

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO ESTRUCTURAL EN TIEMPO REAL PARA UN EDIFICIO EN ESCALA REAL

LISANDRO JIMÉNEZ

Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad del Valle, COLOMBIA.
lisandro11991@gmail.com

ALEJANDRO CRUZ, M.Sc. en Ingeniería, Universidad del Valle, COLOMBIA.
Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali,
Colombia. alejandro.cruz@correounivalle.edu.co

JOHANNIO MARULANDA, Ph.D en Ingeniería Civil. Profesor Asistente, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia. mcjohann@univalle.edu.co

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA SÍSMICA, EÓLICA, GEOTÉCNICA Y ESTRUCTURAL (G-7)

RESUMEN:

Los sistemas de monitoreo en tiempo real del comportamiento dinámico de estructuras civiles han ganado especial atención en los últimos años por parte de investigadores de todo el mundo, debido a los adelantos en tecnología de instrumentación y procesamiento digital de señales. Estos sistemas tienen el potencial de reducir el riesgo de la estructura ante amenazas sísmicas y antrópicas, entre otras, además de incrementar la confianza de sus usuarios y ofrecer datos reales para la investigación y el desarrollo tecnológico. El edificio 350 de la Universidad del Valle en Cali, Colombia, tiene instalado un acelerógrafo de movimiento fuerte de 6 canales que registran continuamente la vibración de la estructura y su base. Este documento presenta el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo del comportamiento dinámico en tiempo real del edificio 350. El sistema monitorea las frecuencias naturales, las razones de amortiguamiento y las formas modales del edificio con base en los datos de los 6 canales. Los resultados del monitoreo han permitido realizar varios análisis: i) evaluación del efecto producido por la ocupación del edificio; ii) caracterización de la influencia de las condiciones ambientales; iii) identificación del comportamiento durante y después de dos sismos de mediana intensidad.

ABSTRACT:

Real time monitoring systems of the dynamic behavior of civil structures have gained special attention in recent years among researchers around the world due to advances in instrumentation technology and digital signal processing. These systems have the potential to reduce the risk of the structure to seismic and man-made threats, among others, and to increase user confidence and provide real data for research and technological development. The Department of Civil Engineering building of the Universidad del Valle in Cali, Colombia, is instrumented with a strong motion accelerometer system of 6 channels that continuously records accelerations at the base and top of the structure. This paper presents the development and implementation of the real-time dynamic behavior monitoring system. The system monitors the natural frequencies and damping ratios of the building mode shapes based on data from the 6 channels. Monitoring results have led to several analyzes: i) evaluating the effect of the occupation of the building, ii) characterization of the influence of environmental conditions, iii) identification of the behavior during and after two earthquakes of medium intensity.

1. INTRODUCCIÓN:

Actualmente en el campo de la ingeniería civil, se ha buscado formas innovadoras de llevar un control sobre el estado de las estructuras, de aquí nace la importancia del Monitoreo de Salud Estructural (MSE).

Éstos sistemas pueden lograr, mediante el procesamiento de señales obtenidas a través de equipos de medición, determinar ciertos parámetros que permiten tener un control del comportamiento de la estructura; la masa y la rigidez son parámetros variables que influyen en la frecuencia fundamental, varían ya que es común que la masa que contenga un edificio en el día sea mayor que la que hay en la noche (refiriéndose a la carga viva), también que las aceleraciones que se presentan en el mismo periodo sean mayores, el segundo caso es el cambio de la rigidez de la estructura, éste es uno de los casos con mayor interés debido a que ésta puede cambiar debido a la temperatura o debido a un cambio en su configuración estructural ya sea por el deterioro de la misma, o cuando ocurre un evento que somete a la estructura a una solicitud dinámica, es aquí cuando el MSE cobra importancia, ya que mediante los métodos existentes, se busca determinar cuándo una estructura cambia de forma considerable su estado.

En el edificio 350 de la universidad del valle se está implementando un sistema de monitoreo, el cual ha permitido determinar las variaciones de los parámetros ya mencionados mediante el método “*Stochastic Subspace Identification*” (SSI), y además contiene un sistema de alerta el cual envía la información referida al evento que la haya activado.

2. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN:

El sistema de monitoreo estructural del edificio 350 de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, ubicado en el Campus Universitario Meléndez de la ciudad de Cali, Colombia. Éste edificio es una estructura reticular celudada de dos pisos con una losa adicional de cubierta y distancias entre ejes de columnas de 7.2m. Las tres losas tienen una altura de 40cm y están armadas con viguetas de 10cm de base distribuidas en dos direcciones. Todas las columnas tienen una sección cuadrada de 40cm de lado. La primera losa está a una altura de 3.2m, la segunda a 6.4m y la tercera a 8m (Figura 1).

