

Simulador sísmico de seis grados de libertad. Técnicas de compensación analógicas y numéricas

FRANCISCO NAVARRO COLOM (*)

RESUMEN El análisis experimental es hoy día el método más fiable de caracterizar el comportamiento dinámico de las estructuras, tanto para determinar los parámetros reales que definen la respuesta (rigidez y amortiguamiento), como para valorar y contrastar métodos de cálculo numérico. El equipo básico a utilizar, especialmente para simular acciones sísmicas, es la mesa vibrante con movimiento servocontrolado de todos sus grados de libertad. La precisión del movimiento y la compensación de las interacciones mesa-modelo físico ha llevado al desarrollo de diferentes técnicas de compensación, tanto analógicas (acoplamiento geométrico cruzado, momento volcador, momento de rotación, etc.) como numéricas (filtrado, transformadas en el dominio de la frecuencia, inversión de la matriz de funciones complejas de transferencia, etc.).

SEISMIC SIMULATOR OF SIX DEGREES OF FREEDOM. ANALOGICS AND NUMERIC COMPENSATION TECHNIQUES

ABSTRACT Nowadays, the experimental analysis is the most reliable method to characterize the dynamic behaviour of the structures, as well to determine the real parameters which define the reply (damping and rigidity), as to contrast the numerical calculus methods. The seismic simulator device is the basic equipment to develop the mentioned analysis. The movement accuracy and the compensation of the interactions between the seismic simulator and the physical model have achieved the development of the different compensation techniques, as analogics like the geometric cross coupling, the overturning moment and the off center load, as numerics like the filtering, the transforms in the frequency domain and the inversion of the matrix of transfer complex functions.

Palabras clave: Ingeniería Sísmica; Simulación; Mesa vibrante; Técnicas de compensación; Funciones de transferencia.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la fórmula de equilibrio dinámico en fuerzas:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p \quad (1)$$

el comportamiento de las estructuras queda caracterizado por tres conceptos fundamentales: masa, rigidez y amortiguamiento. Según se trate de sistemas de uno o n grados de libertad estamos ante parámetros o matrices de dimensión $n \times n$ respectivamente.

La precisión de cualquier modelo que se aplique en el cálculo está limitada por la precisión con que definamos las matrices correspondientes. En general, la masa del sistema, m , es bien conocida, salvo casos particulares (depósitos elevados de líquidos, con pérdida de contenido; edificios con fachadas revestidas de masa apreciable que se desprenden durante el movimiento, etc.). No obstante, en el caso de sobrecargas variables importantes comparadas con el peso propio, hay que considerar la influencia que tienen sobre la respuesta dinámica, no sólo en amplitud sino en frecuencia y formas modales.

La matriz de rigidez dinámica de una estructura, k , depende de la geometría y de las características resistentes del material utilizado, y su fiabilidad será la de estos parámetros. Especialmente en el caso de hormigón armado, existen factores de difícil definición que afectan al valor de la rigidez (fisuración de secciones resistentes, posición y número de las armaduras utilizadas, confinamiento del hormigón, etc.).

Por último, el valor del amortiguamiento, c , es el más impreciso de los tres, con simplificaciones ya en el planteamiento de la ecuación de la dinámica (utilización de fuerzas viscosas, ortogonalidad de la matriz de amortiguamiento como combinación lineal de las de masa y rigidez), y valores empíricos que varían en un rango muy amplio. Su efecto, especialmente para estructuras poco amortiguadas, es muy fuerte en la amplitud de las oscilaciones del sistema.

La existencia de estas imprecisiones es más evidente aún en el comportamiento no lineal del material. Tanto la rigidez post-elástica como el amortiguamiento estructural y el desarrollo de la degradación por fatiga dependen, prácticamente, de cada caso particular.

ENSAYOS DINÁMICOS EN MODELO

La vía más adecuada para la definición de estos parámetros es el análisis experimental, tanto a escala de modelo

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPTMA).

como en prototipo. El ensayo en modelo tiene las ventajas del trabajo en laboratorio: condiciones controladas, fiabilidad en la toma de datos, reproducibilidad, comodidad de ejecución, etc. Sin embargo, los equipos de simulación sísmica (y de ensayos dinámicos de estructuras en general) son escasos en laboratorios de ensayos, y podrían calificarse de instalaciones singulares.

Básicamente, un simulador sísmico consta de una mesa habitualmente cuadrada, de alta rigidez, fabricada en acero o aluminio (inicialmente se montaron mesas de hormigón pretensado), movida por varios actuadores que la someten a un movimiento previamente programado. La mayoría de simuladores utilizan actuadores electrohidráulicos, aunque en mesas de poca masa y alta frecuencia, pueden usarse vibradores electrodinámicos. En cualquier caso, el movimiento de los actuadores debe ser servocontrolado, para una respuesta en frecuencia fiable. El parámetro fundamental de definición es el número de grados de libertad capaz de reproducir el sistema simultáneamente, tanto de traslación como de giro. La simulación completa de cualquier movimiento necesita seis grados como mínimo, y si se pretende simular el movimiento espacial producido por un sismo en la superficie del terreno, son necesarios tres grados de traslación al menos. Sin embargo, problemas de control (acoplamientos geométricos, resonancias, respuesta en frecuencia, etc.) aconsejan utilizar seis grados de libertad para un simulador sísmico que reproduzca las tres componentes del movimiento.

El Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX ha instalado recientemente un simulador sísmico de seis grados de libertad cuyas características se indican en la tabla 1, que permite la excitación simultánea e independiente de seis movimientos: dos traslaciones horizontales y una vertical, y dos giros de basculamiento y una torsión respecto al eje vertical, fotografías 1, 2 y 3.



FOTOGRAFÍA 1. Simulador sísmico de 6 grados de libertad del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MOPTMA).



FOTOGRAFÍA 2. Electrónica de control y toma de datos.



FOTOGRAFÍA 3. Ensayos de recepción con un modelo rígido de 6 Tn de masa.

