

Damage detection of building structure based on interval observer

Jesús Morales-Valdez^{1,3} Jesús David Avilés² Wen Yu³

¹ *Cátedras CONACYT, e-mail: jmoralesv@ctrl.cinvestav.mx*

² *Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Administrativas y Sociales,
FCIAS-UABC, Av. Universidad No. 1. San Fernando, Tecate B.C.
21460, México, e-mail: david.aviles@uabc.mx*

³ *Departamento de Control Automático, CINVESTAV-IPN, Gustavo A.
Madero 07360 Ciudad de México, (e-mail: yuw@ctrl.cinvestav.mx)*

Abstract: This article presents an approach to detecting damage in buildings using interval observers. Firstly, the interval observer is designed to establish the upper and lower bounds of the displacement and velocity variables of the structural response, under nominal conditions. Assuming that the structural parameters change during seismic activity, then the same will also happen with the response. If the floors are affected by structural damage, they will have changes in their response. So, if such behavior is greater or less than the adaptive thresholds, established by the interval observer, it is assumed as a clear indicator of damage. This is a consequence of the loss of rigidity in the damaged floor. The simulation results verify that the proposed method is promising for practical applications.

Keywords: Damage detection, interval observers, building structures.

1. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de las estructuras civiles son susceptibles a diversos tipos de daños durante su vida útil. Las causas suelen ser diversas y variantes, entre ellas el deterioro continuo de los elementos estructurales, los efectos de fatiga, y fenómenos naturales inesperados, como terremotos, vientos fuertes, entre otros.

En este sentido, la tecnología de Monitoreo de Salud Estructural (SHM) es un tópico emergente en ingeniería civil que previene fallas estructurales catastróficas, mediante evaluaciones continuas y periódicas de la integridad de las infraestructuras civiles. La mayoría de los métodos de SHM se basan en el análisis de vibraciones que estudia las características globales, como las frecuencias naturales, las formas modales. Una revisión extensa de estos métodos se puede encontrar en (Doebbling et al., 1998; Carden and Fanning, 2004), mientras que una revisión amplia de los métodos de vibración con énfasis en aplicaciones de ingeniería estructural se describen en (Das et al., 2016; Kong et al., 2017). De manera similar, los métodos presentados en (Kim et al., 2003; Hwang and Kim, 2004; Huang et al., 2012) también son técnicas para la detección de daños al analizar los cambios en sus frecuencias de vibración. Dichos cambios se comparan con un ancho de banda en una situación sin daños. Sin embargo, en ambos casos, estos métodos requieren excitar un edificio a altas frecuencias, lo cual no es fácil de lograr y, por lo tanto, el daño puede pasar desapercibido. Además, las

influencias ambientales como la lluvia y la temperatura pueden inducir cambios en las frecuencias de vibración incluso si no hay daños (Clinton et al., 2006; Nayeri et al., 2008; Herak and Herak, 2010).

Por otro lado, el daño progresivo inducido en los componentes estructurales puede significativamente poner a la respuesta estructural al régimen no lineal. Recientemente, se han desarrollado enfoques para la identificación de sistemas estructurales no lineales. En estudios de identificación basados en un enfoque paramétrico, varios investigadores han adoptado el modelo de Bouc Wen (Smyth et al., 1999; Ikhouane et al., 2005). Sin embargo, estos métodos deben satisfacer la condición de excitación persistente, que es difícil de lograr. Además, la complejidad de los métodos crece de acuerdo con el número de parámetros a identificar. Otros trabajos relacionados se exploran en Farrar et al. (2007); Chatzi et al. (2010) donde se discuten diferentes técnicas de identificación no lineal para la detección de daños.

