

Estimation of Soil-Structure Interaction Effects in a Building on Soft Soil in Mexico City

García-Illescas, M.Á.*, Aldama-Sánchez, B.D.*, Ramírez-Guzmán, L.* and Murià-Vila, D.*

*Instituto de Ingeniería UNAM, CP 04510

MEX (Tel: 556233600; e-mail: mgarciai@iingen.unam.mx,

aldamasanchez1@hotmail.com, LRamirezG@iingen.unam.mx, dmy@pumas.iingen.unam.mx).

Abstract: By using a simplified model, the use of subspace identification methods in monitoring the soil-structure interaction effects is analyzed. For this, a building on a soft soil zone is considered a studied case. The building has been monitored from 1990 to date and has instrumentation that allows tracking the soil-structure frequency and the translation and rocking frequencies due to soil-structure interaction effects. Also, the frequency related to the proper dynamic of the building is estimated. The estimation process is by using a recursive subspace identification method and spectral analysis through seismic records. The results show consistency with similar frequency values but minimal variations using subspace estimation methods, with the advantage that it can be automated and incorporated into structural warning systems.

Keywords: soil structure interaction, estimation processes, seismic events

1. INTRODUCCIÓN

La prevención de daños en edificios por sismos requiere de sistemas de monitoreo y alerta estructural para su supervisión. Estos sistemas, evalúan la respuesta vibratoria de la estructura, observando cambios en sus propiedades dinámicas tras eventos sísmicos (Sohn et al., 2002). Las frecuencias modales, identificadas con un mínimo número de mediciones, son menos susceptibles al ruido en las señales, aunque pueden verse afectadas por factores ambientales (Clinton et al., 2006). Las formas modales, analizadas mediante criterios como el *modal assurance criterion* (Allemang, 2003), están relacionadas con la ubicación de daño estructural, pero son vulnerables al ruido, pueden resultar complejas (Imregun & Ewinds, 1993) y requieren de más sensores para una ubicación de daño precisa, una limitación en la práctica. Como se observa, una estimación paramétrica adecuada es clave en estos sistemas de monitoreo y alerta estructural. Existen diversos métodos de identificación en la literatura, aplicables en el dominio del tiempo, así como de la frecuencia, y tanto a sistemas lineales como no lineales (Noël & Kerschen, 2016; Peeters & Ventura, 2003; Reynders, 2012).

Pocos sistemas de monitoreo y alerta estructural integran análisis de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE), el enfoque de este trabajo. Los edificios en suelos blandos ven afectada su respuesta por efectos locales que modifican sus condiciones de apoyo, efectos ISE, y en consecuencia su respuesta. Estudiar estos efectos permite realizar análisis más complejos de la dinámica estructural. Por ejemplo, en (Li et al., 2014; Yeganeh et al., 2015; Vicencio & Alexander, 2019; Oz et al., 2020; Zhang & Far, 2024), se observa su influencia en la respuesta de edificios de diferentes niveles y cómo estos han sufrido un mayor daño estructural en comparación con edificios en suelo rígido de similares características.

Por otro lado, el estudio y modelado de efectos ISE representa un desafío, ya que depende de las características geométricas

de la cimentación del edificio y de las propiedades dinámicas del suelo, como la velocidad de propagación de las ondas sísmicas y su interacción con la estructura. En trabajos como Tabora (2003) y Dobry (2014), se ha demostrado que el uso de modelos simplificados representa una opción viable para analizar dichos efectos ISE desde una perspectiva ingenieril y aplicando métodos como el análisis espectral.

En las siguientes secciones se describe el edificio de estudio, su instrumentación y el modelo de descomposición de movimientos empleado para la estimación paramétrica. Se presentan los procesos de identificación espectral y por subespacios, junto con los primeros resultados de estimación considerando efectos ISE, su discusión y conclusiones.