SIMULADOR SÍSMICO DEL LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES (CEDEX)

a) Dimensiones y grados de libertad

Mesa de paneles de acero de 1 cm de espesor, reforzado en las zonas de introducción de cargas por los actuadores.

Peso: 5.500 Kg en vacío

Dimensiones: 3 m x 3 m x 0,8 m

Grados de libertad: 6 g d 1,3 desplazamientos y 3 giros

Sistema de soporte estático centrado por pistón neumático, con rótulas esféricas

b) Actuadores

Horizontales: 4 Actuadores de 146,8 kN de carga máxima

Desplazamiento dinámico: 203,3 mm

Desplazamiento estático: 292,1 mm

Servoválvula de tres etapas con servocontrol y circuito de pilotaje

Caudal máximo de la servoválvula: 260 l/m

Características de movimiento horizontal con un modelo de 10 tn:

Aceleración pico: ± 1 g, para $f > 2$ Hz

Velocidad pico: $\pm 0,8$ m/s, para $2 \text{ Hz} > f > 1,2$ Hz

Desplazamiento pico: $\pm 0,1$ m, para $f < 1,2$ Hz

Aceleración máxima horizontal, mesa vacía: 2,5 g, para $f > 5$ Hz

Verticales: 4 Actuadores de 146,8 kN de carga máxima

Desplazamiento dinámico: 101,6 mm

Desplazamiento estático: 139,7 mm

Servoválvula de tres etapas con servocontrol y circuito de pilotaje

Caudal máximo de la servoválvula: 260 l/m

Características de movimiento vertical con un modelo de 10 tn:

Aceleración pico: ± 2 g, para $f > 6,5$ Hz

Velocidad pico: $\pm 0,8$ m/s, para $6,5 \text{ Hz} > f > 1,5$ Hz

Desplazamiento pico: $\pm 0,05$ m, para $f < 1,5$ Hz

Aceleración máxima vertical, mesa vacía: 5 g, para $f > 15$ Hz

c) Hidráulica

Presión de operación: 207 bares

Dos bombas en paralelo

Caudal máximo: 700 l/m

Red hidráulica principal en tubería de acero de 10 cm de diámetro

Red independiente de pilotaje de servoválvulas

Red independiente de drenaje de actuadores y servoválvulas

Sistema de acumuladores de pistón en la red hidráulica principal, de un volumen aproximado de 160 litros

d) Cimentación

Cimentación flotante por masa de inercia de 700 Tn

Apoya sobre 16 cajines neumáticos de 45 Tn de carga máxima cada uno

Amortiguadores telescópicos entre masa de inercia y losa de apoyo

Independencia estructural entre losa de apoyo y estructura existente

e) Puente-Grúa

Capacidad: 2,5 Tn

Altura libre máxima en el gancho: 3,5 m

f) Características del modelo a ensayar

Peso máximo: 10 Tn

Momento volcador: 30 mTn

Momento torsor: 10 mTn

Intervalo de frecuencias de uso: 0-60 Hz

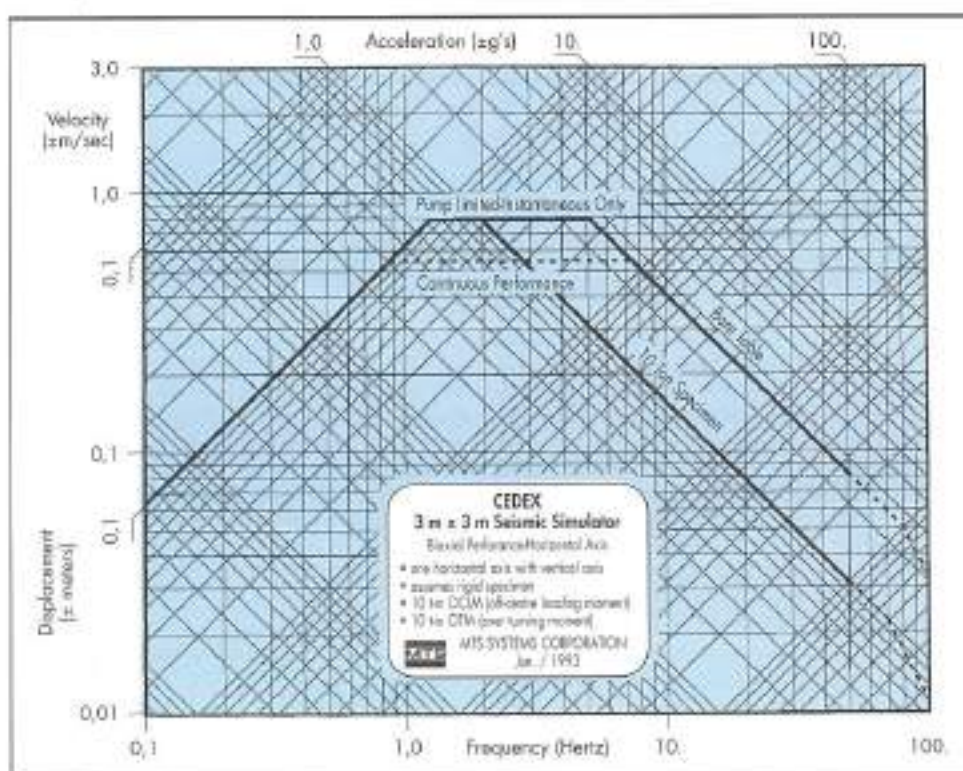
Tipos de señal utilizable: Señal senoidal con barrido de frecuencias, señal aleatoria, seguimiento de señal temporal grabada en el disco del ordenador, síntesis de señales temporales a partir de funciones frecuenciales (espectro de respuesta o densidad espectral de potencia).

Tipos de control: Dos bucles de control: Bucle interior, de definición de la señal de error de las servoválvulas, de tipo analógico con señal compuesta triple (desplazamiento, velocidad y aceleración), y compensación por grados de libertad.

Bucle exterior, de control numérico, de actualización de las f. r. f. cruzados entre grados de libertad por inversión de la matriz de funciones de respuesta y aplicación de la matriz inversa a las señales temporales iniciales.