El método de observación de estados, conocido como observadores intervalo, ha tenido un interés creciente en aplicaciones reales, proporcionando una solución viable para diversas clases de sistemas altamente inciertos o con perturbaciones no desvanecientes (Gouze et al., 2000; Efimov et al., 2013; Avilés and Moreno, 2018; Meslem et al., 2020; Avilés and Moreno, 2020), y entregando una cota superior e inferior de las variables de estado inciertas o perturbadas. En otras palabras, el observador intervalo

proporciona un par de estimaciones de estado, una superior y otra inferior, que preservan el orden parcial con respecto a la trayectoria del estado incierta/perturbada. La mayoría de los métodos presentados en la Literatura están basados en la aplicación de la propiedad sistémica de Cooperatividad, la cual es dependiente de las coordenadas del sistema, en las dinámicas de los errores de estimación, estableciendo el ordenamiento parcial de las trayectorias del error de estimación, a partir de un ordenamiento parcial adecuado, y por ende asegurando que las estimaciones superior e inferior de los observadores intervalo preservan el ordenamiento parcial con respecto al estado (Avilés and Moreno, 2018). Recientemente, (Meslem et al., 2020) desarrollaron un método para diseñar observadores intervalo para una clase de sistemas lineales invariantes en el tiempo, el cual está basado en un observador Luenberger en combinación con un predictor intervalar, y cuyas condiciones no dependen de la propiedad de Cooperatividad ni de transformaciones de coordenadas. Adicionalmente, considerando el enfoque de observadores intervalo, recientemente se han propuesto nuevos esquemas de detección de fallas y daños en sistemas dinámicos, monitoreando que las mediciones están acotadas de forma superior e inferior por las estimaciones de las salidas proporcionadas por los observadores intervalo (Avilés et al., 2016; Rotondo et al., 2016; Zhang and Yang, 2017). Equivalentemente, los métodos de detección de anomalías confían en la comparación entre los umbrales adaptables y la señal residual.

En este artículo, se desarrolla un esquema de detección de daño empleando el método de observadores por intervalos, reportado en la Literatura en (Meslem et al., 2020), como una solución alternativa a los métodos de análisis modal para la evaluación de daño en edificios de varios pisos. Se introduce cotas inferiores y superiores suponiendo un modelo con incertidumbres. Analizando los datos provenientes de los sensores de aceleración se estima la respuesta estructural y se comparan con la respuesta estimada por el observador intervalo. Cuando la respuesta se encuentra fuera de las estimaciones proporcionadas por el observador intervalo, se supone la presencia de daño estructural en el piso, en el cual se observa este comportamiento. La hipótesis principal es que después de que el edificio se daña, se reduce su capacidad para disipar energía, debido a la pérdida de rigidez. Este hecho puede ser un claro indicador de la presencia de daños. En este sentido, el uso de los observadores intervalo presentan una alternativa novedosa para el diagnóstico de daño en estructuras civiles tipo edificios. Los resultados de simulación de un prototipo a escala reducida de cinco pisos confirman que el método propuesto es prometedor para aplicaciones prácticas.

La organización de este trabajo es la siguiente. El modelo matemático del edificio se presentan en la sección 2, mientras que el diseño del observador intervalar se describe en la sección 3. Los resultados experimentales están en la sección 4. Finalmente, se proporciona un resumen de los hallazgos en la sección 5.

Notaciones: \succeq establece el ordenamiento parcial para dos vectores $x, z \in \mathbb{R}^n$, si $x_i \geq z_i$ para todo $i = 1, \dots, n$ entonces $x \succeq z$. También, es válido para las representaciones matriciales $A, B \in \mathbb{R}^n$, si $A_{ij} \geq B_{ij}$ entonces $A \succeq B$. Especialmente, si $x \succeq 0$ entonces x es vector no-negativo, i.e. $x_i \geq 0 \forall i = 1, \dots, n$. Una matriz no-negativa $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es denotada como $A \succeq 0$, si $A_{ij} \geq 0$ con $1 \leq \{i, j\} \leq n$. Tal notación no debe ser confundida con una matriz definida positiva P (resp. semi-definida positiva), la cual es representada por $P = P^T > 0$ (resp. $P = P^T \succeq 0$). Además, $M = \max\{A, B\}$ es la matriz donde cada entrada está dada por $m_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$. Definimos $N^+ = \max\{N, 0_{p \times m}\}$ y $N^- = N^+ - N$. El valor absoluto está dado como $|N| = N^+ + N^-$.

