

ALERTA ESTRUCTURAL PARA EDIFICIOS INSTRUMENTADOS*

*David Murià Vila, Baruo Daniel Aldama Sánchez
y Santiago Loera Pizarro
Instituto de Ingeniería, UNAM*

* Artículo presentado en el XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puebla, 12-14 noviembre 2009

Alerta estructural para edificios instrumentados

Resumen

En este artículo se presenta un sistema automático de alerta estructural para edificios instrumentados que al registrar un sismo genera en unos minutos un informe preliminar con los datos más significativos del evento y señala el posible estado físico del inmueble. La estimación del estado físico se basa en cinco indicadores: dos de intensidad (aceleración del terreno e intensidad de Arias) y tres de respuesta estructural (distorsiones de entrepiso, coeficiente sísmico y porcentaje de variación de las frecuencias fundamentales de los componentes horizontales).

Abstract

This paper presents an automatic system of structural warning for instrumented buildings. When an earthquake is recorded, a preliminary report with the most significant data of the event and their possible structural condition of the construction is generated in minutes. The estimation of structural condition is based on five indicators: two of intensity (ground acceleration and Arias intensity) and three of structural response (story drift ratio, seismic coefficient and percentage change in the fundamental frequencies of horizontal components).

Introducción

Con la instrumentación de un edificio y mediante técnicas y procedimientos de análisis es posible conocer y analizar su respuesta dinámica registrada ante sollicitaciones sísmicas. Así se pueden detectar cambios en sus características estructurales con relación a sus valores iniciales, y establecer su estado de daño. Lo anterior permite contar con elementos de juicio al momento de tomar decisiones sobre la funcionalidad y seguridad de la estructura. Para tal fin, se han desarrollado sistemas de monitoreo para evaluación estructural (Iwan, 2003; Safak y Hudnut, 2006; Naeim *et al.*, 2006; Celebi, 2007; Takahashi *et al.*, 2007). En México, la Torre Plaza Juárez de la Secretaría de Relaciones Exteriores cuenta con un sistema automático que al ocurrir un sismo genera un informe preliminar de los registros obtenidos y lo envía a los responsables del edificio por correo electrónico. Este sistema, desarrollado por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (Espinosa-Aranda, *et al.* 2007, Ruiz, 2007), calcula los espectros de Fourier, algunos cocientes espectrales, estima las frecuencias fundamentales y presenta comparaciones

con la información de eventos previos. En este trabajo se propone un sistema similar pero que además hace una estimación automática preliminar del estado físico del edificio. El procedimiento y los valores de los parámetros propuestos se fundamentan en los estudios de tres edificios instrumentados en la ciudad de México y uno de la ciudad de Acapulco (Murià Vila, 2007).

Criterio de evaluación del estado estructural

El sistema de alerta estructural basa su toma de decisión en cinco indicadores: dos relativos a la intensidad del sismo (aceleración máxima horizontal del terreno e intensidad de Arias) y tres de respuesta estructural (distorsión de entrepiso, variación de las frecuencias fundamentales de vibración de los componentes horizontales y coeficiente sísmico estimado con las aceleraciones registradas en la estructura).

Para la elección de los indicadores se tomó en cuenta que puedan calcularse con un procedimiento automático, a partir de la información que suministre la instrumentación.

Indicadores

- Aceleración máxima ($A_{\text{máx}}$) de los componentes horizontales del terreno o en su defecto de la base del edificio
- Intensidad de Arias (I_{Arias}) de los componentes horizontales del terreno o en su defecto de la base del edificio
- Distorsiones de entrepiso (DE) en los componentes transversal (T) y longitudinal (L) del edificio
- Variaciones de las frecuencias (VF) fundamentales de vibración de los componentes T y L
- Estimación del coeficiente sísmico (C_s) con base en las aceleraciones registradas en la estructura.

Los dos primeros son relativos a la intensidad del sismo. La aceleración máxima ($A_{\text{máx}}$) es un indicador de severidad frecuentemente empleado aunque tiene algunas limitaciones. La intensidad instrumental horizontal de Arias (I_{Arias}) ha mostrado ser un buen indicador de la severidad de un sismo (Arias, 1970). Emplear los dos en un sitio dado permite conocer la relación que guardan.

La distorsión de entrepiso (DE) es un muy buen indicador de daño (Alcocer *et al.*, 1999; Park y Paulay, 1996; Meli y Reyes, 2002), pero hay que tener en cuenta que los desplazamientos en edificios instrumentados con acelerógrafos, se obtienen de una doble integración de las aceleraciones registradas. Este procedimiento puede conducir a errores en su estimación, sobre todo cuando la estructura del edificio incursiona en el intervalo no lineal y ocurren desplazamientos permanentes; tal fenómeno no está contemplado por el proceso de integración numérica adoptado en este trabajo. Sin embargo, se considera aceptable emplearlo para respuestas de sismos de intensidad pequeña o moderada, y para sismos severos hay que recurrir a los otros indicadores de respuesta. Otro aspecto por considerar es que los desplazamientos calculados incluyen los correspondientes a la flexión lateral general cuando los que interesan son los debidos a cortante por ser los que causan daño. Los debidos a la flexión general son importantes en edificios muy esbeltos y si en tal caso se incluyen puede sobrestimarse la distorsión.