TABLA 1. Características generales del simulador sísmico del laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (MORTMA).

FIGURA 1. Unites de funcionamiento del simulador sísmico para un movimiento conjunto de los ejes x-z.



El control de cada grado de libertad permite la combinación de cualquiera de los movimientos indicados, con señales de consigna definidas independientemente. En la figura 1 se indican los límites de utilización en función de la frecuencia, para movimiento simultáneo en los ejes X-Z.

CARACTERÍSTICAS DE CONTROL

La utilización de actuadores servohidráulicos supone la definición de un ciclo de servocontrol para cada uno de ellos, con la correspondiente señal temporal de consigna, y los adecuados parámetros de optimización.

Debido a la necesidad de responder a una banda de frecuencias determinada, el tamaño de los actuadores queda limitado a un valor máximo, lo que supone aumentar el número total por encima del número de grados de libertad, que sería el mínimo necesario. Como consecuencia, se produce inevitablemente un acoplamiento geométrico entre ellos, que debe ser compensado por el sistema de control del equipo. Si llamamos v el vector movimientos de la mesa (6×1), y a el de los actuadores (8×1), se puede definir una matriz de cambio de coordenadas M (6×8) tal que:

$$v = M \cdot a \quad (2)$$

Si completamos el vector v con ceros hasta hacerlo de dimensión (8×1) y a la matriz M se adjuntan las dos ecuaciones de acoplamiento mecánico de los movimientos de los actuadores, se puede despejar el valor de los desplazamientos como:

$$a = M^{-1} \cdot v \quad (3)$$

Los valores exactos de los elementos de la matriz son expresiones trigonométricas más o menos complejas, que se

sustituyen por el primer término de su desarrollo en serie. Así, la matriz M es de elementos constantes, por lo que puede utilizarse para cualquier variable cinemática que relacione grados de libertad-actuadores (velocidad, aceleración, señal de error, fuerza, etc.). Los términos de orden superior del desarrollo se compensan posteriormente.

Un simulador sísmico, por otra parte, necesita una respuesta correcta en una banda de frecuencia relativamente ancha, lo que supone la necesidad de cambiar de variable física de control en función de la frecuencia. En nuestro equipo se utiliza el concepto de control triple (fig. 2), por el que se obtienen numéricamente las variables cinemáticas desplazamiento, velocidad y aceleración para cada actuador (a partir de una cualquiera de ellas, que es la señal de consigna correspondiente), y se comparan con las variables físicas instantáneas medidas. La instrumentación de control de la mesa permite medir el desplazamiento (LVDT) y la aceleración, obteniéndose la velocidad a partir de ellas por un circuito electrónico analógico en tiempo real. Los tres valores de error así obtenidos se combinan mediante los factores de ganancia adecuados para definir la señal de mando del grado de libertad correspondiente. La utilización del algoritmo indicado en el párrafo anterior transforma el conjunto de seis señales de grados de libertad en ocho valores de control de las servoválvulas de los actuadores.

En la figura 3 se resumen las relaciones anteriores para el caso de movimiento vertical, cabeceo y balanceo; que son los grados de libertad asociados a los cuatro actuadores verticales del simulador. Como se puede observar, las ecuaciones 2 y 3 se resuelven mediante circuitos amplificadores sumadores y restadores. La utilización de servoválvulas de gama alta, de tres etapas, con servocontrol del distribuidor de la tercera etapa, obliga a utilizar el ciclo final de servocontrol que se indica en cada actuador.

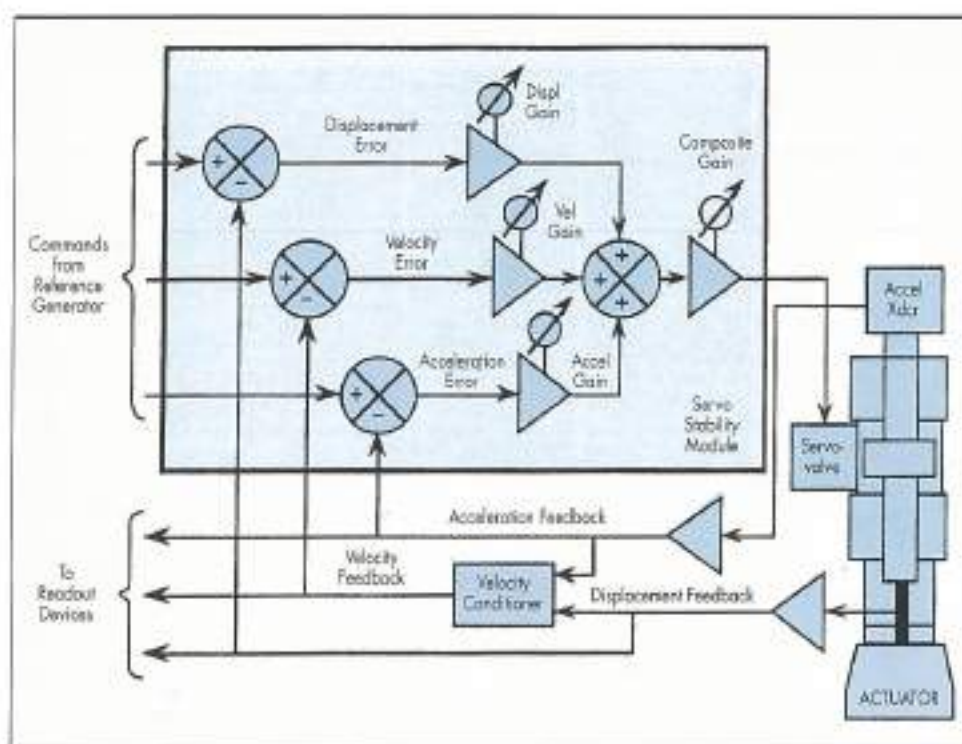


FIGURA 2. Diagrama de funcionamiento de un sistema de control triple.