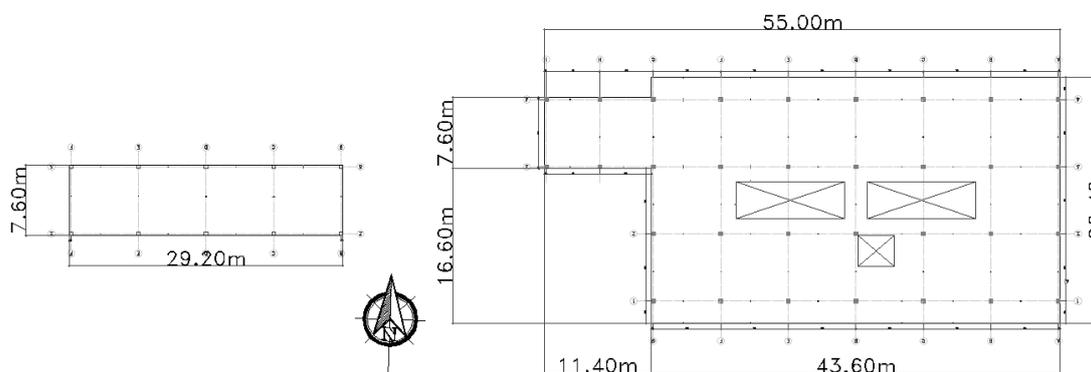


Figura 1. Planta N+8.0m y Planta tipo N+3.2m y N+6.4m del Edificio 350.

El sistema de monitoreo estructural está compuesto por una estación triaxial REFTEK 130-SMHR ubicada en la base del edificio y 3 acelerómetros sísmicos REFTEK 131B-01/1 en la losa superior de la edificación(N+6.4m), como se muestra

en la Figura 2. Todos los acelerómetros tienen una capacidad para medir $\pm 4g$ con un nivel de ruido de $2 \mu g^2/Hz$, con una frecuencia de adquisición configurable entre 1 y 1000 Hz; además cuenta con una unidad GPS para la sincronización en tiempo. El sistema está configurado para adquirir datos continuamente a 100Hz.