La variación de las frecuencias (VF) fundamentales de los componentes transversal (T) y longitudinal (L) de un edificio ante un evento sísmico se calcula con respecto a los valores de referencia obtenidos bajo un sismo de pequeña intensidad o las estimadas de pruebas de vibración ambiental. Este parámetro se ha empleado frecuentemente (Dipascuale y Cakmak, 1988; Murià-Vila, 2007) pero hay que tener en cuenta que abarca el deterioro o daño de elementos estructurales y no estructurales, las posibles variaciones por

las condiciones climáticas, y las posibles no linealidades del suelo donde esté cimentada la construcción, que ocurran a corto y largo plazo. Para ello se requiere determinar la fase intensa de los registros, así como las fases inicial y final de baja intensidad, y en cada una identificar las frecuencias y establecer el valor de referencia. La VF de la fase final e intensa se calculará con respecto a la fase inicial, y también con respecto a los valores de referencia. Para la determinación de los tramos de las fases intensa y de baja intensidad de los registros de un evento sísmico se recurre a la variación de la Intensidad de Arias en el tiempo y a la raíz cuadrada del valor cuadrático medio (RVCM). En sismos de baja intensidad la VF se calcula entre la frecuencia identificada con la señal completa, y la de referencia. En eventos donde no es posible identificar adecuadamente la fase inicial del evento, ésta se toma como la fase final de un evento previo. En la alerta se reportará la VF con respecto a los valores de referencia establecidos, y los demás valores VF se conservan para que el personal encargado confirme la alerta emitida.

El coeficiente sísmico (C_s) que se genera en la estructura por un evento sísmico se obtiene a partir de las aceleraciones registradas en cada nivel instrumentado y sus masas. Con estos datos se calculan las fuerzas de inercia en dichos niveles y con un método de interpolación se calculan las fuerzas de los otros niveles. Para ello se empleó el método de interpolación de Newton que permite estimar con buena aproximación dicha respuesta siempre y cuando se tengan al menos tres niveles instrumentados (azotea, nivel a media altura y la base). Con estas fuerzas se calcula el cortante que actúa en la base del edificio como la suma de las fuerzas en cada piso y se divide entre el peso total de la estructura para obtener el C_s , valor que se compara con el de diseño. Este procedimiento se detalla en Aldama (2009).

Procedimiento de evaluación

Para cada indicador se propone una escala de tres niveles de posible daño:

- Nivel 1 posible daño ligero
- Nivel 2 posible daño intermedio
- Nivel 3 posible daño severo

Los tres niveles de daño se delimitan estableciendo para cada indicador dos umbrales: uno del nivel 1 al 2 y el otro del nivel 2 al 3. Estos umbrales son función del edificio (estructura y elementos no estructurales), de las características del sitio donde esté ubicado y de su estado físico al iniciar su monitoreo. Por tanto, uno o varios umbrales de los indicadores podrán variar de un edificio a otro. En las etapas iniciales del monitoreo de un edificio puede suceder que algunos indicadores conduzcan a diferentes niveles de daño. La experiencia de estudios de la respuesta sísmica de cuatro edificios instrumentados en México, algunos de ellos por más de 19 años (Murià-Vila, 2007), hizo posible considerar los diversos escenarios, y establecer para ellos los valores de referencia y los umbrales para cada nivel de daño. Con base en los estudios mencionados se proponen para edificios semejantes a los estudiados unos valores para iniciar el monitoreo estructural. Es decir, los valores que se proponen son aplicables a edificios de entre 14 y 17 niveles que estén cimentados en suelos blandos y con estructura de concreto reforzado. Los valores de los umbrales empleados al iniciar el monitoreo de los cuatro edificios que se estudiaron fueron los que se muestran en las tablas 1 y 2.

Tabla 1 Umbrales de los indicadores para un edificio de concreto de entre 14 y 17 niveles en suelos blandos de la ciudad de México, con una antigüedad de aproximadamente 10 años al iniciar el monitoreo

Nivel	$A_{m\acute{a}x.}$ en Gal	$I_{ARIAS.}$ en cm/s	$C_{S_{m\acute{a}x}}$	$DE_{m\acute{a}x.}$ en %	$VF_{m\acute{a}x.}$ *
1	< 15	< 5	< 0.03	< 0.12	< 7
2	15 – 130	5 -140	0.03 - 0.16	0.12 - 0.60	7 - 25
3	> 130	> 140	> 0.16	> 0.60	> 25

*Este indicador depende de la edad de la construcción al momento de iniciar el monitoreo

Tabla 2 Umbrales de los indicadores para un edificio de concreto de 18 niveles en suelo blando de la ciudad de Acapulco, cuyo monitoreo inicia recién construido