TÉCNICAS DE COMPENSACIÓN

La función primordial de un simulador sísmico es la reproducción fiel del movimiento impuesto por una o varias señales de consigna, independientemente de las características dinámicas propias del modelo que se esté ensayando. Des-

graciadamente, siempre se produce una interacción entre el modelo y la mesa, de forma que el conjunto electrónica-actuadores-mesa-modelo de ensayo responde como un sistema dinámico aproximadamente lineal, cuya respuesta en frecuencia depende de cualquiera de los sumandos. Las técni-

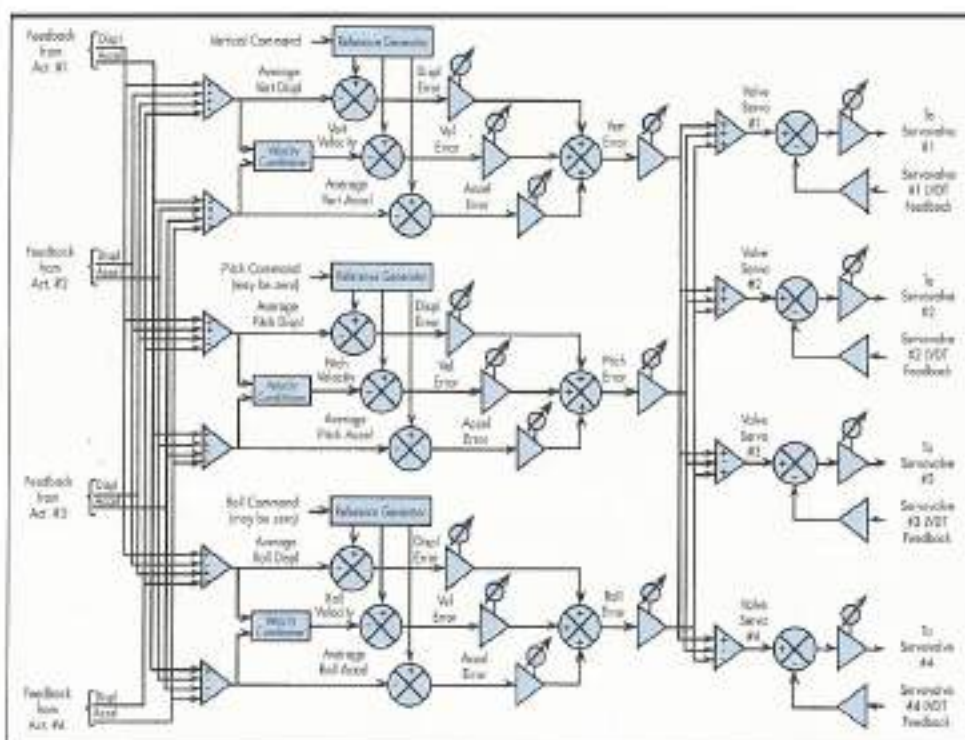


FIGURA 3. Esquema funcional del control de un simulador con cuatro actuadores verticales.

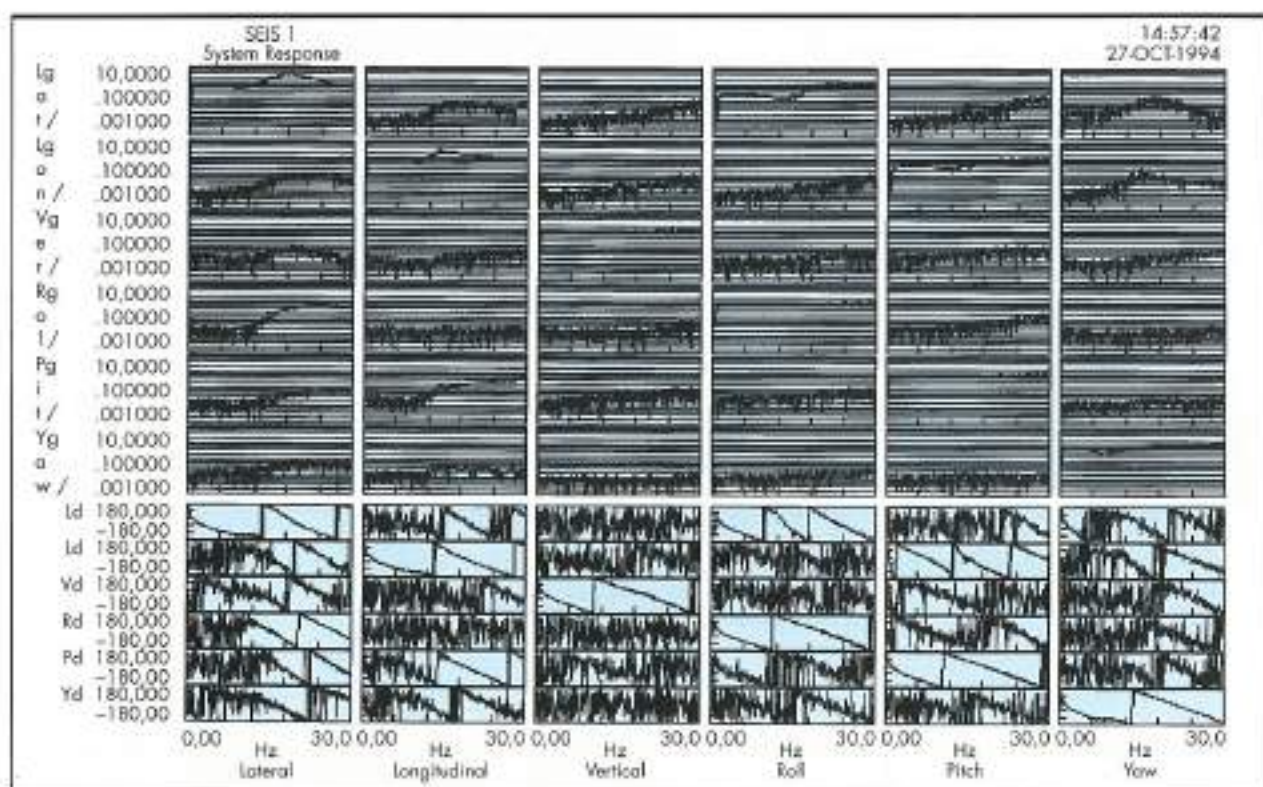


FIGURA 4. Matriz de funciones de respuesta en frecuencia, para 6 grados de libertad.