2. CASO DE ESTUDIO

El edificio de estudio, conocido como edificio PC, está ubicado en la Ciudad de México sobre un suelo blando. Consiste en una estructura de 17 niveles, con un entrepiso, cinco niveles de estacionamiento y una torre de oficinas de 12 niveles. La base del edificio y los estacionamientos tienen dimensiones de 30 m en la dirección transversal (T) y 54 m en la dirección longitudinal (L). Los pisos de oficinas miden 32 por 40 m en las direcciones T y L, respectivamente. El edificio fue afectado por el sismo de 1985 en la transición entre los niveles de estacionamiento y la torre, siendo posteriormente reparado e instrumentado para su monitoreo. Desde 1990, 13 acelerómetros triaxiales operan en diferentes niveles del edificio, en la base circundante y a nivel del suelo, Figura 1. Hasta 2022, esta red ha capturado 22 sismos de baja intensidad, 11 de moderada intensidad y uno de alta intensidad (19 de septiembre de 2017). La respuesta dinámica del edificio ha sido monitoreada hasta 2022, cuando la instrumentación comenzó a fallar.

Mediante un sistema de monitoreo y alerta estructural (Murià-Vila, Aldama-Sánchez, & Loera, 2010), la condición

estructural del edificio, ante sismos, se establece a través de indicadores de intensidad sísmica y de desempeño estructural: aceleración máxima del terreno (base en ausencia de terreno), intensidad de Arias (Arias, 1970), coeficiente sísmico, distorsión de entrepiso y variación de frecuencia. Los primeros resultados y análisis de los efectos ISE, con análisis espectral, pueden encontrarse en (Murià-Vila et al., 2017, 2020).

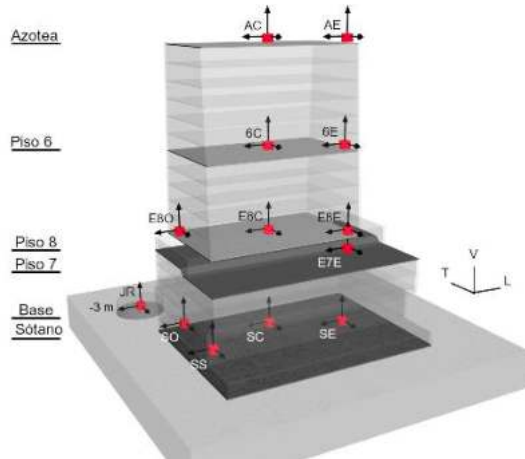


Figura 1. Edificio PC y red de acelerómetros.

El presente trabajo analiza el uso de métodos de identificación con base en subespacios para monitorear las propiedades dinámicas del edificio PC debido a los efectos ISE empleando modelos simplificados. Se identifican y comparan las frecuencias de vibración fundamentales asociadas a los efectos ISE mediante el método R4SID y el análisis espectral. Estas frecuencias permiten evaluar el impacto de los efectos ISE en la respuesta del sistema y su contribución al daño estructural durante sismos de intensidad moderada. El monitoreo a mediano y largo plazo es clave para mejorar los sistemas de alerta temprana y de monitoreo de salud estructural.

3. MODELO SIMPLIFICADO DE LUCO

Para estimar las frecuencias de vibración debido a los efectos ISE, se utiliza el modelo simplificado propuesto por Luco et al. (1987), denominado MSL. La respuesta total del edificio X_T , como se muestra en la Figura 2, se plantea como una suma de efectos debido a: el movimiento causado por la dinámica propia del edificio (X_S), el movimiento de translación con respecto al terreno ($X_B = X_O + X_G$) y el movimiento de cabeceo ($H\phi$):

$$X_T = X_O + X_G + H\phi + X_S \quad (1)$$

Las frecuencias por efectos ISE y su relación son las siguientes:

$$\frac{1}{\bar{f}_1^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_h^2} \quad (2)$$

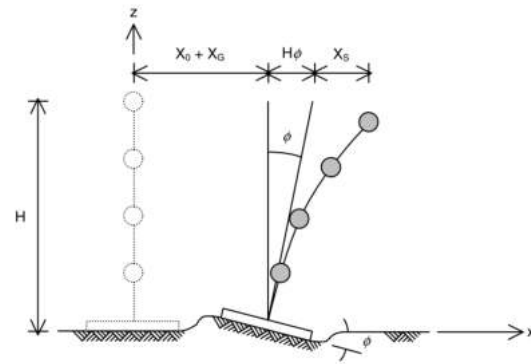


Figura 2. Descomposición de movimientos a partir del MSL

donde \bar{f}_1 es la frecuencia del sistema suelo-estructura, f_1 la frecuencia de la estructura, y f_c y f_h las frecuencias asociadas al movimiento de cabeceo y traslación del edificio, respectivamente. A partir de esta relación entre las frecuencias, se aplican diferentes metodologías para analizar los efectos ISE.

