

Instrumentación de edificios en zonas sísmicas

JUAN MANUEL ESPINOSA ARANDA

Ingeniero mecánico electricista. Su amplia experiencia en instrumentación sísmica empezó en 1970 en el Laboratorio de Instrumentación del II-UNAM. Autor y coautor de trabajos nacionales e internacionales especializados en instrumentación y registro de señales sísmicas. Es director general del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico.

ARMANDO CUÉLLAR MARTÍNEZ

Ingeniero en Computación y maestro en Ciencias de la Computación. Es profesor de asignatura en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Actualmente es el coordinador de Investigación de Tecnología y Ciencia Aplicada a Sismos, principalmente en sistemas de alerta sísmica del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico.

El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. desarrolló en 2003 el Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras, un mecanismo capaz de registrar el efecto de sismos fuertes en puntos seleccionados en las estructuras de los edificios. Cuando una estructura se somete a la acción de aceleraciones sísmicas, la medida de sus efectos provee información útil para estudiar y evaluar su respuesta dinámica, así como la posible evolución de su comportamiento.

El desastre sísmico sufrido en México durante septiembre de 1985 hizo evidente la necesidad de obtener información básica para investigar el efecto que generan los grandes sismos en los diferentes tipos de suelo que cubre la mancha urbana de la Ciudad de México, así como en el sinnúmero de edificios, hoy restaurados y muchos nuevos, con el fin de realimentar sistemáticamente la revisión y el ajuste del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y su Norma Técnica Complementaria en Diseño Sísmico. El Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C. (Cires), de acuerdo con sus objetivos orientados a mitigar desastres sísmicos, y gracias al apoyo sostenido del gobierno del DF, desde 1987 asegura la función de poco más de 80 acelerógrafos digitales dispuestos en suelos característicos del DF, y la difusión gratuita de sus datos eventuales. El

Cires tiene por responsabilidad asegurar la viabilidad operativa de este recurso tecnológico de la Ciudad de México, y ha logrado su objetivo mediante un sostenido quehacer de innovación y desarrollo tecnológico que, si bien originalmente fue orientado a reparar partes y refacciones, ha permitido producir equipos y sistemas de instrumentación sísmica, entre los que destaca, además del Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (Sasmex), el Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras (SADE), el cual aprovecha avances en telecomunicaciones, cómputo y sensores para operar y supervisar procesos de registro y análisis de efectos sísmicos remotos.

Antecedentes

La instrumentación sísmica de edificios en la Ciudad de México tiene como primera experiencia la Torre Latinoamericana, que registró aceleraciones sísmicas durante los terremotos de julio de 1957 y mayo de 1962 (Zeevaert, 1960 y 1963); desafortunadamente, como la instrumentación había suspendido su operación años antes de ocurrir los sismos de septiembre de 1985, esa vez no hubo forma de evaluar la adecuada respuesta estructural de los edificios. Durante ese evento sólo un acelerograma obtenido en el Centro SCOP, en un patio próximo al edificio parcialmente colapsado, mostró que el efecto del terremoto superó el factor de diseño sísmico aplicado en la construcción de ese inmueble, como ocurrió de manera generalizada en la mayor parte de los edificios dañados ese día en el DF. Esta circunstancia, si bien limitó la comprensión del comportamiento estructural de los edificios perdidos y dañados, hizo evidente la importancia de obtener acelerogramas sísmicos para investigar y revisar sistemáticamente el desempeño dinámico y los factores aplicados al diseño de estructuras. Empero, actualmente en México existe