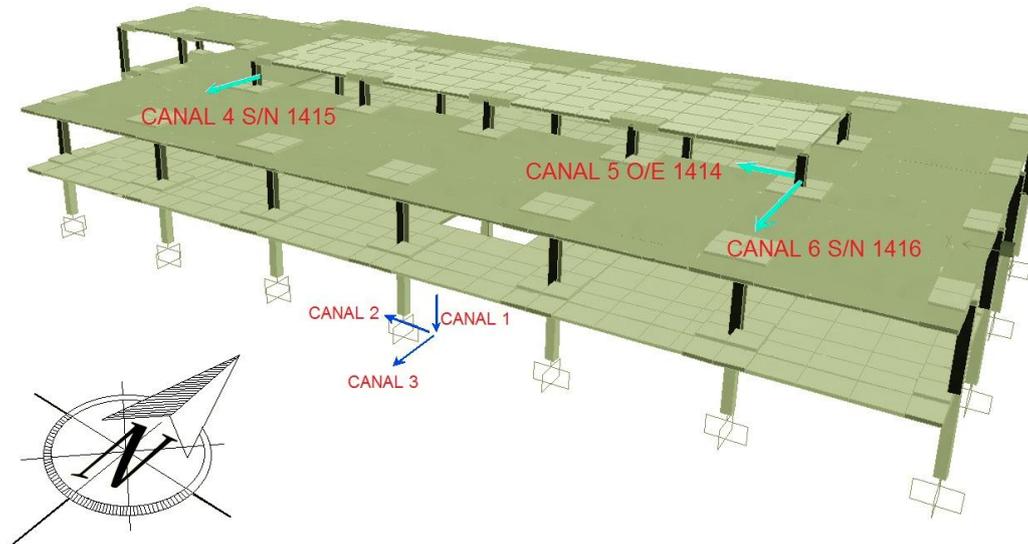


Figura 2. Esquema de instrumentación del edificio 350

3. PRE-PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL:

El software se ha usado el lenguaje de programación de MATLAB, el cual es la herramienta principal de cálculo en la que se ha estructurado todo el sistema de monitoreo; los registros de 10 minutos son recibidos en un servidor en su formato original (PASSCAL), éstos son convertidos mediante un archivo ejecutable llamado RTCNVRT proporcionado por REFTEK a un formato que MATLAB pueda leer (.DAT), una vez el software identifique que el registro llega al servidor, lo toma y transforma; una vez hecho esto el software une los registros en una sola matriz de aceleraciones, esto lo puede hacer ya que los registros tienen la misma longitud, y originalmente vienen separados en 6 archivos (cada uno por canal), luego, se procede a realizarle un tratamiento a la señal, ésta viene en unas unidades de conteo, y mediante unas constantes propias del equipo de instrumentación se hace la conversión a unas unidades mas conocidas, éstas son gravedades (g), con el propósito de disminuir el tamaño de los archivos se le realiza un remuestreo a la señal a 20 Hz, y se procede a realizar la identificación modal usando el método “*Stochastic Subspace Identification*” (SSI), cuando el algoritmo arroja los resultados, dentro de los cuales se encuentra las frecuencias, los amortiguamientos y las formas modales, el software los almacena en una base de datos, y lo hace identificando la hora y fecha de adquisición, una vez hecho se almacena la matriz de aceleraciones sin re muestreo, en una carpeta correspondiente a la hora y fecha de adquisición.

El software tiene establecido para cada canal un umbral de aceleraciones máximas, el cual se activa una vez es sobrepasado, éste umbral fue determinado en base a las aceleraciones promedio máximas del edificio y las aceleraciones experimentadas durante los sismos registrados por el sistema de monitoreo; llegado el caso de un evento sísmico, el umbral será sobrepasado, activando una alerta, la cual consiste en un mensaje por correo electrónico a los usuarios cuyo correo esté

almacenado en la base de datos, éste mensaje contiene los registros del evento sísmico y el análisis modal.

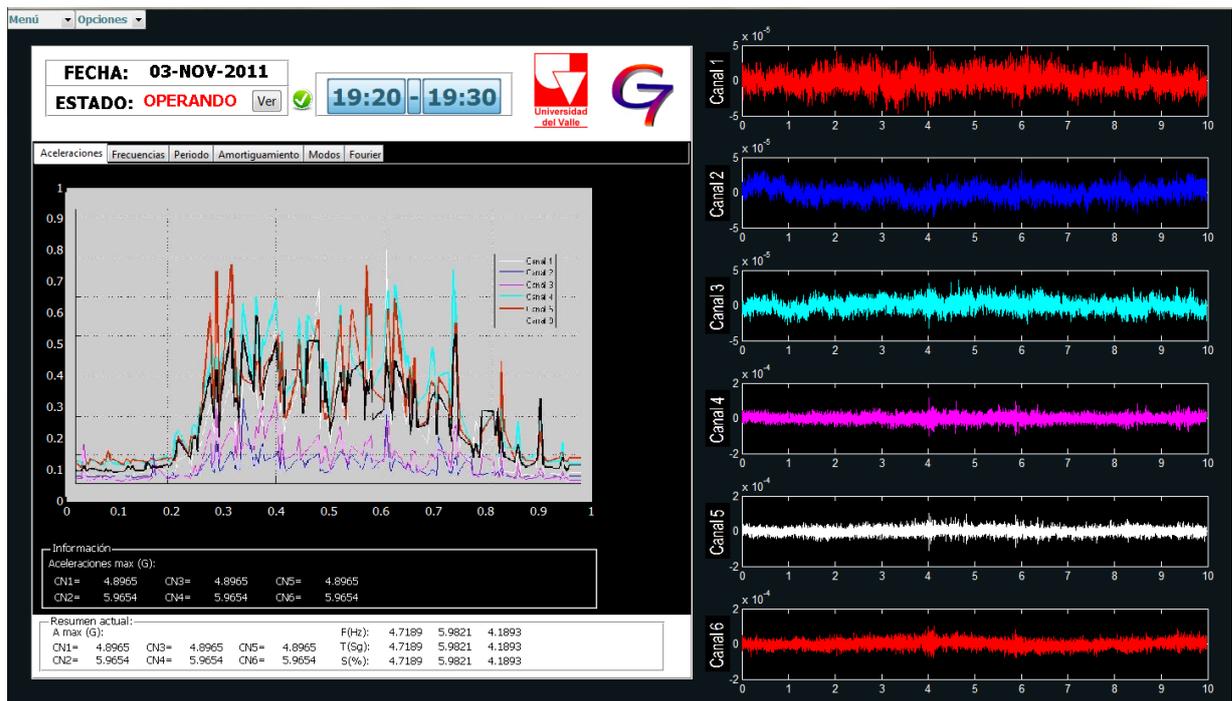


Figura 3. Interfaz del Sistema de Monitoreo

4. ALGORITMOS DE IDENTIFICACIÓN MODAL

Aunque se pretende implementar varias metodologías de identificación del comportamiento dinámico en el sistema de monitoreo del edificio 350, al momento se tiene implementado solamente el método de Identificación del Subespacio Estocástico (SSI), considerado actualmente la técnica más poderosa para identificación modal en el dominio del tiempo [1]. El uso del SSI se disparó y dispersó con la publicación del libro por van Overschee and De Moor (1996). Los algoritmos en Matlab distribuidos con el libro permitieron a los investigadores usar fácilmente el método y verificar sus capacidades. El SSI ha sido usado exitosamente en aplicaciones industriales [2] y monitoreo de infraestructura civil [3], entre otras aplicaciones.