2. MODELO MATEMÁTICO

Sea el modelo de edificio a cortante con múltiples pisos, sísmicamente excitado. El cual esta construido sobre piso firme, y en consecuencia posee un comportamiento lineal, cuya dinámica está gobernada por

$$M(\ddot{x} + l\ddot{x}_g) + C\dot{x} + Kx = 0 \quad (1)$$

donde M , C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, y definidas como

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix} > 0 \quad \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_n \end{bmatrix} \geq 0 \quad \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (2)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix} > 0 \quad \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (3)$$

con

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}, \quad (4)$$

$$\dot{x} = [\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}, \quad (5)$$

$$\ddot{x} = [\ddot{x}_1, \ddot{x}_2, \dots, \ddot{x}_n]^T \in \mathbb{R}^{n \times 1}, \quad (6)$$

$$l = [1, 1, 1, \dots, 1] \in \mathbb{R}^{n \times 1} \quad (7)$$

donde, n representa el número de pisos, m_i , c_i y k_i con $i = 1, 2, \dots, n$, son la masa, el amortiguamiento y la rigidez lateral de entre-piso, respectivamente; mientras m_i corresponde a la i -ésima masa. Las entradas del vector x , \dot{x} , \ddot{x} son los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones de cada piso, respectivamente, medidas con respecto a la base, mientras que \ddot{x}_g representan la aceleración del suelo inducida por el sismo.

Suponiendo que el edificio presenta daño estructural, se agrega un término de incertidumbre paramétrica

$$(M + \Delta M)(\ddot{x} + l\ddot{x}_g) + (C + \Delta C)\dot{x} + (K + \Delta K)x = 0. \quad (8)$$

Está última expresión también reescrita como,

$$\widetilde{M}(\ddot{x} + l\ddot{x}_g) + \widetilde{C}\dot{x} + \widetilde{K}x = 0. \quad (9)$$

donde $\widetilde{M} = (M + \Delta M)$, $\widetilde{C} = (C + \Delta C)$ y $\widetilde{K} = (K + \Delta K)$.

En este trabajo, las variables ΔM , ΔC y ΔK son desconocidas, pero acotadas, y se suponen que modifican la respuesta estructural a partir de la acción sísmica. Sin embargo, tomando en cuenta que el estado interno es desconocido con parámetros inciertos, se deben estimar mediante el observador intervalo para acotar la respuesta máxima del sistema.

3. DISEÑO DEL OBSERVADOR INTERVALO Y DETECCIÓN DE DAÑO

En esta sección, se introduce el esquema de observador intervalo, reportado en Meslem et al. (2020), para el modelo lineal en el espacio de estados, con la finalidad de estimar las variables de desplazamientos y velocidades de los pisos. Además, en este trabajo, se establece la comparación entre las mediciones y las señales de salida para monitorear y detectar la presencia de daño en el edificio a cortante.

Sea el sistema lineal, dado por las ecuaciones siguientes

$$\Gamma_S : \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + w(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (10)$$

donde $x(t) \in \mathbf{R}^n$, $w(t) \in \mathbf{R}^m$, $y(t) \in \mathbf{R}^p$ representan las variables de estado, de entrada asociada a incertidumbres paramétricas/perturbaciones y de salida, respectivamente. La señal $u(t)$ representa una entrada desconocida, la cual es acotada por intervalos, como se describe en la siguiente forma

$$u^+(t) \succeq u(t) \succeq u^-(t), \quad \forall t \geq 0, \quad (11)$$

con $u^+(t)$ y $u^-(t)$ son las cotas conocidas. Adicionalmente, se considera que el sistema Γ_S satisface la siguiente suposición.

Suposición 1. El par (A, C) es detectable.

hora bien, consideramos el observador intervalo para el sistema Γ_S de forma similar al propuesto en (Meslem et al., 2020), el cual está basado en un observador Luenberger y un predictor de intervalo. En el primer paso, se considera la forma del observador como

$$\Gamma_{O_1} : \begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \\ y(t) = C\hat{x}(t), \end{cases} \quad (12)$$

donde $\hat{x}(t)$ representa la estimación de $x(t)$. La matriz L requiere ser seleccionada para asegurar la propiedad de estabilidad del observador.