Cabe señalar que esta descomposición de movimientos ilustra los componentes de la respuesta dinámica del sistema suelo-edificio. Durante el proceso de estimación paramétrica con subespacios se emplean modelos dinámicos en variables de estado, como se explica más adelante, y en el caso espectral se emplean funciones de transferencia evaluadas durante ventanas de tiempo.

4. ANÁLISIS ESPECTRAL

La primera forma de estimar las frecuencias debidas a los efectos ISE es mediante el análisis espectral, comúnmente usado en ingeniería civil, este se realiza a partir de las relaciones siguientes:

$$f_h = \bar{f}_1 \left(\beta_1 \frac{X_B}{X_T} \right)^{-\frac{1}{2}}, f_c = \bar{f}_1 \left(\gamma_1 \frac{H\phi}{X_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

donde los cocientes X_B/X_T y $H\phi/X_T$ se evalúan en el dominio de la frecuencia cuando f es igual a \bar{f}_1 . Los parámetros β_1 y γ_1 dependen de la masa M y forma modal Φ del edificio, asociados al primer modo fundamental. Sus valores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del MSL

Parámetro	L	T
β_1	1.54	1.62
γ_1	1.09	1.17

La frecuencia de la estructura se obtiene a partir de la relación de frecuencias en (2):

$$f_1 = \bar{f}_1 \left(1 - \beta_1 \frac{X_B}{X_T} - \gamma_1 \frac{H\phi}{X_T} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Es importante observar que el análisis espectral requiere una primera estimación de la frecuencia del sistema suelo-

estructura \bar{f}_1 , la cual se obtiene mediante el método recursivo 4SID, descrito en la sección siguiente. También cabe señalar que el análisis espectral se realiza con ventanas móviles de 20 a 30 segundos, suficientes para poder recuperar los modos fundamentales de vibración.

5. MÉTODO RECURSIVO 4SID

El método recursivo 4SID de Oku and Kimura (1999) estima un modelo lineal en variables de estado definido por:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (5a)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \quad (5b)$$

Donde $\mathbf{x}(k)$ son los estados del sistema, desplazamientos y velocidades relativas, evaluados en el instante k . Las señales de entrada $\mathbf{u}(k)$ y salida $\mathbf{y}(k)$ corresponden a las aceleraciones absolutas a nivel del suelo y en los niveles instrumentados del edificio. Los datos de entrada y salida se ordenan en matrices Hankel:

$$\mathbf{U}_N = \begin{bmatrix} u_{k+1} & u_{k+2} & \cdots & u_{k+N-\nu+1} \\ u_{k+2} & u_{k+3} & \cdots & u_{k+N-\nu+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{k+\nu} & u_{k+\nu+1} & \cdots & u_{k+N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde la construcción de la matriz \mathbf{Y}_N es análoga, pero con las salidas del sistema. En estas matrices, ν representa el número de filas y N define la cantidad inicial de datos con la que se realiza la primera estimación paramétrica. Luego, se construye una matriz de datos entrada-salida comprimida, cuya dimensión permanece constante:

$$\mathbf{E}_N = \mathbf{Y}_N \mathbf{\Pi}_{\mathbf{U}_N}^\perp \mathbf{Y}_N^T \quad (7)$$