Los algoritmos de identificación del sub-espacio se basan en tres suposiciones básicas: i) el sistema se comporta en su rango lineal, ii) el sistema es invariante en el tiempo, y iii) la excitación de entrada es una realización de un proceso estocástico con comportamiento de ruido blanco gaussiano y no correlacionada con la respuesta del sistema [4]. Los algoritmos calculan las propiedades dinámicas del sistema (i.e. frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento) a partir de una representación en el espacio de los estados. El trabajo de van Overschee and De Moor (1996) [5] presenta el marco teórico de referencia para estos algoritmos de identificación del sub-espacio. Si la excitación de entrada del sistema no puede ser medida y es estocástica, el algoritmo es llamado Identificación del Subespacio Estocástico (SSI). El método SSI ha probado ser una herramienta simple y confiable

para identificación modal ^[6].

Considérese la representación discreta del espacio de los estados de un sistema lineal e invariante en el tiempo:

$$\gamma(k+1) = A\gamma(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$\lambda(k) = C\gamma(k) + Du(k) \quad (2)$$

donde A , B , C and D son las matrices del sistema; λ es el vector de salida; u es el vector de entrada; γ es el vector de estado; y k representa el k -ésimo paso. El SSI identifica las propiedades dinámicas de las matrices del sistema, que se calculan a partir de la matriz bloque de Hankel:

$$\begin{bmatrix} A_{0:\alpha-1} \\ \dots \\ A_{i:2\alpha-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda(0) & \lambda(1) & \dots & \lambda(\beta-1) \\ \lambda(1) & \lambda(2) & \dots & \lambda(\beta) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(\alpha-1) & \lambda(\alpha) & \dots & \lambda(\alpha+\beta-2) \\ \lambda(\alpha) & \lambda(\alpha+1) & \dots & \lambda(\alpha+\beta-1) \\ \lambda(\alpha+1) & \lambda(\alpha+2) & \dots & \lambda(\alpha+\beta) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda(2\alpha-1) & \lambda(2\alpha) & \dots & \lambda(2\alpha+\beta-2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde 2α es el número de filas de la matriz y β es el número de columnas. La proyección ortogonal (P) del espacio fila del componente "futuro" de la matriz ($A_{i:2\alpha-1}$) en el espacio fila del componente "pasado" ($A_{0:\alpha-1}$) se calcula como:

$$P = A_{\alpha:2\alpha-1} A_{0:\alpha-1}^T (A_{0:\alpha-1} A_{0:\alpha-1}^T)^{-1} A_{0:\alpha-1} \quad (4)$$

Esta proyección es descompuesta usando una descomposición en valores singulares de la forma:

$$P = ODH^T \quad (5)$$

donde O y H son matrices cuadradas unitarias que representan las direcciones del vector de bases de salidas y entradas para P , respectivamente, y D es una matriz diagonal positiva. Un conjunto de respuestas de vibración libre estimadas para cada salida registrada se calcula dentro de una matriz de observabilidad predicha \hat{F} como:

$$\hat{F} = OD^{1/2} \quad (6)$$

o en términos de las matrices del sistema estimadas:

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} \hat{F}_0 \\ \hat{F}_1 \\ \vdots \\ \hat{F}_{\alpha-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{C} \\ \hat{C}\hat{A} \\ \vdots \\ \hat{C}\hat{A}^{\alpha-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde \hat{F}_i es la i -ésima submatriz bloque de \hat{F} . Por tanto, las matrices del sistema

estimadas \hat{A} y \hat{C} se calculan como:

$$\hat{A} = \hat{F}_{1;\alpha-1} \hat{F}_{0;\alpha-2}^T (\hat{F}_{0;\alpha-2} \hat{F}_{0;\alpha-2}^T)^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{C} = \hat{F}_0 \quad (9)$$

Los valores propios de \hat{A} son los polos del sistema y contienen información sobre las frecuencias naturales y las razones de amortiguamiento del sistema. Las formas modales identificadas (Φ_{id}) se calculan con la ecuación:

$$\Phi_{id} = \hat{C} \Phi \quad (10)$$

donde Φ son los vectores propios de \hat{A} . Las coordenadas de los modos de vibración son calculadas en las posiciones de los sensores.

5. EVENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS:

El sistema de monitoreo detectó dos eventos sísmicos los días 12 y 28 de febrero de 2012, con epicentro cerca de la ciudad de Santiago de Cali - Colombia, con intensidades medias sentidas por la población que excitaron la estructura del Edificio 350. A continuación (Figura 4 y Tabla 1) se presentan los datos de los eventos sísmicos reportados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (Colombia 2012) [7].