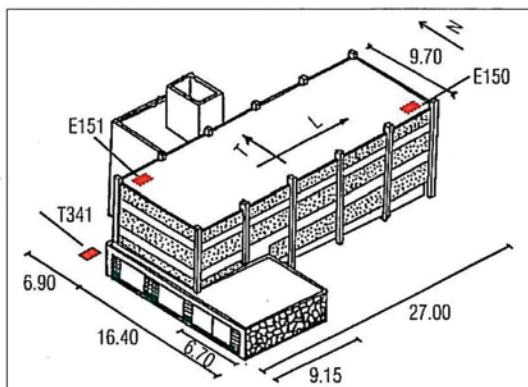
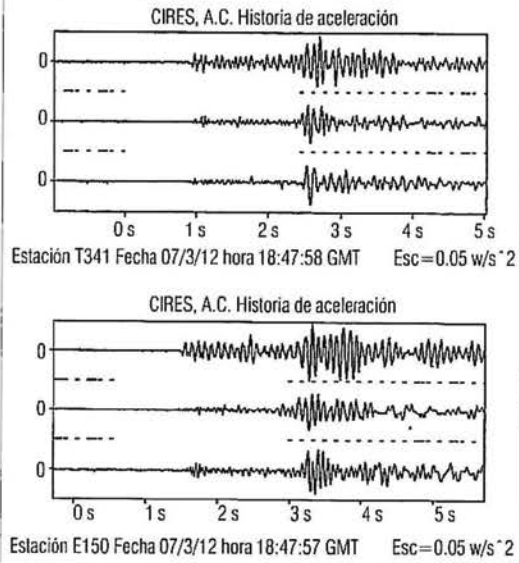


Figura 1. Registro isométrico del edificio de la Fundación Javier Barros Sierra, situado en el sur de la Ciudad de México, y ubicación de los acelerómetros (tomado del documento original).

Gráfica 1. a) Acelerograma registrado a nivel de terreno del edificio de la Fundación Javier Barros Sierra, el 12 de marzo de 1987, que muestra las fases de ondas P y ondas S de la estación T341; b) Acelerograma registrado en el segundo piso del edificio de la Fundación Javier Barros Sierra, el 12 de marzo de 1987, que muestra las fases de ondas P y ondas S de la estación E150 (tomado del documento original).



un reducido número de edificios instrumentados, a pesar de ser nuestro país uno de los de mayor riesgo sísmico en el mundo (Muriá, 1992).

El Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Cires retomaron en 1987 la instrumentación sísmica de edificios de la Ciudad de México (Muriá, 2002). Con aparatos adquiridos para integrar la Red de Acelerógrafos Digitales de la Ciudad México (RACM), hubo oportunidad de instalar temporalmente un sistema con tres aparatos, uno en la planta baja (T341) y dos en el segundo piso del edificio (E150 y E151) de la Fundación Barros Sierra, en el sur de la ciudad (véase figura 1). Así, durante un breve lapso de servicio, el 12 de marzo de ese año 1987 se lograron los acelerogramas generados por un sismo cuyo foco se estimó a una distancia aproximada de 12 km del edificio. Estos acelerogramas son los primeros registros captados por el Cires; muestran, por primera vez de forma completa, las fases sísmicas principales de un evento ocurrido en el Valle de México, como se observa en las estaciones T341 y E150 de la gráfica 1.

El informe presentado a las autoridades del GDF incluyó los espectros de Fourier, que permitieron observar el comportamiento dinámico del edificio durante este sismo (Espinosa *et al.*, 1987).

Durante la década de 1990, para obtener acelerogramas experimentales del efecto sísmico en el terreno y en estructuras, en México era común importar aparatos y sistemas de medición y registro de sismos fuertes.



Por su elevado costo, resultaba oneroso obtener información suficiente para investigar y definir normas de diseño sísmico apropiadas para las diversas calidades del suelo en el Valle de México y para las estructuras desarrolladas en un gran número de inmuebles.

Al elevado costo de adquisición, instalación y conservación de los sistemas de registro sísmico importados había que sumar el del procesamiento y análisis de la información obtenida durante cada sismo, así como la estimación numérica y de modelos matemáticos por parte de los especialistas (Muría, 1992).

Desde su fundación en 1986, uno de los objetivos principales del Cires ha sido asegurar la función de los aparatos que integran la RACM a su cargo, para lo cual promueve estudios sobre los avances en los sensores acelerométricos y en los sistemas de telecomunicación y cómputo, y aplica sus resultados para hacer más eficiente y eficaz la operación de los sistemas de registro sísmico que desarrolla, así como el proceso de su información.

Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras

El Cires desarrolló en 2003 el Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras (SADE), un mecanismo capaz de registrar el efecto de sismos fuertes en puntos seleccionados en las estructuras de los edificios. Cuando una estructura se somete a la acción de aceleraciones sísmicas, la medida de los efectos de éstas provee información útil para estudiar y evaluar la respuesta dinámica de aquélla, así como la posible evolución de su comportamiento.

Pocos segundos después de registrar los efectos mayores de un sismo, vía internet y en forma automática el SADE puede enterar a los responsables del Programa Interno de Protección Civil y de Seguridad Estructural del inmueble sobre los resultados gráficos de las aceleraciones –en el dominio del tiempo y la frecuencia– útiles para decidir si se continúa el uso de un inmueble o para instruir la revisión de posibles daños en la integridad de su estructura. El SADE es un recurso que conjuga procedimientos automáticos de medición, cómputo y comunicaciones que permiten realizar de forma remota las actividades de adquisición, conservación, monitoreo, operación y procesamiento, a costos menores que el de los sistemas tradicionales.

Descripción

El SADE consta de acelerómetros tipo digital con sensores triaxiales y biaxiales dispuestos ortogonalmente. Es capaz de iniciar el registro cuando las aceleraciones sísmicas superen los niveles de activación preestablecidos o cuando se capte una señal de activación externa. Opcionalmente, esta activación puede ser generada por el Sistema de Alerta Sísmica de la Ciudad de México (SAS), cuando éste detecte el inicio de un sismo fuerte con epicentro en la costa de Guerrero, entre Petatlán, Guerrero, y Punta Maldonado, Oaxaca.

Cuadro 1. Datos del informe del SADE generados automáticamente

Datos	Formato/Unidades
Número de evento	TTAAMMDDEE
Fecha	dd/mm/aaaa
Hora	hh:mm:ss
<i> dominio en el tiempo</i>	
• Aceleraciones máxima y mínima	gal
• Instantes de las aceleraciones	s
<i> dominio en la frecuencia</i>	
• Magnitud espectral máxima	cm/s
• Frecuencia	Hz
<i> Función de transferencia</i>	
• Amplitud máxima	s/u
• Frecuencia	Hz
• Gráficas	
• Aceleración	gal vs. s
• Magnitud espectral	cm/s vs. Hz
• Función de transferencia	s/u vs. Hz
Histórico de sismos detectados	n

El SADE dispone de una señal de referencia de tiempo exacto, generada por un receptor del sistema de posicionamiento global satelital (GPS), que se utiliza para fechar los registros obtenidos por el sistema para estudiar la evolución de las fases del movimiento. La frecuencia de muestreo de los sensores es de 100 veces por segundo, con una precisión de 16 bits. El almacenamiento eventual de la información se realiza en una central de registro y control (CRC), adonde los sensores envían sus datos a través de una red ethernet.

El procesamiento automático de las aceleraciones sísmicas registradas en el CRC incluye el cálculo de distribución de energía en diferentes frecuencias y la determinación de funciones de transferencia características de la estructura; las gráficas comparativas generadas por el sistema permiten observar la evolución del comportamiento del edificio. El conocimiento de la evolución de la respuesta dinámica del inmueble permite estimar sus condiciones de seguridad sísmica después de ocurrir sismos fuertes.

Adquisición de datos

El SADE almacena las señales medidas en los sensores, realiza los cálculos y envía informes cuando la aceleración medida en los sensores seleccionados sobrepasa un nivel de activación previamente definido, el cual se determina mediante la observación del comportamiento de la estructura ante la acción del viento sobre ella y ante la excitación de los movimientos normales del suelo debidos al paso de vehículos pesados; el ajuste se optimiza con la respuesta del edificio ante los sismos que se van registrando. Los acelerómetros dispuestos en la estructura transmiten su información al CRC mediante una red de datos digitales, éste retransmite la información por internet a un servidor de datos externo para respaldar la información (Espinosa-Aranda *et al.*, 1997).