Donde $\mathbf{\Pi}_{\mathbf{U}_N}^\perp$ define una proyección ortogonal. Para más detalles consultar Oku y Kimura (1999). A partir de la actualización recursiva, con cada nuevo par de datos entrada-salida, se realiza una descomposición en valores singulares SVD:

$$\mathbf{E}_N = [\mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^T] \begin{bmatrix} \mathbf{S}_N^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_N^T \\ \mathbf{F}_N^{\perp T} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A partir del resultado, la información modal se extrae de la matriz \mathbf{E}_N cuyo espacio columna corresponde al espacio imagen de la matriz de observabilidad extendida ϑ . Así, mediante una pseudo inversa \dagger se puede extraer el par de matrices $(\mathbf{A}_N, \mathbf{C}_N)$:

$$\mathbf{A}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_N \\ \vdots \\ \mathbf{C}_N \mathbf{A}_N \\ \mathbf{C}_N \mathbf{A}_N^{\nu-2} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} \mathbf{C}_N \mathbf{A}_N \\ \vdots \\ \mathbf{C}_N \mathbf{A}_N^2 \\ \mathbf{C}_N \mathbf{A}_N^{\nu-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

cuyos valores singulares de \mathbf{A}_N permiten obtener la información modal:

$$\omega_i = \frac{|\ln \lambda_i|}{\Delta t}, \quad \xi_i = -\frac{\ln |\lambda_i|}{|\ln \lambda_i|}, \quad \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{C}_N \boldsymbol{\Phi} \quad (10)$$

donde λ_i corresponde al i -ésimo autovalor de \mathbf{A}_N , mientras ω_i y ξ_i representan la frecuencia angular y el amortiguamiento correspondientes al autovalor λ_i . Las $\boldsymbol{\Phi}$ formas modales se estiman en los niveles instrumentados (\mathbf{C}_N) del edificio. Este proceso se repite de manera recursiva con cada nuevo conjunto de datos entra-salida del sistema.

En este trabajo, la estimación paramétrica se realiza con modelos de orden 2 hasta 100, con intervalos de 1 s entre estimaciones y un factor de olvido de 0.9996. Los diagramas de estabilización se analizan removiendo modos espurios, modos sin autovalores complejos conjugados y aquellos con un amortiguamiento superior al 15%. Los modos fundamentales se obtienen mediante análisis estadístico, calculando la media de la frecuencia, amortiguamiento y forma modal. En estudios previos se ha observado que con modelos de orden hasta 100, los primeros dos modos del sistema se recuperan con variaciones mínimas del 2% y 5%, respectivamente, con respecto al valor promedio obtenido. También, un mayor orden del modelo identificado incrementa el costo de procesamiento computacional sin tener una mejoría significativa en las estimaciones. En cuanto al factor de olvido, este puede ser adaptable, pero en edificios sobre suelo blando no tiene un impacto significativo en la recuperación de las frecuencias del sistema, debido a la interacción suelo-estructura que propicia un tiempo de asentamiento entre la dinámica del edificio y la de sitio, después de un sismo.

La relación entre los métodos de subespacios y la estimación de los efectos de ISE se deriva de las siguientes funciones:

$$RF_S = \frac{\ddot{X}_T}{\ddot{X}_T - \ddot{X}_S}, RF_B = \frac{\ddot{X}_T}{\ddot{X}_T - \ddot{X}_B}, RF_C = \frac{\ddot{X}_T}{\ddot{X}_T - H\ddot{\varphi}} \quad (11)$$

donde RF_S representa la relación de cocientes asociada al movimiento propio de la estructura, RF_B al movimiento de traslación y RF_C al movimiento de cabeceo de la estructura rígida, respectivamente. La frecuencia del sistema suelo-estructura puede estimarse mediante la relación X_T/X_G . Estas funciones de transferencia (Taborda, 2003) se emplean para definir las señales de entrada y salida en el proceso de estimación con base en subespacios. En este trabajo, la estimación de efectos de ISE se realiza en las componentes L y T, utilizando algunos registros sísmicos del edificio PC, Tabla 2.

Tabla 2 Características de los eventos sísmicos registrados

Evento	Fecha	M	Dis. Ep. (km)	Amáx, (cm/s ²)	IArias (cm/s ²)
99-2	21/06/1999	6.2	324	6.10	0.72
07-1	13/04/2007	6.3	293	13.7	2.37
12-1	20/03/2012	7.4	357	42.9	29.0

Dis. Ep. Distancia epicentral, Amáx Aceleración máxima de terreno, IArias Intensidad de Arias. M Magnitud sísmica.