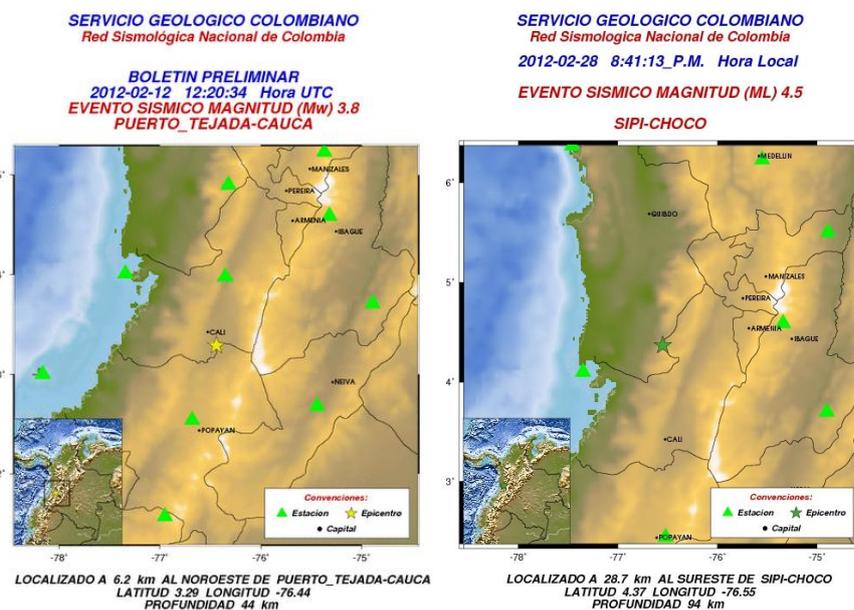


Figura 4. Ubicación Geo-espacial de los eventos sísmicos. (Colombia 2012)

Del reporte de la Red Sismológica Nacional de Colombia, se obtuvo la siguiente información:

<u>Sismo Sipi-Chocó:</u>
Fecha: 01-Marzo-2012
Hora (UTC): 01:41:12
Magnitud: 4.5

Longitud (Grados): -76.548
Latitud (Grados): 4.373
Departamento: Chocó
Municipio: Sipi

Profundidad (Km): 93.5
Distancia de Cali: 94
<u>Sismo Puerto Tejada - Cauca</u>
Fecha: 12-Febrero-2012
Hora (UTC): 12:20:35
Magnitud: 3.6

Longitud (Grados): -76.417
Latitud (Grados): 3.278
Departamento: Cauca
Municipio: Puerto Tejada
Profundidad (Km): 37.2
Distancia de Cali: 17.73

Tabla 1. Información referente a los sismos detectados [7]

El sistema de monitoreo estructural registró la respuesta de la estructura ante estos dos eventos sísmicos, observándose un comportamiento similar entre ambos eventos. Se observa que las aceleraciones pico son de orden similar. A continuación (Figura 5 y 6), se muestran los registros de aceleraciones de la respuesta de la estructura para el canal 4 ante los 2 eventos sísmicos. Para la identificación modal se usaron los registros de los acelerómetros ubicados en el nivel superior del Edificio 350: Canal 5, Este-Oeste, y canales 4 y 6, Norte-Sur; los registros usados tienen una duración de 10 min a una frecuencia de adquisición de 100 Hz [7].

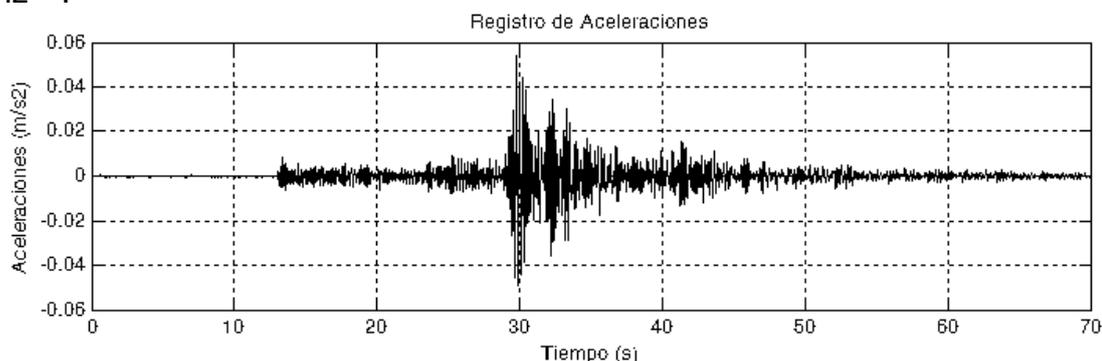


Figura 5 Respuesta del edificio 350, Canal 4, **Sismo SIPI** [7]