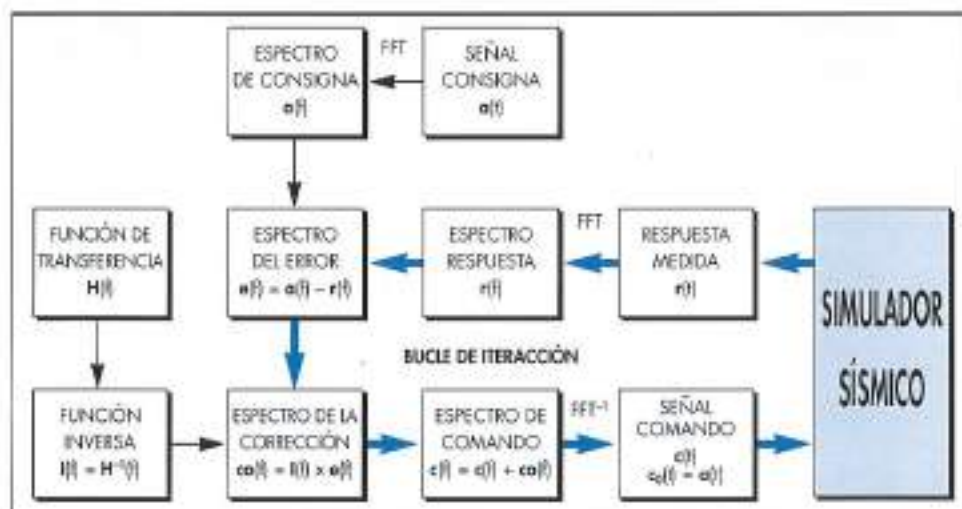
cas de compensación definen qué variaciones deben llevarse a cabo en la electrónica para equilibrar las variaciones impuestas por el resto de los sumandos, en amplitud y fase, y en todos los grados de libertad. El resultado es una función de respuesta uniforme que debe aproximarse a la unidad en toda la banda de frecuencia.

Existen dos tipos de compensación a utilizar: analógica y numérica. La primera se utiliza para la corrección de problemas concretos que produzcan una desviación de la función de transferencia. Los más habituales son:

ACOPLAMIENTO GEOMÉTRICO CRUZADO

Es consecuencia de los términos del desarrollo no tenidos en cuenta en la matriz M de las ecuaciones 2 y 3, y su valor aproximado en desplazamiento es proporcional a X^2/L , siendo X el desplazamiento del grado de libertad que provoca el acoplamiento, y L la separación de los actuadores. Aunque este acoplamiento se produce entre todos los grados de libertad, su efecto más importante en la simulación de un sismo se da en las de traslación, y el sistema electrónico de control incluye los circuitos necesarios para su corrección.

FIGURA 5. Esquema de funcionamiento del programa de corrección numérica.



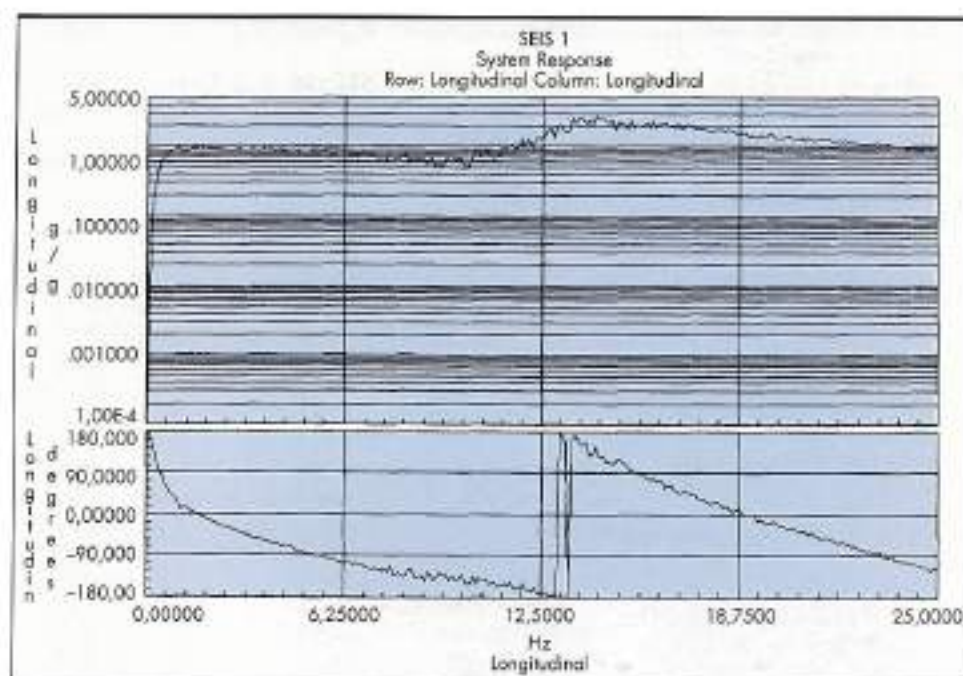


FIGURA 6.1. Función de respuesta en frecuencia del simulador sísmico para el movimiento longitudinal.