Nivel	$A_{m\acute{a}x.}$ en Gal	$I_{ARIAS.}$ en cm/s	$C_{S_{m\acute{a}x}}$	$DE_{m\acute{a}x.}$ en %	$VF_{m\acute{a}x.}$ *
1	< 108	< 50	< 0.06	< 0.12	< 10
2	108 – 388	50 – 645	0.06 - 0.19	0.12 - 0.60	10 - 35
3	> 388	> 645	> 0.19	> 0.60	> 35

*Este indicador depende de la edad de la construcción al momento de iniciar el monitoreo

Como las características estructurales de estos edificios difieren en densidad de muros de mampostería, en su estado físico, y en las rehabilitaciones que algunos han requerido, fue necesario ajustar algunos de los umbrales establecidos a partir de los registros disponibles de pequeña y moderada intensidad. Por ejemplo, en uno de los edificios de la ciudad de México los valores VF se modificaron respecto a la tabla 1 porque fue reforzado y por la presencia de marcos rellenos de muros de mampostería como elementos no estructurales (Aldama, 2009). Así pues, el sistema propuesto tiene la opción de actualizar o corregir los valores de referencia en función de la información analizada de los eventos que se registren y del comportamiento que se observe en la inspección de la estructura.

Para establecer los umbrales es necesario contar con la información siguiente: verticalidades, frecuencias de vibración del edificio, tipo de estructuración, tipo de cimentación y de suelo, rehabilitaciones y antigüedad de la construcción, así como una estimación de su estado físico, que se tomará como inicial.

Finalmente, el estado físico del edificio se establece ponderando los cinco indicadores, con base en los cuatro colores siguientes:

1. Verde, se tendrá cuando VF , $A_{\text{máx}}$, I_{Arias} y C_s sean igual al nivel 1
2. Amarillo, cuando VF o dos de los indicadores restantes sean nivel 2
3. Naranja (inspección del edificio) será establecido cuando VF sea nivel 3 y al menos uno de los indicadores $A_{\text{máx}}$, I_{Arias} o C_s es nivel 2, o si VF es nivel 2 y alguno de los otros es nivel 3. En ambos casos no se considera DE por las incertidumbres en su estimación. En este estado es urgente hacer una inspección del edificio para descartar que se trate de un estado Rojo
4. Rojo, si la inspección sugiere evacuar el edificio

Niveles de daño

Los tres niveles de daño de los indicadores se correlacionan con el daño ligero, intermedio y severo.

El daño ligero o tolerable incluye la posible presencia de agrietamientos, en su mayoría en los elementos no estructurales, aunque pueden aparecer fisuramientos en elementos estructurales como son los muros de mampostería. Estos daños no representan riesgo para los ocupantes. Puede haber pequeñas disminuciones de frecuencias de vibración del edificio por pérdidas de rigidez atribuibles a reacomodos de los elementos no estructurales. No se exceden las distorsiones de entrepiso tolerables, aunque dichas distorsiones pueden producir un cierto daño en los elementos no estructurales y estructurales, pero son de igual o menor magnitud que los producidos por el uso normal del edificio.

En el daño intermedio es evidente la presencia de grietas en elementos estructurales y no estructurales. Pueden ocurrir desprendimiento de aplanados y caída de plafones. Las distorsiones de entrepiso pueden rebasar los valores tolerables en elementos no estructurales y estructurales. Habrá disminución de las frecuencias de vibración del edificio por pérdida de rigidez del sistema suelo-estructura. Estos daños en general no representan riesgo para los ocupantes, aunque puede ser eventualmente necesario limitar algún área del edificio con el fin de hacer las reparaciones pertinentes. Requiere la inspección ocular del edificio por un profesional debidamente capacitado para determinar su estado físico y si hay evidencia de un deficiente comportamiento que requiera de una posible intervención correctiva.

El daño severo es evidenciado por la presencia de agrietamientos en elementos no estructurales y estructurales, y por la mayor pérdida de rigidez. En general, el coeficiente sísmico y las distorsiones de entrepiso son cercanos o rebasan las permisibles por las normas de construcción. Requiere de una urgente inspección ocular del edificio por profesionales debidamente capacitados en ingeniería estructural para determinar el posible desalojo del personal que lo ocupa.

Sistema de Alerta Estructural

La implementación de un sistema de alerta automatizado es factible en edificios instrumentados. Edificios aproximadamente regulares, es deseable que cuenten con sensores en el terreno, en la base, en por lo menos un nivel intermedio y en la azotea. Esto permite analizar su respuesta dinámica ante la ocurrencia de un sismo y detectar posibles cambios en sus características estructurales con base en sus valores iniciales y establecer aproximadamente su estado de daño.

El sistema automatizado de alerta estructural se elaboró como una ayuda en la operación y mantenimiento de un edificio, con base en los eventos que se registren. Al ocurrir un sismo, el sistema propuesto procesa los registros, obtiene los valores de los indicadores y los compara con los de referencia. Con estos datos elabora un informe automático donde se presentan algunos registros y sus espectros, los valores de los indicadores, y la estimación del posible estado de daño. Posteriormente, el informe debe ser revisado por personal capacitado para su ratificación o posible corrección.

Los análisis automáticos implementados y la información que se obtiene se describen en el apéndice A. Mayores detalles de estos análisis y del programa de cómputo en Aldama (2009).