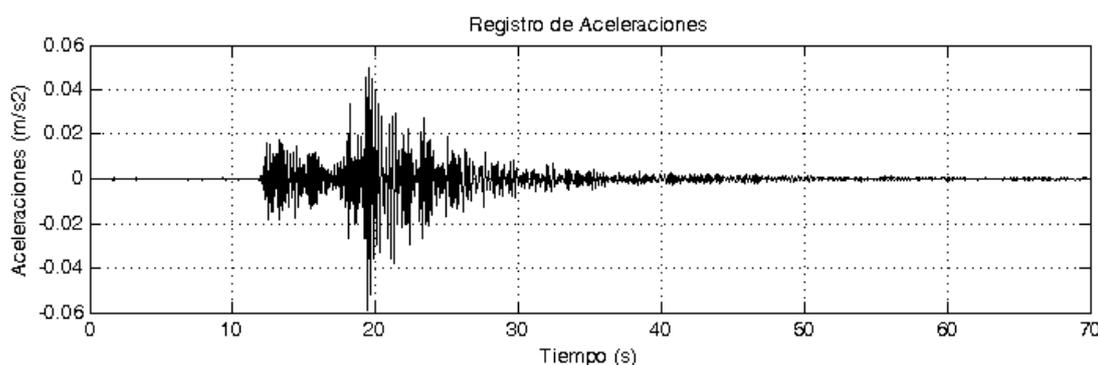


Figura 6. Respuesta del edificio 350, Canal 4, **Sismo PUERTO TEJADA** [7]

6. MONITOREO DE LAS FRECUENCIAS NATURALES

6.1 Influencia de la ocupación:

La variación de la masa y del paso de los usuarios del edificio a lo largo del día, afectan la dinámica de la estructura; esto se puede ver reflejado en el siguiente gráfico de aceleración pico registradas en un periodo de 10 minutos versus el

tiempo, en un día de uso común.

Como se puede observar en horas de la madrugada (0 – 6 am), las aceleraciones en el edificio son constantes y casi nulas, puesto que el edificio se encuentra en desuso, luego cuando las jornadas académicas empiezan se puede ver las aceleraciones en el edificio (aunque pequeñas) aumentan en comparación a su anterior estado, ya para finalizar, cuando cae la noche, se aprecia como el uso del edificio vuelve a caer y a quedar en un estado de quietud.

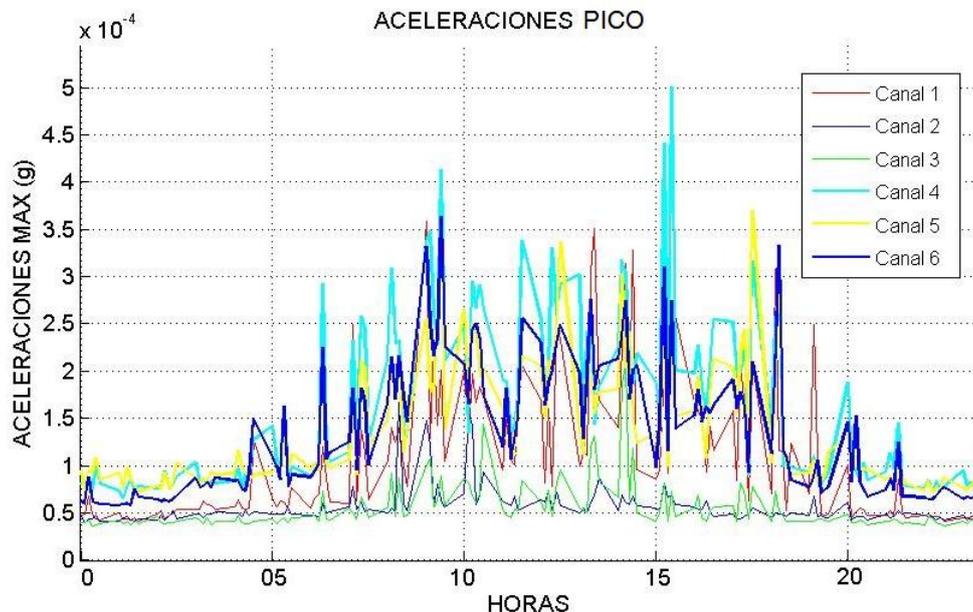


Figura 7. Aceleraciones pico en un día común

6.2 Influencia de los efectos ambientales:

[9], [10], [11], [12], [13], [14], [15] y [16] han mostrado que los efectos debido a la temperatura parecen ser más representativos en la variación de los parámetros modales de la estructura. La variación de las propiedades de los materiales por el cambio del módulo de elasticidad, pero también pueden afectar las condiciones de frontera (Peeters and Roeck 2001) ^[8]. Esto puede llevar a pensar que las frecuencias que identifique el software cuando el edificio está expuesto a mayor temperatura, sean menores a las que identifique en el caso contrario, entonces se esperaría que las frecuencias del edificio decaigan cuando la estructura está expuesta a la temperatura del medio día (Debido a que el sol alcanza el cenit) .