6. RESULTADOS DE ESTIMACIÓN

Los primeros resultados cubren tres sismos de moderada intensidad registrados durante el periodo de monitoreo de la estructura: 99-2, 07-1 y 12-1. Las Figuras 3 y 4 muestran las frecuencias estimadas del sistema suelo-estructura, de la estructura y las frecuencias por movimiento horizontal de traslación y de cabeceo, para las componentes L y T.

La comparación de los resultados obtenidos mediante el método recursivo R4SID y el análisis espectral se realiza utilizando ventanas de promedio de 20 segundos, asegurando una comparación equitativa. Como el análisis espectral emplea las frecuencias del sistema suelo-estructura identificadas con R4SID, los resultados por ventana son los mismos para esta frecuencia y, en consecuencia, las marcas en las gráficas correspondientes están superpuestas.

Las Figuras 3 y 4 muestran que los resultados del análisis espectral y el método R4SID son generalmente consistentes, aunque presentan diferencias en algunos intervalos, especialmente en la fase inicial de los sismos. Para comparar los resultados, se calcula la diferencia porcentual entre el valor espectral y el de R4SID para cada ventana de tiempo, tomando este último como referencia, y obteniendo luego un promedio de esas diferencias.

En la componente L, las diferencias porcentuales promedio son de 17.4% en la frecuencia de la estructura, 17.63% en la frecuencia de cabeceo, y 17.35% en la de traslación, considerando los tres sismos. Las mayores diferencias fueron de 26 % en el evento 07-1 para la frecuencia de la estructura, 22 % en el evento 99-2 para la frecuencia de cabeceo, y 21% en el evento 07-1 para la frecuencia de traslación.

En la componente T, las diferencias porcentuales promedio son de 7.15% en la frecuencia de la estructura, 11.56% en la de cabeceo, y 20.27% en la de traslación. Las mayores diferencias fueron 10 % en el evento 07-1 para la frecuencia de la estructura, 15 % en el evento 99-2 para la frecuencia de cabeceo, y 25 % en el evento 07-1 para la frecuencia de traslación.

Se observa que las diferencias son menores en la componente T. La frecuencia de traslación es la que presenta mayores diferencias en general, pero tiene una menor participación en la respuesta total del sistema, 7%. Cabe señalar, el análisis espectral requiere una estimación inicial de la frecuencia del sistema suelo-estructura, que anteriormente (Murià-Vila et al., 2017) se obtenía con otros métodos, lo que generaba mayores variaciones en las frecuencias estimadas asociadas a los efectos ISE.

Las Tablas 3 y 4 muestran las frecuencias promedio durante la fase final de los sismos, donde la variación de frecuencia está asociada a posibles daños estructurales. Esta variación se calcula comparando las frecuencias en la fase final de los sismos con respecto a un valor de referencia.

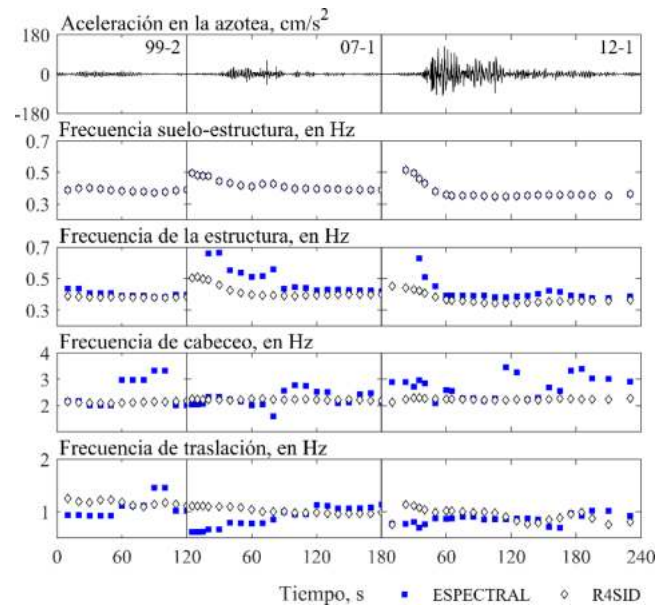


Figura 3. Registros sísmicos y frecuencias del sistema suelo-edificio y de la estructura, y frecuencias por efecto de cabeceo y movimiento de traslación horizontal, componente L.