Para un cierto edificio, de toda la información generada en la alerta se publica la siguiente:

- Historias de aceleración de azotea, base y terreno
- Tabla de los valores máximos de aceleraciones, velocidades, desplazamientos, distorsiones de entrepiso, coeficiente sísmico e intensidades de Arias
- Tabla comparativa de valores máximos de eventos previos
- Identificación de las frecuencias de vibración, variaciones respecto a los valores de referencia, y tabla comparativa con eventos previos
- Espectros de Fourier y cocientes espectrales (azotea-sótano y azotea-terreno).

Una vez que se ha emitido la alerta, la información completa es revisada por el personal experto para corroborar o rectificar la alerta emitida automáticamente.

Aplicación a edificios instrumentados

La valoración del sistema de alerta estructural se realizó considerando cuatro edificios instrumentados desplantados en terreno blando, tres de ellos en la ciudad de México y uno en la ciudad de Acapulco (Aldama, 2009). En los tres primeros se han registrado sismos de variada intensidad y han ocurrido daños intermedios. Para ilustrar se presenta la aplicación del sistema al edificio PC.

Edificio PC

El edificio tiene estructura de concreto reforzado de 17 niveles, y está cimentado sobre un cajón y pilotes de fricción. Consta de un sótano con muros perimetrales de concreto reforzado, planta baja de 38 por 54 m, mezzanine, niveles escalonados de estacionamiento unidos con rampas y arriba de ellos una torre de 12 niveles cuya dimensión en planta disminuye hacia arriba hasta 23.9 por 39 m, y con alturas de entrepiso de 3.15 m. La altura total del inmueble es de 55.4 m (figura 1). El edificio fue diseñado con el Reglamento de Construcción del DF de 1977 y construido entre 1980 y 1984.

Durante los sismos de septiembre de 1985 el edificio sufrió daños estructurales. Por la irregularidad en elevación del edificio, buena parte de estos daños se concentraron en las columnas de la zona de transición entre los niveles de estacionamiento y de oficinas donde hay un cambio brusco de rigidez en altura, así como en los muros del cubo de las escaleras y de los elevadores. Estos daños tuvieron que repararse, además de realizarse un refuerzo mediante la colocación de muros de concreto en toda su altura y la sustitución de muros de mampostería por muros de concreto para mejorar su desempeño ante sismos futuros.

En 1990 se pone en operación una red de 11 acelerógrafos triaxiales: tres en el sótano, dos de ellos en esquinas opuestas y el otro al centro; cuatro en el entrepiso del nivel 7 y 8 de estacionamiento, dos

en el cuerpo de la torre en el nivel 6 de oficinas y dos más en el nivel de azotea. Durante varios años, la instrumentación del edificio limitó el estudio de la respuesta del sistema, ya que no contaba con un acelerógrafo que registrara el movimiento del terreno, y la instrumentación del sótano era insuficiente para analizar el movimiento de cabeceo. En 1999 se dispuso de los recursos para instalar dos acelerógrafos triaxiales (Alcántara *et al.*, 1997; Murià-Vila, 2007): uno de los aparatos se instaló en terreno (JR) a la misma profundidad del cajón de cimentación y el otro en la esquina suroeste del sótano (SS). La instrumentación actual del edificio se muestra en la figura 2.