6.3 Variación de la frecuencia:

Todos los factores mencionados con anterioridad (Solicitud dinámica debido a un sismo, variación de la masa y rigidez), influyen en el comportamiento de la estructura; en las siguientes gráficas se presenta como las frecuencias varían a través del tiempo, como ya se había mencionado antes, fueron determinadas mediante el método SSI.

Debido a que el edificio en estudio es una estructura muy rígida, ello ha impedido hacer una fácil y rápida identificación de las frecuencias características, éstas han sido obtenidas mediante estudios alternativos, dentro de los que se encuentra un

ensayo de vibración forzada al edificio con actuador dinámico; con el cual se han estimados unas frecuencias características de 4.111 Hz 4.741 Hz y 4.802 Hz, cabe resaltar que de éstas tiene una mayor confiabilidad en la primera.

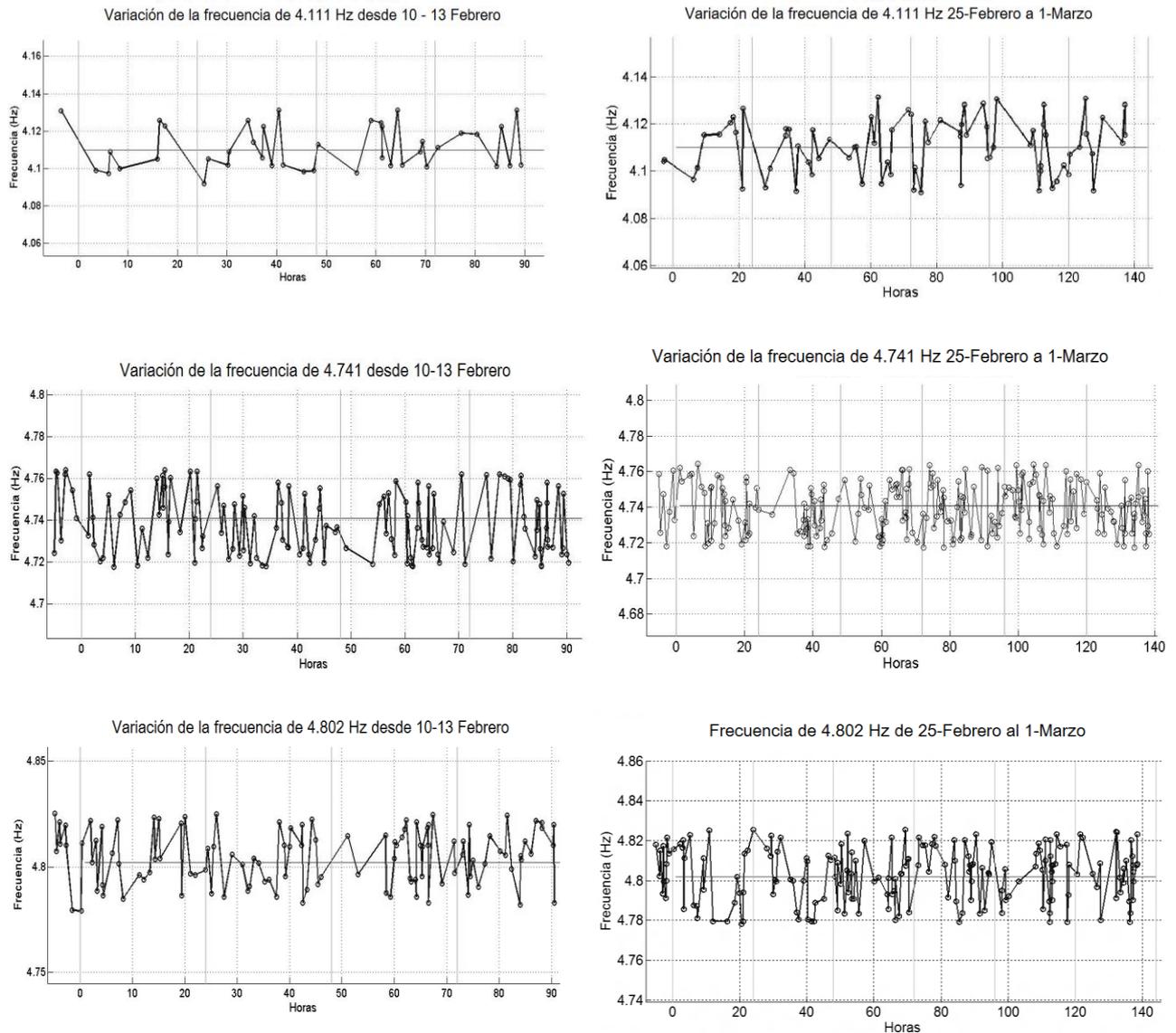


Figura 8. Variación de las frecuencias en función del tiempo.