Definiendo el error de estimación como $e(t) \triangleq x(t) - \hat{x}(t)$, obtenemos las dinámicas del error de estimación, expresadas por las ecuaciones,

$$\Gamma_E : \begin{cases} \dot{e}(t) = A_L e(t) + Bu(t) + w(t), \\ e(t) = I_n e(t), \quad e(t_0) = e_0, \end{cases} \quad (13)$$

donde $w(t)$ representa una entrada exógena desconocida y acotada en el sistema del error de estimación Γ_E . La matriz está dada por $A_L = A - LC$. I_n es la matriz identidad de dimensiones $n \times n$. Considerando la condición nominal del sistema, $w(t) = 0$, el comportamiento del error de estimación puede ser examinado mediante la solución del sistema Γ_E , descrito por

$$e(t) = \Phi(t, t_0) e(t_0) + z(t), \quad (14)$$

donde

$$z(t) = \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) Bu(\tau) d\tau, \quad (15)$$

con $\Phi(t, t_0) = \exp(A_L(t - t_0))$ es la matriz de transición de estado del sistema Γ_E en (13), mientras z representa el término exógeno de la solución del sistema lineal. Note que la función de transferencia a partir de $u(t)$ a $e(t)$ está dada por

$$G_{ue}(s) = (sI_n - A_L)^{-1} B. \quad (16)$$

En el segundo paso, establecemos el predictor intervalar basado en el observador de Luenberger Γ_{O_1} , dado por las siguientes ecuaciones

$$\Gamma_{O_2} : \begin{cases} \dot{z}^+(t) = \Phi^+(t, t_0) (B^+ u^+ - B^- u^-) - \\ \quad \Phi^-(t, t_0) (B^+ u^- - B^- u^+), \\ \dot{z}^-(t) = \Phi^+(t, t_0) (B^+ u^- - B^- u^+) - \\ \quad \Phi^-(t, t_0) (B^+ u^+ - B^- u^-), \end{cases} \quad (17)$$

$$\Gamma_{O_3} : \begin{cases} x^+(t) = \hat{x}(t) + \Phi^+(t, t_0) e^+(t_0) + \\ \quad z^+(t) - \Phi^-(t, t_0) e^-(t_0), \\ x^-(t) = \hat{x}(t) + \Phi^+(t, t_0) e^-(t_0) + \\ \quad z^-(t) - \Phi^-(t, t_0) e^+(t_0). \end{cases} \quad (18)$$

donde $x^+(t)$ y $x^-(t)$ son las cotas superiores e inferiores para el vector de estado $x(t)$. $(\Phi^+(t, t_0), \Phi^-(t, t_0))$ y $(z^+(t), z^-(t))$ son las descomposiciones positivas de $\Phi(t, t_0)$ y $z(t)$, respectivamente. Adicionalmente, las matrices B^+ y B^- en (17) representan la descomposición positiva de la matriz B . De igual forma, $e^+(t_0) = x^+(t_0) - \hat{x}(t_0)$ y $e^-(t_0) = x^-(t_0) - \hat{x}(t_0)$ son las cotas superior e inferior, representaciones positivas, del error de estimación inicial $e(t_0)$.

Nota 1. A partir de las ecuaciones de las cotas superior e inferior en Γ_{O_3} en (18), se pueden obtener las cotas de los errores de estimación, dadas por

$$e^+(t) = z^+(t) + \Phi^+(t, t_0) e^+(t_0) - \Phi^-(t, t_0) e^-(t_0), \\ e^-(t) = z^-(t) + \Phi^+(t, t_0) e^-(t_0) - \Phi^-(t, t_0) e^+(t_0),$$

Suposición 2. Se asume que se conocen las cotas superior e inferior de las condiciones iniciales del sistema $(x^+(t_0), x^-(t_0))$, satisfaciendo la siguiente desigualdad

$$x^+(t_0) \succeq x(t_0) \succeq x^-(t_0), \quad (19)$$

La siguiente proposición establece las condiciones de acotamiento superior e inferior, del predictor intervalar

para las soluciones de Γ_E en (13) y del observador intervalo para Γ_S en (10).

Proposición 1. (Meslem et al. (2020)). El modelo lineal $(\Gamma_{O_2}, \Gamma_{O_3})$ en (17)-(18) proporciona un acotamiento del error de estimación $e(t)$, es decir, existen cotas superiores e inferiores $(e^-(t_0), e^+(t_0))$ tal que

$$e^+(t_0) \succeq e(t_0) \succeq e^-(t_0), \quad (20)$$

son satisfechas. Entonces, la soluciones de $(\Gamma_{O_2}, \Gamma_{O_3})$ satisfacen, para todo $e(t)$, las siguientes desigualdades

$$e^+(t) \succeq e(t) \succeq e^-(t). \quad (21)$$

Si la matriz A_L es Hurwitz, entonces

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (e^+(t) - e^-(t)) \preceq c, \quad (22)$$

donde c es un vector positivo.