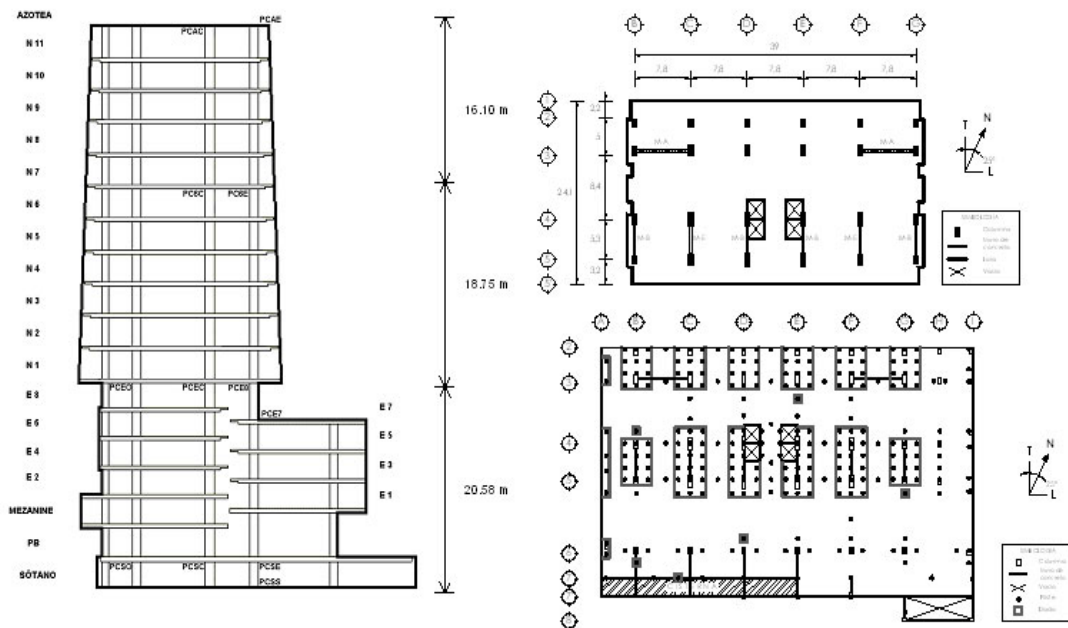


Figura 1 Elevación y plantas del edificio

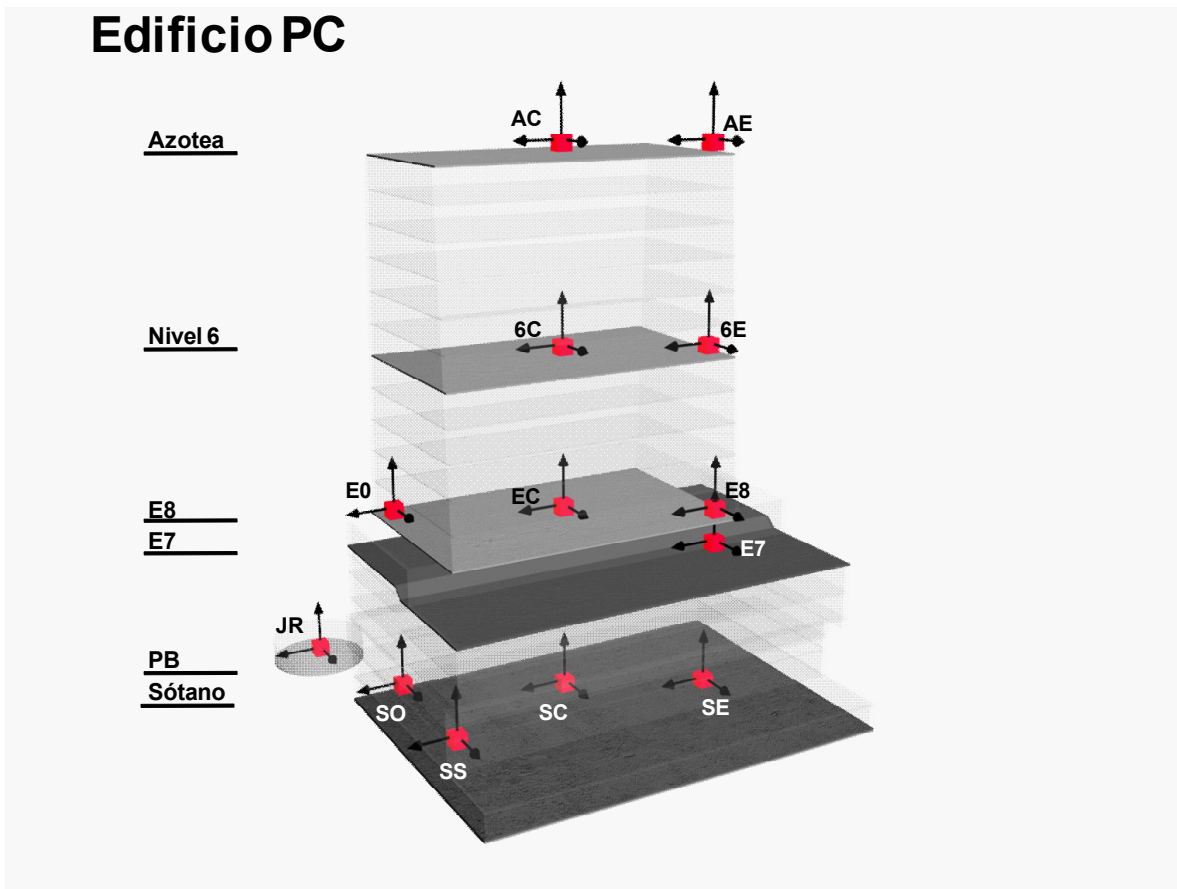


Figura 2 Localización de los acelerógrafos en el edificio

El edificio ha sido estudiado desde 1989 por lo que se dispone de una amplia información (Rodríguez-Cuevas y Quass, 1990; Alcántara *et al.*, 1997; Murià-Vila *et al.*, 1997; Ávila, 2000, Alcántara *et al.*, 2001, Murià-Vila *et al.*, 2001; Correa y Murià Vila 2005; Murià-Vila *et al.*, 2007; Murià-Vila, 2007). Desde la puesta en marcha de la red acelerográfica en 1990, se han capturado un gran número de sismos y han sido objeto de estudio 13 de ellos. En este trabajo se analizan siete de los eventos más significativos, estos son: 90-1, 95-1, 97-2, 99-1, 99-3, 99-4 y 07-1. El evento 90-1 se seleccionó como referencia para calcular VF por ser de baja intensidad y el primer evento registrado.