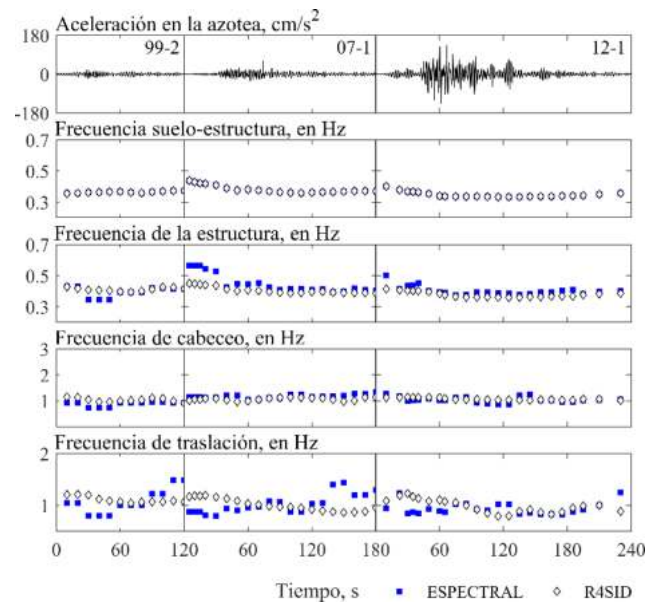


Figura 4. Registros sísmicos y frecuencias del sistema suelo-edificio y de la estructura, y frecuencias por efecto de cabeceo y movimiento de traslación horizontal, componente T.

También se muestra el cociente entre la frecuencia de la estructura y del sistema suelo-estructura (f_1/f_1), cuyo valor indica la relevancia de los efectos ISE en la respuesta dinámica del edificio. En cuanto a los factores de participación, estos son del orden de 8 a 9 % para el caso de la frecuencia de cabeceo y de 6 a 7% para la frecuencia de traslación, siendo la frecuencia f_h la de menor participación en la respuesta X_T .

Tabla 3. Frecuencias estimadas en la fase final, Comp. L

Frecuencias	\bar{f}_1	f_1	f_h	f_c	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$
Sismo	R4SID				
99-2	0.39	0.38	1.12	2.19	0.97
07-1	0.39	0.40	1.00	2.21	1.03
12-1	0.37	0.38	0.84	2.23	1.01
Sismo	Espectral				
99-2	0.39	0.40	1.02	2.02	1.02
07-1	0.39	0.42	1.17	2.22	1.08
12-1	0.37	0.41	0.91	2.25	1.11

Frecuencias en Hz

Tabla 4. Frecuencias estimadas en la fase final, Comp. T

Frecuencias	\bar{f}_1	f_1	f_h	f_c	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$
Sismo	R4SID				
99-2	0.38	0.42	1.07	0.91	1.11
07-1	0.37	0.39	1.03	1.13	1.03
12-1	0.35	0.39	0.81	0.99	1.12
Sismo	Espectral				
99-2	0.38	0.41	1.49	0.93	1.10
07-1	0.37	0.41	1.30	1.34	1.08
12-1	0.35	0.39	1.22	1.09	1.10

Frecuencias en Hz

En la componente L, Tabla 3, los resultados obtenidos en la fase final son similares entre el análisis espectral y el método R4SID. La frecuencia del sistema suelo-estructura disminuye ligeramente de 0.39 a 0.37 Hz, mientras la de la estructura no presenta un cambio claro, cambiando de 0.38 a 0.40 y luego a 0.38 Hz con el método R4SID, y de 0.40 a 0.42 y finalmente a 0.41 Hz en el análisis espectral.