Proposición 2. Considere que la suposición 1 es satisfecha. Además, se satisface el acotamiento de la señal de entradas desconocidas $u(t)$ como en (11). Si la matriz A_L es Hurwitz, entonces el observador Γ_{O_1} en (12) y el predictor intervalar $(\Gamma_{O_2}, \Gamma_{O_3})$ en (17)-(18) forman un observador intervalo para Γ_S .

Nota 2. El método de diseño del observador intervalo $(\Gamma_{O_1}, \Gamma_{O_2}, \Gamma_{O_3})$ no dependen de la propiedad sistémica de Cooperatividad, dada por la matriz A_L Metzler, en comparación con la mayoría de métodos que sí lo requieren. Tampoco se requiere una transformación de coordenadas para establecer el observador intervalo.

A partir del diseño del observador intervalo, es factible detectar daño en el sistema lineal, si persiste una variación paramétrica, $w(t) \neq 0$. Esto conlleva a una comparación entre las cotas de las mediciones y la señal de salida

$$\begin{aligned} y_i(t) &\in [y_i^-(t), y_i^+(t)], & \text{si } w(t) = 0, \\ y_i(t) &\notin [y_i^-(t), y_i^+(t)], & \text{si } w(t) \neq 0, \end{aligned} \quad (23)$$

donde $y_i^+(t) = Cx_i^+(t)$ y $y_i^-(t) = Cx_i^-(t)$ son las cotas superior e inferior de $y_i(t)$ con $i = 1, \dots, p$. Así que, si persiste la variación en $w(t) \neq 0$, entonces la señal de salida correspondiente no permanecerá en el intervalo dado por la cota superior e inferior, y por consecuencia se detecta daño entrepisos correspondientes. En caso contrario $w(t) = 0$, no existe no hay presencia de daño.

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Los experimentos para evaluar el desempeño del algoritmo de estimación propuesto se llevaron a cabo utilizando los datos de un prototipo de edificio de cinco niveles, cuyos parámetros se presentan en la Tabla 1. La simulación se realizó en el software de Matlab 2019. Los experimentos consideraron un tiempo de muestreo de 0.001 s.

La excitación sísmica utilizada en las simulaciones es el sismo de 1985 en la componente Norte-Sur registrado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). La señal de excitación se escala para que coincida con el prototipo experimental, como se ilustra en la Fig. 1.

Table 1. Parametros estructurales.

	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4	Piso 5
\hat{m}_i [Kg]	10.78	9.17	9.14	9.12	9.08
\hat{c}_i [Ns/m]	700.14	278.18	546.84	372.54	375.97
\hat{k}_i [N/m]	19011	12108	11966	11850	12406

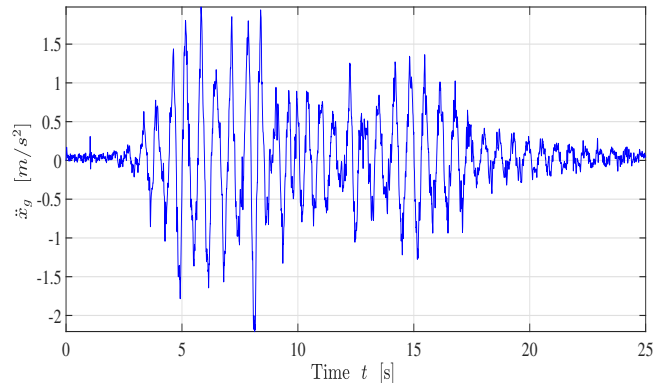


Fig. 1. Sismo de 1985, componente Norte-Sur

4.1 Implementación de observador intervalo para edificio a cortante

Para implementar la metodología del observador intervalo propuesto, se considera que el modelo del edificio a cortante en (9) con cinco pisos es llevado a la forma del sistema en el espacio de estado Γ_S en (10), considerando las mediciones en los desplazamientos de los pisos, y estimando los variables de velocidades.