En suma, el SADE se utiliza para:

- Conocer y analizar la respuesta dinámica de la estructura.
- Conocer los posibles cambios en rigidez, si las fuerzas sísmicas superan la resistencia del edificio.
- Registrar las historias de aceleración durante un evento sísmico, además de obtener la distribución y el nivel de energía asociada a cada frecuencia.
- Calcular el cociente de espectros entre dos puntos seleccionados (función de transferencia) y comparar, para cada evento sísmico, la evolución del comportamiento de la estructura.
- Enviar automáticamente los resultados a los expertos y responsables de la seguridad estructural para decidir sobre la conveniencia de continuar laborando en el inmueble o iniciar la evacuación para inspeccionar las condiciones de integridad del edificio.

Cada vez que detecta un evento, el SADE envía automáticamente un informe (véase cuadro 1), que contiene datos en los dominios del tiempo y la frecuencia para cada canal del sensor; en el caso de la función de transferencia, los resultados dependerán de las combinaciones de cocientes entre sensores que previamente se determinen.

Instrumentación de un edificio con el SADE

En 2006, el Cires instaló en un edificio de 23 niveles de la Ciudad de México un SADE con receptor de la señal de alerta sísmica, con objeto de obtener información del efecto que podían causar movimientos sísmicos fuertes para evaluar su respuesta dinámica estructural y disponer simultáneamente del servicio de avisos del SAS; esta información resultaría útil para optimizar la eficacia de las

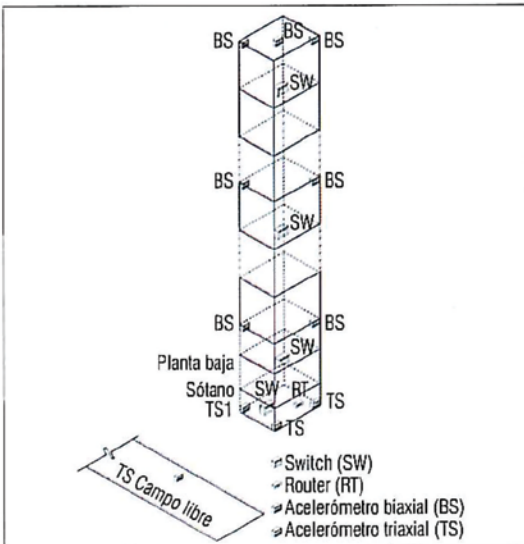


Figura 2. Distribución de sensores biaxiales y triaxiales del SADE en un edificio.

M.R.
CONDUMEX
GARANTÍA • CALIDAD



acciones de prevención del riesgo sísmico que practica el personal del inmueble.

Descripción del sistema en el edificio

El SADE en el edificio consta de un puesto central de operación (CRC) interconectado con 11 estaciones remotas, tres de las cuales se instalaron con servosen-


sores triaxiales ortogonales en la base de la estructura y siete con sensores biaxiales para los ejes horizontales en los demás puntos, dispuestos de acuerdo con los ejes principales de la estructura: longitudinal, transversal y vertical. Además, se instaló un sensor triaxial en campo libre con equipo de radiocomunicación ethernet.

El sistema concentra y almacena las señales medidas en los sensores, realiza los cálculos y envía automáticamente informes de resultados cuando la aceleración medida en los sensores predeterminados sobrepasa un nivel prefijado, el cual se determinó mediante la observación del comportamiento de la estructura en un periodo de observación que duró varias semanas.

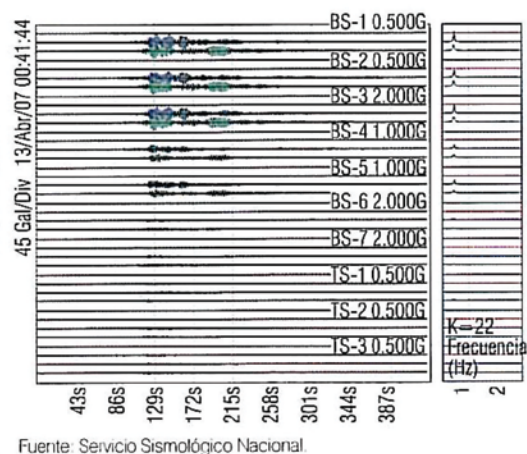
La estación central del SADE usa marcas de tiempo absoluto referidas al sistema GPS para facilitar la identificación de los eventos sísmicos y su correlación con los efectos medidos. La supervisión del sistema en el edificio se hace en forma remota a través de internet.