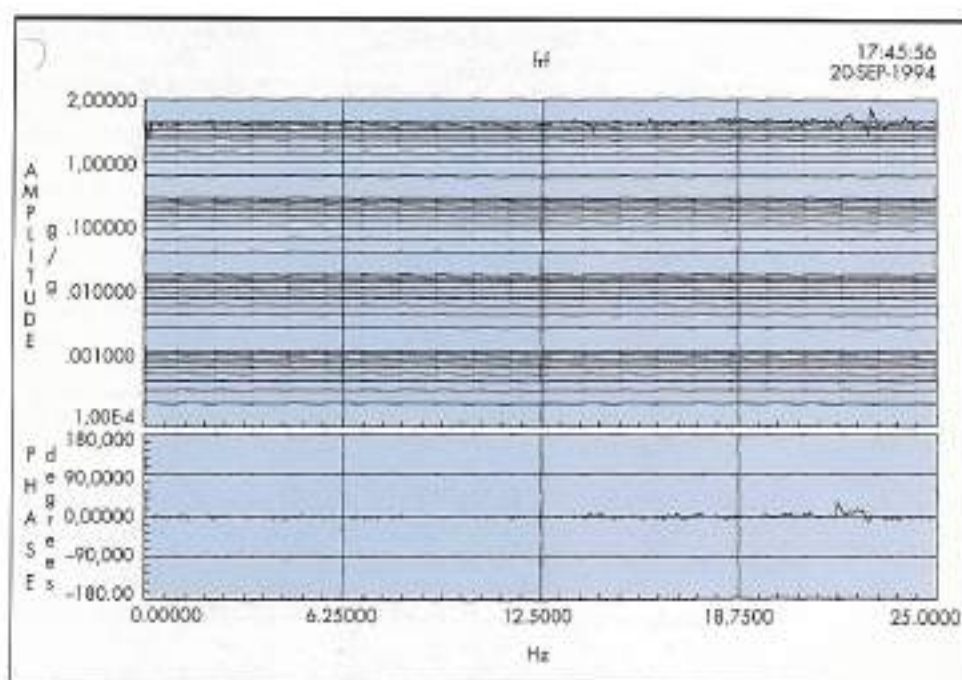


FIGURA 6.2. Función de respuesta en frecuencia tras compensación numérica.

MOMENTO VOLCADOR

Una fuente de posible inestabilidad en un sistema de ensayos sísmicos es el momento volcador que induce un modelo con un centro de gravedad alto. Cuando el modelo es sometido a una aceleración horizontal, la distancia del centro de gravedad a la superficie de la mesa induce un momento volcador que interacciona con el grado de libertad correspondiente (balanceo o cabeceo). Para corregir este efecto, una parte de la fuerza media traslacional, medida en los actuadores correspondientes, es aplicada al giro afectado. Los movimientos que provocan esta interacción son el longitudinal

y el lateral, y los afectados son el giro de balanceo y el de cabeceo. La electrónica permite ajustar la cantidad de señal utilizada en la corrección.

MOMENTO DE ROTACIÓN

Del mismo modo que en el momento volcador, la posición horizontal del centro de gravedad provoca interacciones de los movimientos longitudinal y lateral con la torsión, siempre que dicho centro de gravedad no coincida con el centro geométrico de la mesa. La compensación en este caso también es integrar una parte de la fuerza horizontal producida por

los actuadores en el desplazamiento de torsión. El control permite cambiar el signo de la corrección utilizada, según el centro de gravedad del modelo quede a un lado u otro del centro de la mesa.

BALANCE DE FUERZAS

Una consecuencia de que el simulador tenga mayor número de enlaces que grados de libertad es la posibilidad de posiciones de equilibrio cinemático con grandes valores de fuerza en actuadores individuales. En general, dada la gran rigidez de la mesa, pequeños errores de posición en un grado de libertad pueden dar lugar a grandes fuerzas internas en el sistema mesa-actuadores. Estas fuerzas internas, proporcionadas en último término por el aceite a presión, limitan seriamente la capacidad de aceleración restante para la realización del ensayo. La corrección consiste en calcular un balance de fuerzas para todos los movimientos afectados por un actuador dado, y compensar la señal de control correspondiente.

COMPENSACIÓN NUMÉRICA

Los métodos considerados previamente actuaban individualmente sobre cada acción a corregir, y no se ha considerado el efecto que las características modales de la mesa y el modelo físico tienen sobre la interacción entre ambas. Por ejemplo, el acoplamiento geométrico inducido por un desplazamiento horizontal en el movimiento vertical tiene una frecuencia doble que el original. La respuesta será diferente al acercarnos a la frecuencia de resonancia de la columna de aceite de los actuadores verticales, mientras que en el movimiento horizontal no habremos pasado de la mitad de esa frecuencia. Por otra parte, tanto en los ciclos básicos de servocontrol como en los acoplamientos indicados, se producen efectos en la fase de las diferentes componentes armónicas de la señal, especialmente en las frecuencias de resonancia del sistema. La forma de compensar tanto en amplitud como en fase es la modificación previa de la señal temporal de control, de

acuerdo con la función de respuesta en frecuencia del sistema.

Si llamamos $a(f)$ la transformada de Fourier de la excitación temporal en aceleración para un movimiento determinado, y $r(f)$ la misma transformada para la respuesta temporal del simulador en ese grado de libertad, ambas funciones se relacionan por la ecuación:

$$r(f) = H(f) \cdot a(f) \quad (4)$$

siendo $H(f)$ la función de transferencia de ese grado de libertad. Si definimos un vector de excitación a con las seis acciones de consigna en el dominio de la frecuencia, y un vector respuesta r con los seis movimientos reales de la mesa, podemos expresar:

$$r = H \cdot a \quad (5)$$

La matriz H (matriz de funciones de transferencia) es de dimensión 6×6 y sus elementos son funciones complejas de la frecuencia. Los elementos fuera de la diagonal principal corresponden a las funciones que ligán la señal consigna de un movimiento (fila), con la respuesta en un movimiento distinto (columna); es decir, definen los acoplamientos cruzados entre grados de libertad en amplitud y fase para el dominio de frecuencias considerado. El comportamiento del simulador sísmico en conjunto, incluido el modelo físico a ensayar, queda por tanto definido con la matriz H . En la fig. 4 se indica la matriz H para un modelo rígido de 7 tn. La pendiente aproximadamente constante que se observa en la fase de las funciones de transferencia corresponde al retraso con que actúan los ciclos de servocontrol, prácticamente el mismo en todos los grados de libertad.

