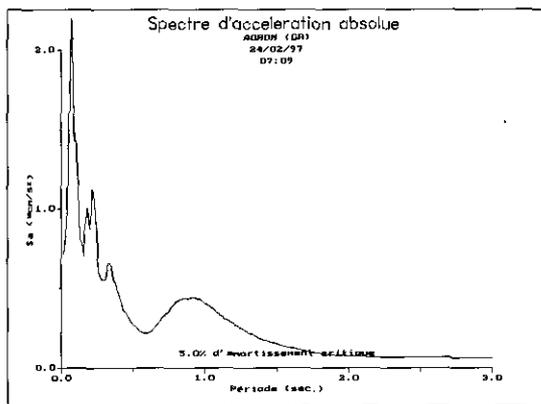


Figura 20. Espectro de aceleración para un amortiguamiento del 5%, correspondiente al acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97. Terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR), de $m_b = 4.3$.

También se utilizan mucho los gráficos normalizados, en los que se divide el valor del pseudoespectro de aceleración por el valor pico de aceleración en el origen, ya que estos gráficos normalizados son los que se comparan con la norma sismorresistente de construcción (Fig. 21).

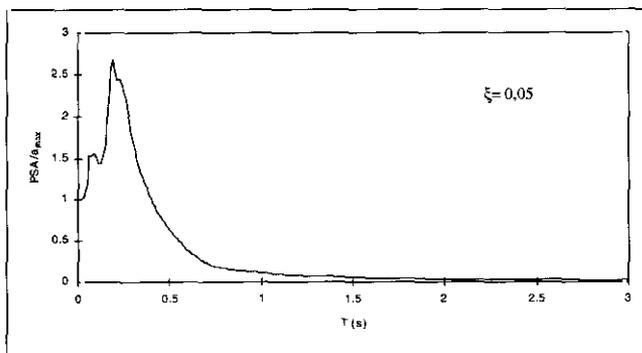


Figura 21. Espectro de respuesta en aceleración normalizado para un amortiguamiento del 5%, correspondiente al acelerograma registrado en Agrón (GR) el 24/02/97. Terremoto con epicentro en Ventas de Huelma (GR), de $m_b = 4.3$.

El gráfico se representa normalizado, es decir, colocando en el eje de abscisas los valores del tiempo transcurrido en segundos, y en el eje de ordenadas los valores acumulativos que representa el cociente:

$$\frac{I_t}{I_A} = \frac{\frac{\pi}{2g} \int_0^{t'} a^2(t) \cdot dt}{\frac{\pi}{2g} \int_0^{t_j} a^2(t) \cdot dt} \quad [43]$$

Intensidad Espectral o Intensidad de Housner

Puesto que el espectro de respuesta define los valores máximos de la respuesta sísmica de estructuras de un grado de libertad para un determinado rango de periodos, se puede deducir que el área bajo el espectro entre dos periodos cualesquiera constituye una medida de la respuesta media de las estructuras en ese rango de periodos.

Por eso, Housner definió una medida de la energía local del movimiento que provoca un terremoto, a la que llamó **intensidad espectral**.

Los límites de integración y el valor de ξ se eligen de forma que incluyan el rango de periodos más habitual en el diseño sismorresistente de las estructuras de edificación, por lo que son normales los valores de 0.1 y 2.5 sg. como límites de integración, y un valor de ξ entre 0.05 y 0.2.

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) \cdot dT \quad [44]$$

siendo T el periodo del oscilador, S_v el espectro de pseudovelocidad, y ξ el coeficiente de amortiguamiento.

Para la interpretación de la intensidad espectral o **intensidad de Housner**, hay que señalar que en el espectro de respuesta de cada periodo de vibración se puede asociar a una altura determinada de un edificio, por lo que podemos determinar que vibraciones pueden hacer entrar en resonancia a una estructura determinada. Por lo tanto, la intensidad de Housner se utiliza como un parámetro que mide el daño medio que sufren las estructuras.