Las características de los trece eventos analizados en trabajos previos se muestran en la tabla 3. Los eventos: 90-1, 94-3, 95-1, 95-2, 97-2, 99-3 y 99-4 se han estudiado con mayor detalle empleando técnicas de análisis paramétrico (Murià-Vila *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.* 2001; Correa y Murià Vila 2005; Murià-Vila *et al.*, 2007). Con los datos se calcularon los valores DE y VF de los componentes T y L que se incluyen en dicha tabla. Esta es la razón de las diferencias que se observan entre los valores de los indicadores de las tablas 3 y 4.

Para la estimación del estado físico se aplicaron en primera instancia los umbrales de la tabla 1 a los valores de la tabla 3 y el resultado se muestra con colores en la misma tabla. En los eventos 90-1, 93-11 y 07-1 los valores de DE son de nivel 2 y el resto de los indicadores de nivel 1. El nivel 2 apunta que los muros de mampostería podrían presentar agrietamientos, sin embargo no se encontraron evidencia de ello. Lo anterior podría explicarse por estar incluidas en las DE las deformaciones laterales debidas a la flexión general, lo cual provoca que se sobrestimen las DE. En este edificio la flexión general puede ser significativa debido a su esbeltez y a la esbeltez de sus muros. Por estas y las otras limitaciones de DE señaladas, este indicador por si solo no define el estado del edificio, es necesario que uno de los otros indicadores confirme ese nivel de daño. Por lo tanto, en este edificio se consideró que el umbral apropiado del nivel 1 sería el 0.17 que aparece en la tabla correspondiente al evento 93-11. Con esta modificación se aplicó el sistema de alerta propuesto al edificio ante los eventos seleccionados. Los resultados aparecen en la tabla 4 y los indicadores muestran una adecuada correlación con el estado de físico estimado y el nivel de daño.

Tabla 3 Características de los eventos sísmicos registrados en el edificio PC

Evento	Fecha	Ubicación	Magnitud M_w	Distancia, en km	I_{ARIAS} , en cm/s	$A_{máx}$ terreno, en Gal	$DE_{máx}$, en %		$VF_{máx}$, en %	
							T	L	T	L
90-1(V)	31/05/90	Guerrero	5.3	316	0.8	7	0.15	0.08	0	0
93-4(V)*	15/05/93	Guerrero	6.0	334	1.3	10	0.10	0.10	-1	-1
93-11(V)*	24/10/93	Guerrero	6.7	303	2.9	13	0.19	0.17	4	4
94-1(V)*	23/05/94	Guerrero	6.3	215	0.5	6	0.02	0.03	1	-1
94-3(A)	10/12/94	Guerrero	6.5	280	6.5	15	0.31	0.19	11	5
95-1(A)	14/09/95	Guerrero	7.5	298	21.4	30	0.55	0.36	10	11
95-2(A)	09/10/95	Colima	7.9	532	9.2	16	0.38	0.20	6	8
97-1(A)*	11/01/97	Michoacán	7.1	427	7.6	17	0.41	0.35	12	13
97-2(V)	22/05/97	Guerrero	6.5	285	0.4	5	0.07	0.07	4	5
99-1(A)	15/06/99	Puebla	6.9	222	17.6	28	0.42	0.20	6	7
99-2(V)*	21/06/99	Guerrero	6.2	285	0.7	5	0.06	0.05	6	5
99-3(A)	30/09/99	Oaxaca	7.4	455	20.9	27	0.47	0.26	8	9
99-4(V)	29/12/99	Oaxaca	5.9	304	0.7	6	0.07	0.08	4	3
07-1(V)	13/04/07	Guerrero	6.3	292	2.4	14	0.13	0.15	3	1

(V) Estado Verde (A) Estado Amarillo (N) Estado Naranja (R) Estado rojo

*Evento sísmico sin análisis paramétrico

Nota: los valores VF positivo indican una frecuencia menor a la de referencia

Tabla 4 Determinación del estado en el edificio

Evento	$A_{m\acute{a}x}$ en Gal	I_{ARIAS} , en cm/s	$C_{s_{m\acute{a}x}}$		$DE_{m\acute{a}x}$ en %		$VF_{m\acute{a}x}$ en %	
			T	L	T	L	T	L
90-1(V)	7	0.9	0.01	0.01	0.16	0.09	0	0
95-1(A)	35	22.7	0.04	0.04	0.56	0.37	9	11
97-2(V)	5	0.4	0.01	0.01	0.07	0.07	5	5
99-1(A)	28	17.6	0.03	0.02	0.43	0.21	11	10
99-3(A)	27	21.0	0.03	0.03	0.47	0.28	11	10
99-4(V)	6	0.7	0.01	0.01	0.07	0.08	5	5
07-1(V)	14	2.4	0.01	0.01	0.13	0.15	5	2

(V) Estado Verde

(A) Estado Amarillo

(N) Estado Naranja

(R) Estado rojo

Los eventos 95-1, 99-1 y 99-3 fueron los que produjeron el mayor efecto sobre el estado físico y les correspondió Amarillo; el resto fue Verde. En el evento 95-1, que ha sido el más intenso que se ha registrado, el C_s representa un 22 por ciento del valor de diseño y la máxima DE fue de 0.55 por ciento.