Si despejamos el vector a de la ecuación 5, obtenemos:

$$a = H^{-1} \cdot r \quad (6)$$

La matriz I , igual a la inversa de H , es la matriz de compensación de acoplamientos cruzados, que se aplica al error

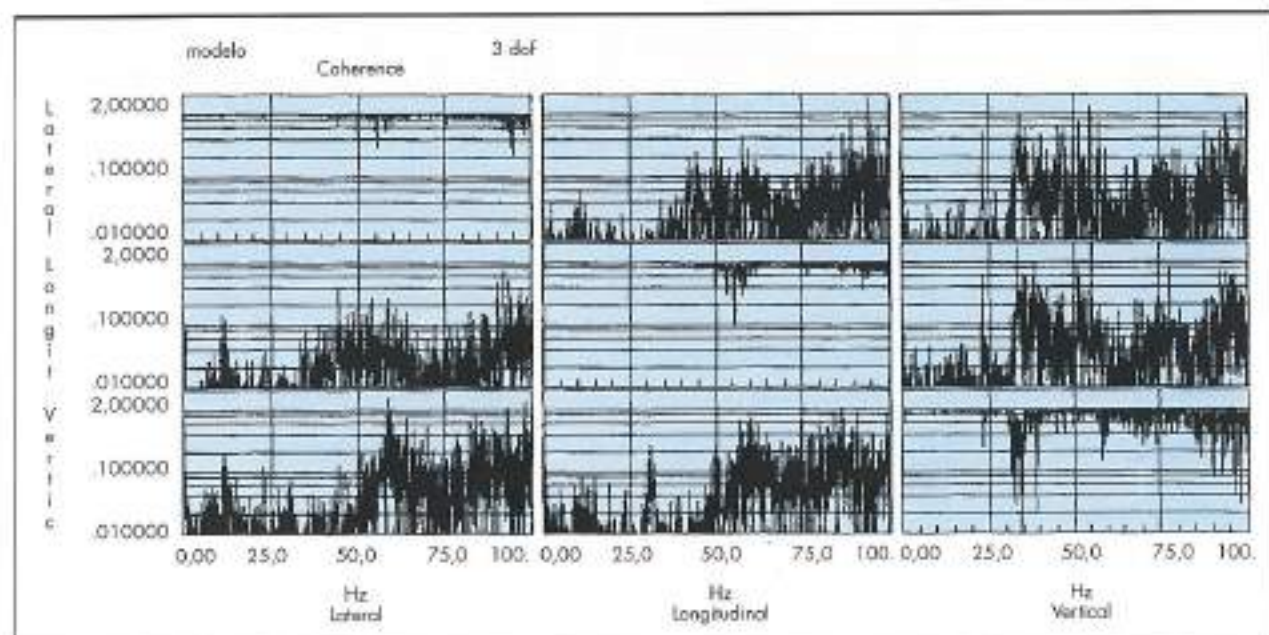


FIGURA 7. Matriz de funciones de coherencia para un modelo de tres grados de libertad.

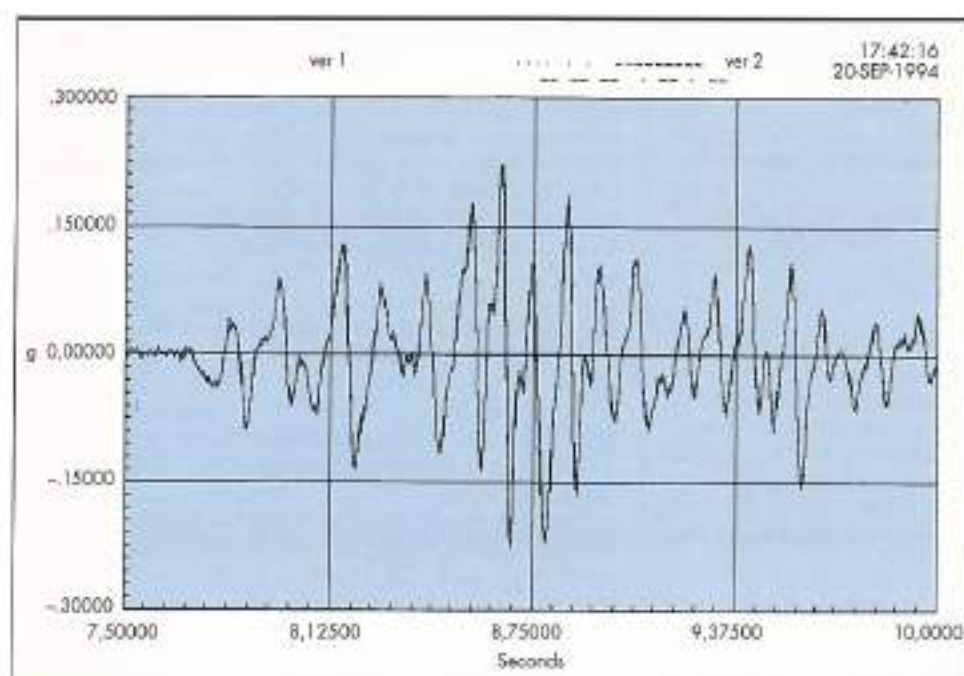


FIGURA 8. Componente vertical del sismo de El Centro [1940]. En línea continua el registro original y en línea de puntos la reproducción del simulador, con un modelo rígido de 6 Tr.