Suponiendo que el edificio se encuentra en óptimas condiciones en una situación nominal $w(t) = 0$, donde el edificio está libre de daño, la ganancia del observador intervalo está dada por

$$L = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.18 & -0.10 & -0.19 & -0.36 \\ 0.30 & 0.30 & 0.08 & -0.09 & -0.1366 \\ 0.03 & 0.31 & 0.71 & 0.82 & 0.85 \\ -0.02 & -0.03 & 0.41 & 0.99 & 0.51 \\ -0.19 & -0.22 & -0.12 & -0.16 & -0.07 \\ -10.54 & -8.74 & 1.31 & 4.36 & 10.32 \\ -14.83 & -22.40 & -17.81 & -8.67 & -10.95 \\ -7.64 & -23.23 & -35.89 & -35.54 & -39.75 \\ -5.15 & -9.21 & -24.62 & -45.36 & -29.96 \\ 2.19 & -0.81 & -1.41 & 2.85 & -8.65 \end{bmatrix},$$

garantizando que las estimaciones superior e inferior contienen al vector estado, descrito por los desplazamientos y velocidades de los pisos. En otras palabras, las estimaciones preservan el ordenamiento con respecto a la trayectoria real del estado.

En la Fig. 2, se presenta el comportamiento típico de los observadores intervalo para los desplazamientos del segundo y quinto piso cuando no existe daño estructural. Es fácil ver que las estimaciones del observador intervalo propuesto acotan a tales desplazamientos a lo largo del tiempo.

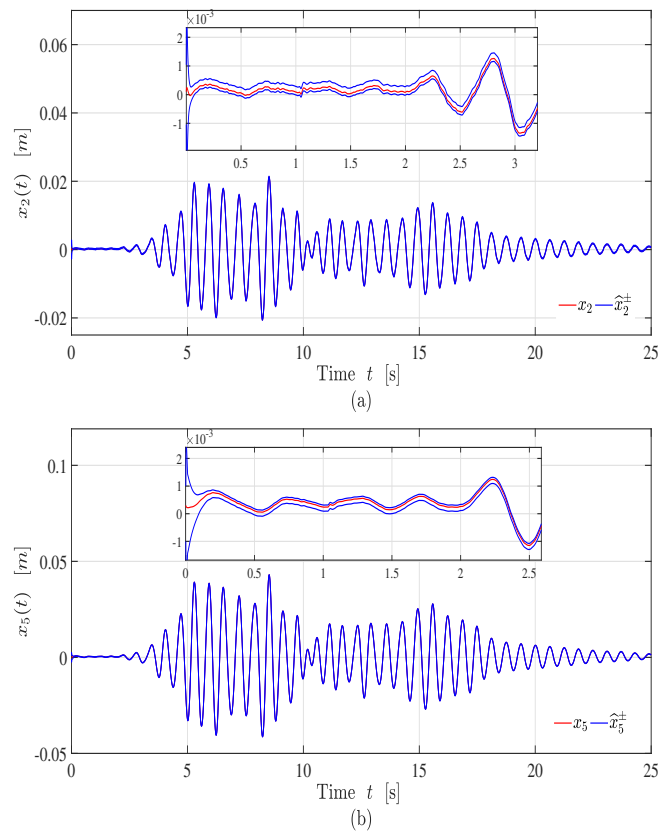


Fig. 2. Comportamiento de los desplazamientos de los pisos (línea roja) y sus estimaciones superior e inferior del observador intervalo (líneas azules). (a) Segundo piso. (b) Quinto Piso.

Comportamientos similares son observados para el resto de los pisos. Debido a la falta de espacio de este trabajo, solo se presentan los comportamientos de $x_2(t)$ y $x_5(t)$.

A continuación se presentan el esquema de observadores intervalo para la detección de daño estructural.

4.2 Detección de daño en el pisos 1, 3 y 4

Los escenarios considerados consisten en inducir daño el primer, tercer y cuarto piso. Para tales casos, se supone que algunas de columnas sufren daño, lo que produce una pérdida de rigidez del 5%, cambiando de 11966 N/m a 11368 N/m, de 19011 N/m a 18060 N/m, y de 11850 N/m a 11258 N/m, respectivamente. Aunque la masa y el amortiguamiento también varían, su contribución es despreciable con respecto al cambio en la rigidez. Para detectar daño, se utilizó el esquema del observador intervalar descrito con anterioridad en la sección 3, tomando en cuenta el cambio en la rigidez.