BIBLIOGRAFÍA

AKI, K. (1967). "Scaling law of seismic spectrum". *Journal of Geophysical Research*, vol. 72, pp. 1217-1231.

- ARIAS, A. (1969). "A measure of earthquake intensity in seismic design for nuclear power plants". *Massachusetts Institute of Technology Press*. Cambridge.
- BLÁZQUEZ, R. (1982). "Instrumentación sísmica de obras civiles". *MOPU - Centro de estudios y experimentación de Obras Publicas - Laboratorio de carreteras y geotecnia*. Madrid.
- BLÁZQUEZ, R.; CARREÑO, E.; MARTÍN, A. J. y SUÁREZ, A. (1997). "Análisis de acelerogramas de la serie de Adra. Diciembre 93-enero 94". Monografía. *International Center for Numerical Method Engineering (CIMNE) Universidad Politécnica de Cataluña*. Barcelona.
- BOLT, B. A. (1989). "Estudio de los movimientos sísmicos fuertes del suelo". En el libro: *Física de la Tierra*, número 1, pp. 11-50. *Universidad Complutense de Madrid*. Madrid.
- CABAÑAS, L. y BLÁZQUEZ, R. (1997). "Análisis de los integradores temporales en el procesado de acelerogramas". *Revista internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 2,1, pp. 59-73.
- CANET, J. M. y BARBAT, A. H. (1988). "Estructuras sometidas a acciones sísmicas". *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*. Barcelona.
- CARREÑO, E.; LÓPEZ, C.; MARTÍNEZ-SOLARES, J. M.; PELÁEZ, J. A.; TEJEDOR, J. M. Y MEZCUA, J. (1989). "Análisis de los acelerogramas del terremoto de 24 de junio de 1984". *Instituto Geográfico Nacional: Publicación técnica n.º 22*. Madrid.
- CARREÑO, E.; SUÁREZ, A. y MARTÍNEZ-SOLARES, J. M. (1995). "Red de acelerógrafos del Instituto Geográfico Nacional". *Revista Ingeniería Civil - CEDEX*, n.º 100, pp. 67-100.
- CARREÑO, E.; SUÁREZ, A.; MARTÍN, A. J. y BLÁZQUEZ, R. (1996). "Engineering parameters of spanish accelerograms. Comparison with code provisions". Paper n.º 1778. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering (11 WCEE)*. Acapulco (México).
- HOUSNER, G. W. (1975). "Measures of severity of earthquake ground shaking". *Proc. U. S. National Conference Earthquake Engineering*. Ann Arbor, Michigan.
- HUDSON, D.E. (1979). "Reading and interpreting strong motion accelerograms". *Earthquake Engineering Research Institute*. Pasadena, California.
- HUSID, R. L. (1969). "Análisis de terremotos: Análisis general". *Revista del IDIEM*, n.º 8, pp. 21-42. Santiago (Chile).
- KUMAR, A.; BASU, S. y CHANDRA, B. (1996). "Critical evaluation of various steps in processing of strong motion data". Paper n.º 150. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering (11 WCEE)*. Acapulco (México).
- MARTÍN, A. J.; CARREÑO, E. e IZQUIERDO, A. (1996). "Análisis de la atenuación de aceleraciones de la serie de Adra de 1993 y 1994". En el libro: *Avances en Geofísica y Geodesia*, Vol. 1, pp. 115-123. *Instituto Geográfico Nacional*. Madrid.

- OLIVEIRA, C. S. (1989). "Variabilidad de los movimientos fuertes del suelo según el Array «SMART-1»". En el libro: Física de la Tierra, número 1, pp. 155-198. *Universidad Complutense de Madrid*. Madrid.
- ROCA, A. M. (1989). "Instrumentación para campo cercano y análisis de acelerogramas". En el libro: Física de la Tierra, número 1, pp. 131-153. *Universidad Complutense de Madrid*. Madrid.