Cabe mencionar que las frecuencias fundamentales de los componentes horizontales y de torsión de la estructura son muy cercanas, en particular las horizontales prácticamente coinciden y en sus movimientos es apreciable el acoplamiento entre dichos componentes. Lo anterior dificulta la identificación de las frecuencias de vibración de los modos fundamentales de vibración por la interacción modal que se produce (Murià-Vila *et al.*, 2001, Rodríguez *et al.* 2001) lo cual limita la aplicación del método convencional de análisis espectral. Esta característica no la tienen los otros tres edificios instrumentados. Para salvar esta dificultad, se recurrió a la implementación del ajuste de polinomios racionales (Richardson y Formenti, 1982) con el programa de cómputo de Huerta (2007). Así se logró, para los fines de la alerta, una identificación de las frecuencias de vibración aceptable, como puede constatare al comparar las VF de las tablas 3 y 4.

Comentarios finales

Se elaboró un sistema automatizado de alerta estructural para ayuda en la operación y mantenimiento de un edificio, que advierte de su estado físico con base en los eventos que se registren. La alerta permite conocer en una decena de minutos la valoración del edificio ante la ocurrencia de un sismo y contar con elementos cuantitativos de la respuesta dinámica para tomar decisiones relativas a la posible reparación y/o evacuación de la estructura.

Para cada indicador se establecieron umbrales que se ajustaron y relacionaron con el estado de daño de edificios instrumentados en México. En la definición de los valores correspondientes a los tres niveles de daño se consideraron los datos de edificios instrumentados que han sufrido daños leves a moderados durante sismos de mediana intensidad.

Los resultados muestran que la implementación de estos indicadores y su correlación con el estado de daño observado fueron adecuados y están sustentados con resultados de edificios instrumentados obtenidos en un lapso de hasta 19 años. No se descarta el ajuste de algunos de ellos durante el monitoreo instrumental del edificio. Por ello los valores de referencia para cada edificio tienen la posibilidad de actualizarse en función de la información analizada de los eventos que se registren y del comportamiento que se observe en la inspección de la estructura.

La implementación de varios indicadores en criterios de evaluación de respuesta representó una ventaja para establecer el posible estado físico de los edificios porque los indicadores se apoyan entre sí, debido al diferente nivel de correlación que cada uno tiene en los diferentes sistemas estructurales. Lo anterior permite acotar las incertidumbres en la estimación del estado físico de un edificio.

Al ocurrir un sismo, el sistema propuesto procesa los registros, obtiene los valores de los indicadores y los compara con los de referencia. Con estos datos elabora un informe automático donde se presentan los principales datos del sismo, de la respuesta estructural y el posible nivel de daño. Inmediatamente después debe ser revisado por personal capacitado para su ratificación o posible corrección, y se emite el diagnóstico.

Reconocimientos

Se reconoce al Gobierno del Distrito Federal el patrocinio para el desarrollo del proyecto. A los propietarios del edificio por todas las facilidades otorgadas para la operación y mantenimiento de los instrumentos. Se hace patente la eficiente labor desempeñada por los ingenieros, técnicos y estudiantes encargados de la instalación, operación y mantenimiento de la instrumentación de los edificios estudiados y que en orden alfabético son: Leonardo Alcántara, David Almora Mata, Gerardo Castro, Marco Macías, Miguel Torres, Gerardo Rodríguez, R Vázquez, Juan Manuel Velasco, Jesús Ylizaliturri. También se agradece a José Camargo, Carlos Cruz Noguez y Carlos Huerta sus contribuciones en el programa de cómputo.

Referencias

Alcántara, N., Almora, M., Castro, G., Torres, M., Vázquez, R. y Ylizaliturri, J. (1997), "Sistema de interrogación telefónica en la red sísmica del edificio PC", XII Congreso de Instrumentación, San Luis Potosí, SLP, México

- Alcocer, S., Murià-Vila, D. y Peña, J. (1999), "Comportamiento dinámico de muros de mampostería confinada", n° 616, Serie Azul, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Aldama, B.D. (2009), "Proceso automatizado para determinar el estado estructural en edificios instrumentados", Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería de la UNAM
- Arias, A. (1970), "A Measure of Earthquake Intensity", Seismic Design for Nuclear Power Plants, Editor R. J. Hansen, MIT Press
- Ávila, J. (2000), "Cálculo de la respuesta sísmica de un edificio real de 16 niveles, instrumentado después de los sismos de 1985", Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre.
- Camargo, J., Cruz, C. A., Taborda, R. y Murià-Vila, D. (2009), "Extrapola v4.0. Programa para la generación de señales en edificios instrumentados suponiendo un diafragma infinitamente rígido", Instituto de Ingeniería, UNAM
- Celebi, M. (2007), "Health Monitoring of Buildings Using Threshold Drift Ratios - Now An Established Method". The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Vancouver, British Columbia, Canada, noviembre 13-16
- Correa, V.M. y Murià-Vila, D. (2005), "Efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado con modos de vibración acoplados", Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco Gro.
- Dipascuale, E. y Cakmak, A.S. (1988), "Evaluation of Seismic Damage Indices for Reinforced Concrete Structures", NCEER-89-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo
- Espinosa-Aranda, J.M., Ibarrola, G., García, A. y Zavala, M. (2007), El Sistema Acelerométrico Digital para Estructuras (SADE), CIRES, A.C., México.
- Iwan, W. D. (2003), "R-SHAPE: A Real – Time Structural Health and Performance Evaluation System", Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, Estados Unidos
- Huerta, C. H. (2007), "Método de estimación de parámetros modales de una estructura", Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería de la UNAM
- Meli R. y Reyes, C. (2002), "Criterios de Diseño Sísmico por Desempeño y su Aplicación en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", VII Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Cuernavaca.
- Murià-Vila, D. (2007), "Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados", III Coloquio de Ingreso a la Academia de Ingeniería, septiembre
- Murià Vila, D., Alcántara, L., Durán, R., Macías, M., Maldonado, S., Pérez, L.E., Tena, A., Vázquez, R., (1997) Edificios Instrumentados, Macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995, Capítulo 9, septiembre, editado por A. Tena, ISBN: 968-6190-83-X, Colima, p 197-232
- Murià Vila, D, Camargo, J, Aldama, BD, Domínguez, A (2007), "Análisis de la respuesta del edificio pc ante el sismo del 13 de abril del 2007", Instituto de Ingeniería, UNAM, patrocinado por Gobierno del Distrito Federal, Proyecto 7546, diciembre