En la Fig. 3, se ilustra el rendimiento del algoritmo, detectando la presencia de daño estructural cuando las señales de desplazamientos x_i^* , con $i = 1, 3, 4$, están fuera del intervalo generado por la cota superior e inferior del observador intervalo, entre los instantes de tiempo de 10

s y 20 s, como consecuencia de la pérdida de rigidez mencionada arriba. En cualquier otro tiempo, los desplazamientos permanecen acotados por las estimaciones del observador intervalo.

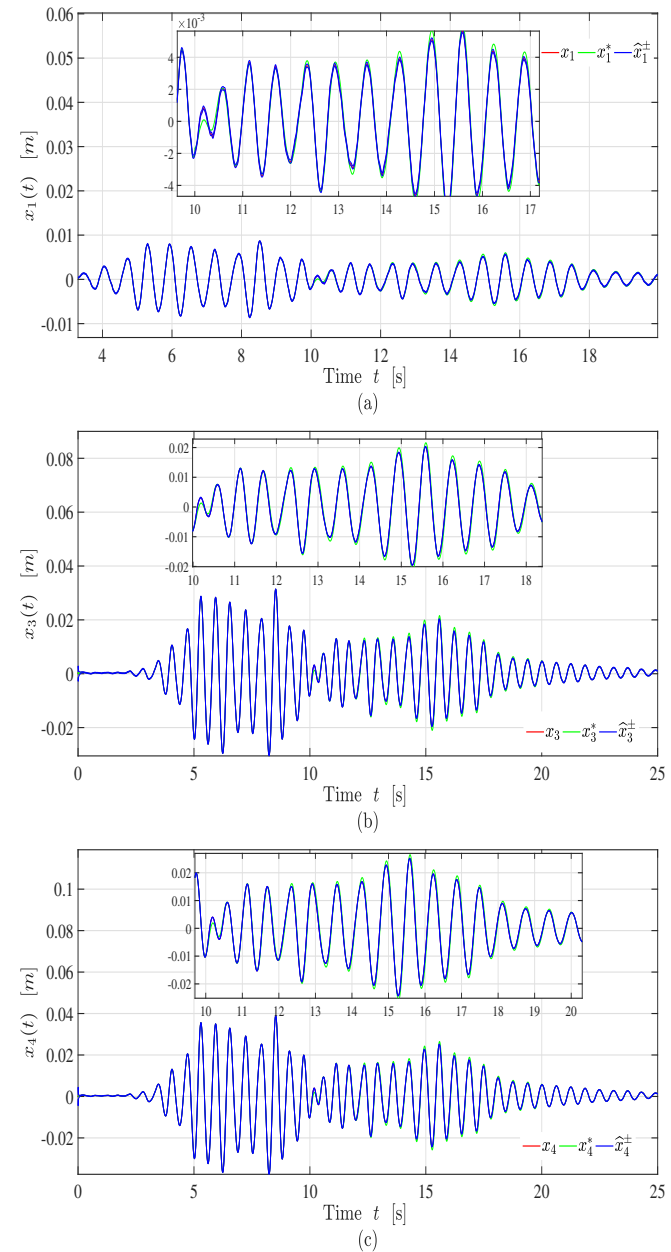


Fig. 3. Comportamiento de los desplazamientos nominal de los pisos (línea roja), desplazamientos con variación paramétrica (línea verde), y sus estimaciones superior e inferior del observador intervalo (líneas azules). (a) Primer piso. (b) Tercer piso. (c) Cuarto piso.

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un sistema de detección de daño en edificios basado en un observador intervalar. En este

artículo, se ha propuesto un enfoque alternativo para identificar daño estructural en edificios que consiste en acotar la respuesta estructural, bajo los límites superior e inferior del observador intervalo. En comparación con otros métodos, el tipo de algoritmo es sensible a incertidumbres paramétricas. Los resultados de simulación han confirmado que cuando un edificio presenta daño estructural, su capacidad de respuesta estructural se modifica. Este fenómeno es un claro indicador de la presencia de daño, que está directamente relacionado con la pérdida de rigidez. Además, los resultados de simulación confirman que el método propuesto es prometedor para aplicaciones prácticas.