Se observa que el análisis espectral muestra valores ligeramente superiores en la frecuencia de la estructura, reflejándose en cocientes f_1/\bar{f}_1 de 1.02 a 1.11, en contraste con el caso R4SID donde los cocientes son de 0.97 a 1.03. En cuanto a la frecuencia por efecto de cabeceo f_c , esta varía de 2.19 a 2.23 Hz en el caso R4SID y de 2.02 a 2.25 Hz en el caso espectral, mostrando en ambos casos un ligero aumento. En la frecuencia por traslación f_h , se observa una ligera disminución de 1.12 a 0.84 Hz en el caso R4SID y de 1.02 a 0.91 Hz en el análisis espectral.

En la componente T, Tabla 4, se observa un comportamiento similar al de la componente L, con mínimas diferencias. La frecuencia del sistema suelo-estructura sufre una ligera disminución de 0.38 a 0.35 Hz, mientras que la de la estructura tiene una ligera disminución de 0.42 a 0.39 Hz en el caso R4SID y de 0.41 a 0.39 Hz en el caso espectral. En cuanto a los cocientes f_1/\bar{f}_1 , estos son de 1.03 a 1.12 en el caso R4SID y de 1.08 a 1.10 en el análisis espectral. Aparentemente, el efecto de interacción suelo estructura es más evidente en la componente T, donde ambas metodologías proporcionan mayores cocientes f_1/\bar{f}_1 en comparación con la componente

L. En cuanto a la frecuencia por efecto de cabeceo f_c , esta varía de 0.91 a 1.13 Hz en el caso R4SID y de 0.93 a 1.34 Hz en el caso espectral, mostrando un valor menor en comparación con la componente L. En la frecuencia por traslación f_h , los valores varían de 1.07 a 0.81 Hz en el método R4SID y de 1.49 a 1.22 Hz en el caso espectral, con una ligera disminución, aunque en este caso con una mayor diferencia entre los resultados de ambas metodologías.

7. CONCLUSIONES

Se presentaron los primeros resultados de emplear métodos de identificación con base en subespacios para el monitoreo de efectos de interacción suelo-estructura (ISE) en un edificio en suelo blando localizado en la Ciudad de México. El edificio ha sido monitoreado desde 1990 hasta mediados de 2022, contando con instrumentación suficiente para estimar sus parámetros modales considerando el sistema completo, suelo-estructura, así como para estimar las frecuencias asociadas a efectos ISE, frecuencias por movimiento de cabeceo y de traslación en las componentes L y T. Para ello, se emplearon tres registros sísmicos representativos del periodo bajo el cual ha sido monitoreado el edificio.

Las estimaciones se realizaron mediante el método recursivo R4SID con base en subespacios y mediante el análisis espectral. Los resultados se compararon con ambas metodologías, considerando los valores promedio de las frecuencias estimadas por ventanas móviles de 20 segundos, ya que espectralmente se requieren ventanas de tiempo suficientes para recuperar los modos fundamentales de vibración del sistema.

En general, los primeros resultados muestran que las estimaciones son afines, con ligeras diferencias porcentuales promedio de 12.34, 14.59 y 18.81 % en las frecuencias de la estructura, por movimiento de cabeceo y de traslación horizontal, respectivamente. La diferencia más notable se observó en la componente L. Estas diferencias se deben, principalmente, a una mayor variación en los resultados espectrales, especialmente durante la fase inicial de los eventos sísmicos.

En cuanto a los efectos ISE, estos fueron más notorios en la componente T, donde los cocientes de frecuencia del sistema suelo-estructura y estructura mostraron valores alrededor de 1.10 en comparación a la componente L, donde fueron menores. Finalmente, la frecuencia de la estructura mostró mínimas disminuciones en sus valores de 0.39 a 0.37 Hz en la componente L y de 0.38 a 0.35 Hz en la componente T, con disminuciones de 5.12 y 7.9 % respectivamente. La frecuencia por movimiento de cabeceo aumentó en un 6 % y la de traslación disminuyó en un 22 %, en la componente L. En la componente T solo la frecuencia de traslación mostró un aumento alrededor del 20%.

Como trabajo a futuro, se realizarán pruebas de estimación paramétrica con registros de vibración ambiental y se completarán los registros sísmicos de 1990 hasta 2022, cuando la instrumentación comenzó a reportar fallas. Esto se hará para

realizar un análisis más detallado de la respuesta del edificio y de los efectos de interacción a lo largo de su periodo de monitoreo, a fin de poder establecer su condición en términos de salud estructural.