Desde su puesta en operación en 2006, se han medido los efectos en la estructura de 37 sismos: 25 de magnitud $M < 6$ y 12 de magnitud $M > 6$, según los reportes preliminares proporcionados por el Servicio Sismológico Nacional; destaca el sismo $M 6.3$ del día 13 de abril de 2007, con epicentro en Guerrero.

En la gráfica 2 se muestran los resultados del mencionado sismo del 13 de abril de 2007, $M 6.3$; allí se observa la gráfica de aceleración de los 10 puntos de medición así como su magnitud espectral (lado derecho), que corresponde a los sensores biaxiales (BS1-BS7) y a los sensores triaxiales (TS1-TS3), respectivamente.

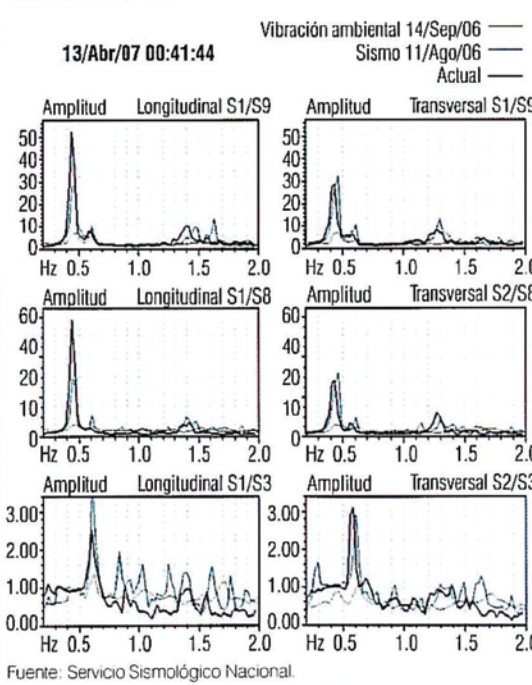
En la gráfica 3 se muestran tres funciones de transferencia en relación con los ejes longitudinal y transversal que corresponden a los cocientes entre algunos puntos superiores y algunos de la base. Cada gráfica se compara con dos resultados previos: uno referente a una activación por vibración ambiental y la otra por un sismo 

Gráfica 2. Datos de aceleración y espectro de magnitud obtenidos de manera automática en un edificio de 23 niveles en la Ciudad de México durante el sismo del 13 de abril de 2007, $M 6.3$



Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

Gráfica 3. Tres funciones de transferencia de los ejes longitudinal y transversal obtenidos en un edificio de 23 niveles en la Ciudad de México, durante el sismo del 13 de abril de 2007, $M 6.3$



Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

Referencias

Espinosa, Juan M., Prince, J., Contreras, O., Ibarrola, G. (1987) *Análisis del primer sismo registrado en el CIREs, A.C. el 12 de marzo de 1987. Informe Preliminar RA-DF-1*, junio 20, 1987.


Espinosa-Aranda J. M. (1997, junio) El Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras. *Ingeniería Civil* 338.

Zeevaert, L. (1960, julio) Base shear in tall buildings during the earthquake of July 28, 1957 in Mexico City. *Proc II World Conference in Earthquake Engineering*, Tokio, Japón.

Zeevaert, L. (1963) Mediciones y cálculos sísmicos durante los temblores registrados en la Ciudad de México en mayo de 1962. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*.

Muriá D., González, R., Espinosa-Aranda J. M., León A. (1992, agosto) *Análisis de la Respuesta de un Edificio Instrumentado. Series del Instituto de Ingeniería* 541, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1992.

Muriá, D., y Rodríguez G. (2002, marzo) *Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio Jal. Series del Instituto de Ingeniería* 628, Instituto de Ingeniería, UNAM.

 ¿Desea opinar o cuenta con mayor información sobre este tema? Escribanos a ic@heliosmx.org