AGRADECIMIENTOS

Jesús Morales-Valdez desea expresar su agradecimiento a Cátedras-CONACyT. Esta investigación fue patrocinada por el proyecto SEP-Cinvestav 62. Jesús David Avilés agradece el apoyo brindado a FCIAS-UABC.

REFERENCIAS

- Avilés, J.D., Dávila, J., and Moreno, J.A. (2016). Fault detection using adaptive thresholds for nonlinear systems: A preserving order observer approach. *IFAC-PapersOnLine*, 49(18), 885–890.
- Avilés, J.D. and Moreno, J.A. (2018). Interval observer design for nonlinear systems: Stability radii approach. *IEEE Access*, 6(1), 52801–52813. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2869840.
- Avilés, J.D. and Moreno, J.A. (2020). Dissipative interval observer design for discrete-time nonlinear systems. *Asian Journal of Control*, 22(4), 1422–1436.
- Carden, E.P. and Fanning, P. (2004). Vibration based condition monitoring: A review. *Structural Health Monitoring*, 3, 355–377.
- Chatzi, E.N., Smyth, A.W., and Masri, S.F. (2010). Experimental application of on-line parametric identification for nonlinear hysteretic systems with model uncertainty. *Structural Safety*, 32, 326–337.
- 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, 237–257.
- Das, S., Saha, P., and Patro, S. (2016). Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 477–507.
- Doebling, S.W., Farrar, C., and Prime, M.B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, 30(2), 1–34.
- Efimov, D., Perruquetti, W., Raïssi, T., and Zolghadri, A. (2013). Interval observers for time-varying discrete-time systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(12), 3218–3224.
- Farrar, C.R., Worden, K., Todd, M.D., Park, G., Nichols, J., Adams, D.E., Bement, M.T., and Farinholt, K. (2007). Nonlinear system identification for damage detection. *Report LA-14353, Los Alamos National Laboratory (LANL), Los Alamos, NM.*, 1–161.
- Gouze, J.L., Rapaport, A., and Hadj-Sadok, M.Z. (2000). Interval observers for uncertain biological systems. *Ecol Modelling*, 133(1-2), 45–56.
- Herak, M. and Herak, D. (2010). Continuous monitoring of dynamic parameters of the dgfsm building (zagreb, croatia). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(3), 657–669.
- Huang, Q., Xu, Y., Li, J., Su, Z., and Liu, H. (2012). Structural damage detection of controlled building structures using frequency response function. *Journal of Sound and Vibration*, 331(15), 3476–3492.
- Hwang, H.Y. and Kim, C. (2004). Damage detection in structures using a few frequency response measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 270(1-2), 1–14.
- Ikhouane, F., Mañosa, V., and Rodellar, J. (2005). Adaptive control of a hysteretic structural system. *Automatica*, 41, 225–231.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., and Stubbs, N. (2003). Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method. *Engineering Structures*, 25(1), 57–67.
- Kong, X., Cai, C.S., and Hu, J. (2017). The state-of-the-art on framework of vibration-based structural damage identification for decision making. *Applied Sciences*, 7(5), 497–510.
- Meslem, N., Martinez, J., Ramdani, N., and Besançon, G. (2020). An interval observer for uncertain continuous-time linear systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 30(5), 1886–1902.
- Nayeri, R.D., Masri, S.F., Ghanem, R.G., and Nigbor, R.L. (2008). A novel approach for the structural identification and monitoring of a full-scale 17-story building based on ambient vibration measurement. *Smart Materials and Structures*, 17(2), 1–19.
- Rotondo, D., Fernandez-Canti, R.M., Tornil-Sin, S., Blesa, J., and Puig, V. (2016). Robust fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cells using a takagi-sugeno interval observer approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2875–2886.
- Smyth, A., Masri, S., Chassiakos, A., and Caughey, T. (1999). On-line parametric identification of mdof nonlinear hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 125, 133–142.
- Zhang, Z.H. and Yang, G.H. (2017). Event-triggered fault detection for a class of discrete-time linear systems using interval observers. *ISA Transactions*, 68, 160–169.