AGRADECIMIENTOS

El estudio se realizó con el financiamiento provisto por el Instituto de Ingeniería. Los autores agradecen el apoyo de L. A. Aguilar, M. Ayala, C. Pérez, A. L. Ruiz, R. Delgado, G. G. Aguilar, M.A. Macías, D. Almora, J. M. Velasco, H. Sandoval, G. Castro, M.L, Suárez, R. Vázquez, I. Molina, M.G. Contreras, C.R. Tejada, A.M. por la operación y mantenimiento de la instrumentación del edificio, así como por el procesamiento de los registros sísmicos. Se agradece a los propietarios del edificio por las facilidades y apoyo proporcionado durante todo el proceso de instrumentación y monitoreo.

REFERENCIAS

- Allemang, R.J. (2003). The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse. *Sound and Vibration*, 37(8), 14–21.
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity, In: R.J. Hansen (ed.). *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, The MIT Press, Cambridge, MA.
- Clinton, J.F., Bradford, S.C., Heaton, T.H., and Favela, J. (2006). The observed wander of the natural frequencies in a structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(1), 237–257.
- Dobry, R. (2014). Simplified methods in soil dynamics. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 61, pp. 246-268.
- Imregun, M., and Ewins, D.J. (1993). Realisation of Complex Mode Shapes. In *Proceedings of 11th International Modal Analysis Conference*, pp. 1303–1309.
- Li, M., Lu, X., Lu, X., and Ye, L. (2014). Influence of soil–structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(5), pp. 477-485.
- Luco, J.E., Trifunac, M.D., and Wong, H.L. (1987). On the apparent change in dynamic behavior of a nine-story reinforced concrete building, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(6), pp. 1961–1983.
- Murià-Vila D, Aldama-Sánchez BD, García-Illescas MÁ, and Rodríguez-Gutiérrez G (2020) Monitoring of two rehabilitated buildings and their structural response during the 2017 Mexico earthquakes. In: *17th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Murià-Vila, D., Aldama-Sánchez, B.D., and Loera S. (2010). Structural warning for instrumented buildings. In: *14th European Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-8.
- Murià-Vila, D., Camargo, J., and Aldama-Sánchez, B.D. (2017). Influence of soil-structure interaction and subsoil consolidation in the seismic response of a building. In: *16th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-12.
- Noël, J. P., and Kerschen, G. (2016). 10 years of advances in nonlinear system identification in structural dynamics: a review. In: *Proceedings of ISMA 2016-International Conference on Noise and Vibration Engineering*.
- Oku, H., and Kimura, H. (1999). A recursive 4SID from the Input-Output point of View, *Asian Journal of Control*, 1(4), pp. 258–269.
- Oz, I., Senel, S. M., Palanci, M., and Kalkan, A. (2020). Effect of soil-structure interaction on the seismic response of existing low and mid-rise RC buildings. *Applied Sciences*, 10(23), p. 8357.
- Peeters, B., and Ventura, C.E. (2003). Comparative study of modal analysis techniques for bridge dynamic characteristics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(5), 965–988.
- Reynders, E. (2012). System Identification Methods for (Operational) Modal Analysis: Review and Comparison. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 19(1), 51–124.
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F., and Czarnecki, J. (2002). A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996-2001. *Los Alamos National Laboratory*, USA, 1–7.
- Taborda, R., (2003). Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado en Acapulco, Tesis de maestría, Posgrado UNAM, México.
- Vicencio, F., and Alexander, N.A. (2019). Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction in unsymmetrical plan buildings due to seismic excitation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, p. 105817.
- Yeganeh, N., Bazaz, J. B., and Akhtarpour, A. (2015). Seismic analysis of the soil–structure interaction for a high rise building adjacent to deep excavation. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 79, pp. 149-170.
- Zhang, X., and Far, H. (2024). Beneficial and detrimental impacts of soil-structure interaction on seismic response of high-rise buildings. *Advances in Structural Engineering*, 13694332241255747.