Murià Vila, D., Rodríguez, G., Palacios, C.; Macías, M. (2001), "Estimación de parámetros dinámicos del edificio PC", Instituto de Ingeniería, UNAM, realizado para: Gobierno del Distrito Federal, proy 1543, México

Naeim, F., Alimoradi, A. y Miranda, E. (2006), "Immediate and Automatic Post-Earthquake Damage Assessment of Buildings", U.S. National Conference on Earthquake Engineering, abril 18-22, San Francisco, California, Estados Unidos

Park, P. y Paulay, T. (1975), Reinforced concrete structures, Wiley-Interscience, Estados Unidos

Rodríguez, G., Macías, M., Murià Vila, D. y Palacios, C. (2001), "Respuesta sísmica de un edificio instrumentado en un periodo de 10 años", XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Memorias en CD, noviembre

Richardson, M. H. y Formenti, D. L. (1982), "Parameter estimation from frequency response measurements using rational fraction polynomials" 1st International Modal Analysis Conference, Orlando, FL, Estados Unidos, noviembre

Safak, E. y Hudnut, K. (2006), "Real-Time Structural Monitoring and Damage Detection", 8th US National Conference on Earthquake Engineering San Francisco, California, Estados Unidos, abril 18-22

Stearns, S.D. y Hush, D.R. (1990), *Digital Signal Analysis*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall

Takahashi, M., Hagiwara, H., Uchimura, Y., Nasu, T. y Watabe, Y. (2007), "Actual Application of Real-Time Disaster Mitigation System To High-Rise Building". The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Vancouver, British Columbia, Canada, noviembre 13-16

Trifunac, M. D. (1972), "Comparisons between ambient and forced vibration experiments", *Earthquake and Structural Dynamics*, v 1, p 133-150

Rodríguez, N. y Quaas, R. (1990), "Respuesta estructural de un edificio instrumentado en la ciudad de México, durante sismos recientes", Memorias del Seminario Internacional sobre Instrumentación Sísmica y uso de Elementos Disipadores de Energía en el Comportamiento Estructural, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, D.F., octubre, p 125-155

Ruiz, R. (2007), "Torre Plaza Juárez", I Coloquio de Ingreso a la Academia de Ingeniería, enero.

APÉNDICE A: ANÁLISIS AUTOMÁTICOS IMPLEMENTADOS

Los análisis automáticos implementados en el orden en que se ejecutan son:

- Sincronización de las señales registradas con una referencia común de tiempo
- Polarización de las señales de acuerdo con la orientación de los sensores y el sistema de referencia
- Corrección de línea base de los registros originales, calculando el promedio de amplitudes del tramo inicial, previo a la fase intensa del movimiento. Dicho valor se resta a toda la señal
- Filtrado de la señal con un filtro Butterworth para eliminar los componentes frecuenciales que estén fuera de la banda frecuencial de interés. Para ello se emplearon las subrutinas propuestas por Stearns y Hush (1990)
- Generación de señales en puntos estratégicos cuando la cantidad de instrumentos sea suficiente y las hipótesis del procedimiento de cálculo puedan ser aplicadas (Camargo *et al.*, 2009)
- Integración de la historia de aceleraciones para calcular las historias de velocidad y desplazamiento
- Obtención de las aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos
- Cálculo de las distorsiones de entrepiso con los desplazamientos calculados en los niveles instrumentados y la distancia vertical que las separa.
- Determinación de las fuerzas de inercia en los niveles instrumentados a partir de las aceleraciones registradas y las masas correspondientes. Las fuerzas de los demás niveles se calculan aplicando un método de interpolación. Con estas fuerzas se calcula el cortante que actúa en la base del edificio como la suma de las fuerzas en cada piso y se divide entre el peso total de la estructura para obtener el coeficiente sísmico.