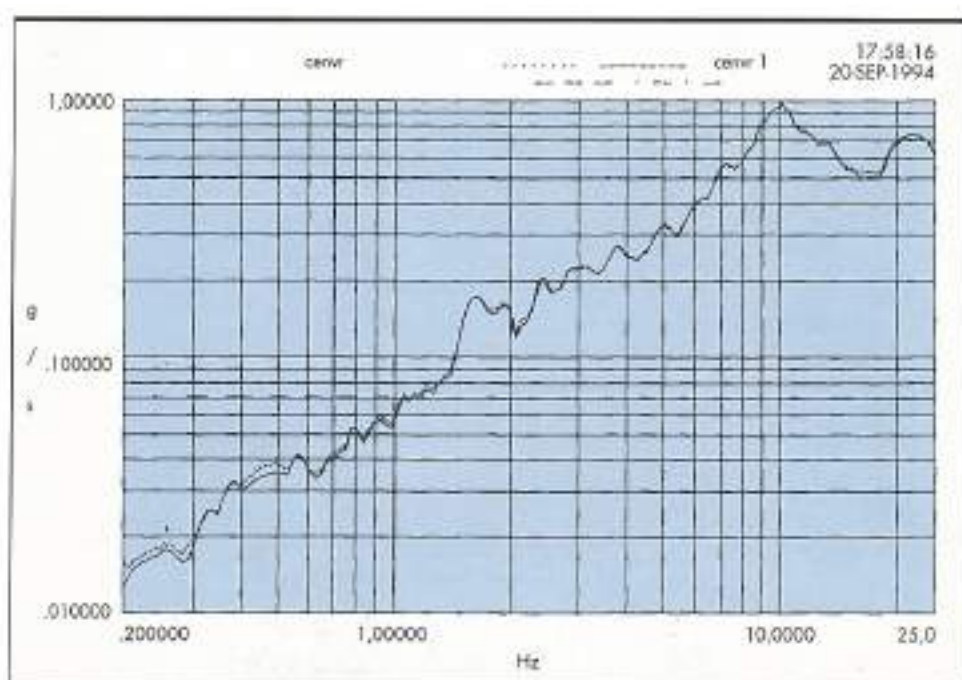


FIGURA 9. Espectros elásticos de respuesta de las dos señales de la figura anterior.

existente entre señal deseada y señal obtenida, en un proceso iterativo de compensación. La fig. 5 recoge el diagrama del algoritmo de control correspondiente. La matriz I está formada por funciones de variable compleja, y se aplica al vector de errores en el dominio de la frecuencia. Antes de utilizar esta señal corregida como consigna del sistema dinámico formado por el simulador sísmico se expresa en el dominio del tiempo mediante la transformada inversa de Fourier.

La fig. 6 muestra las funciones de transferencia del sistema antes y después de la corrección para el movimiento

longitudinal. Las funciones se han calculado con la componente N-S del sismo de El Centro (1940), y puede comprobarse la corrección completa del desfase existente en las distintas componentes armónicas. La frecuencia se limita a 25 Hz por ser la frecuencia de corte del acelerograma utilizada.

Las interacciones indicadas anteriormente corresponden siempre a una relación causa-efecto, esto es, la respuesta para cualquier frecuencia es consecuencia de una señal de mando previa, que es la que se compensa. Sin embargo, existen situaciones en el sistema que no responden a esta

configuración, sino que aparecen espontáneamente voltajes que causan una respuesta del simulador. Las tres causas más frecuentes de este tipo de distorsión son: ciclos de servocontrol mal acondicionados, con resonancias espontáneas, habitualmente por exceso de ganancia; ruido eléctrico por falsas conexiones, fallos en los sensores o deterioro de cables; y deficiencias en la puesta a tierra de la electrónica. En cualquier caso, la corrección debe hacerse en el origen del problema, siendo insensibles a los procesos descritos. La matriz de funciones de coherencia ordinaria (fig. 7) nos da una indicación de la importancia de estas distorsiones parásitas.

Finalmente, todo el proceso debe reflejarse en una señal temporal lo más fiel posible al acelerograma inicial. La figura 8 representa el movimiento vertical del simulador con un modelo rígido de 6 Tn de masa, excitado con la componente vertical del sismo citado anteriormente. En el gráfico se superponen las aceleraciones de consigna y medida realmente. La figura 9 corresponde al mismo movimiento, pero comparando los correspondientes espectros elásticos de respuesta para el 5% de amortiguamiento.

BIBLIOGRAFÍA

RAO, S. S. (1990). "Mechanical Vibrations". Addison-Wesley Publishing.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. (1993). "Dynamics of Structures." Mc Graw-Hill.

WILBY, G. K.; PARK, R.; CARR, A. J. (1982). "Static and dynamic loading tests on two small three-dimensional multi-story reinforced concrete frames." American Concrete Institute, Ph. SP-73.

REA, D.; PENZIEN, J. (1972). "Structural research using a earthquake simulator", Struct. Engineering Association of California Conference, Monterrey, Cal.

CLARK, A. J.; CROSS, D. J. (1984). "The effect of specimen resonances on accurate control of multiple degree-of-freedom servohydraulic shaking tables", 8th. World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, U.S.A.

REINHORN, A. M. (1990). "Scale model studies in structural dynamics", State University of New York at Buffalo.

MOLINA, J. (1988). "Estudio sobre la plataforma de ensayos dinámicas de la Cátedra de Estructuras", E.T.S.I. Industriales de Madrid.

KUSNER, D. A.; ROOD, J. D.; BURTON, G. W. (1992). "Signal reproduction fidelity of servohydraulic testing equipment", 10th. World Conference on Earthquake Engineering, Madrid.

BULAND, P. (1992). "Performances dynamiques d'une table vibrante multi-axiale de grandes dimensions", Commissariat à l'énergie atomique, Saclay, Francia.



HUMO DE SILICE



**Pº DE LA CASTELLANA, 86, 7º
28046 MADRID
TEL. 562 85 07 - FAX 562 82 27**

**Fabrica de Sabón
Polígono Industrial de Sabón
15142 Arteixo
La Coruña
Tlf. (981) 60 06 75
Fax (981) 60 13 06**

✓ **BOMBEABLE**

✓ **PROYECTABLE**

✓ **RESISTENCIA** / MECANICAS ABRASION

✓ **DURABILIDAD** / REACCION ARIDO/ALCALIS
PROTECCION ARMADURAS

✓ **DURABILIDAD** / ATAQUE QUIMICOS
CICLOS HIELO/DESHIELO