Las anteriores gráficas representan la variación de las frecuencias en función del tiempo; teóricamente se espera que el efecto que produce la ocupación en el edificio, sea que al aumentar la masa, las frecuencias características del edificio disminuyan de magnitud, del mismo modo, cuando la temperatura aumenta, los módulos de elasticidad de los materiales de la estructura se ven afectados, flexibilizándola y obligando a disminuir la frecuencia de ésta.

En las anteriores gráficas se muestra que no hay una tendencia, y existe mucha dispersión en los datos, ello se podría deber al efecto que produce el ruido en la señal, y posiblemente a una falta calibración del algoritmo de identificación modal, para demostrar cómo influye el ruido en la identificación clara de las frecuencias fundamentales de la estructura, se usará un modelo de elementos finitos realizado en SAP2000 del edificio 350 de la Universidad del Valle ^[17] (figura 2), aunque el

modelo está en proceso de calibración, ha tenido un buen comportamiento.

Lo que se hará a continuación es evaluar los efectos por ruido, para ello se usó un registro de 10 minutos de longitud, equivalente a 60000 datos de aceleraciones del canal 2 cuya orientación es Oeste - Este ubicado en la base del edificio (Figura 2).

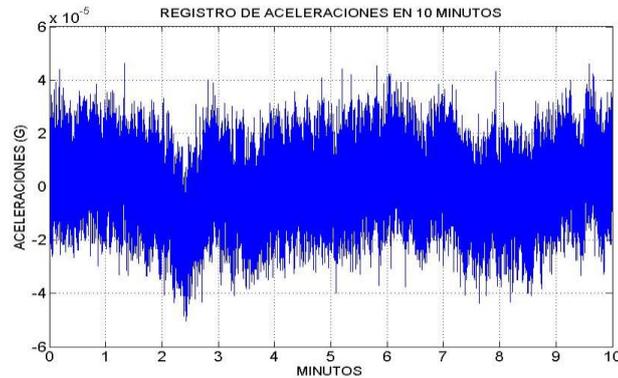


Figura 9. Señal Canal 2 (Experimental)

Este es un registro de aceleraciones común, el cual se le ingresará al modelo en elementos finitos realizado en SAP2000, para determinar su respuesta en un canal ubicado en la parte superior del edificio correspondiente al canal 5 O/E 1414; el modelo arrojó la siguiente respuesta:

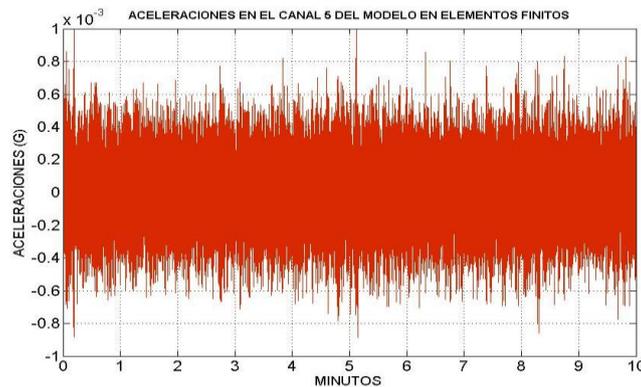


Figura 10. Señal Canal 5 (Analítica)

Las aceleraciones correspondientes al canal registradas de manera experimental por el acelerómetro correspondiente al canal 5 se muestran en el siguiente registro:

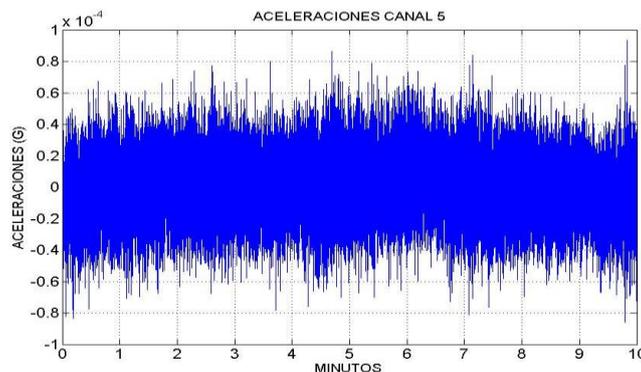


Figura 11. Señal Canal 5 (Experimental)

Para finalizar, se realiza el espectro de amplitud para cada una de las correspondientes señales del canal 5, y los resultados fueron los siguientes:

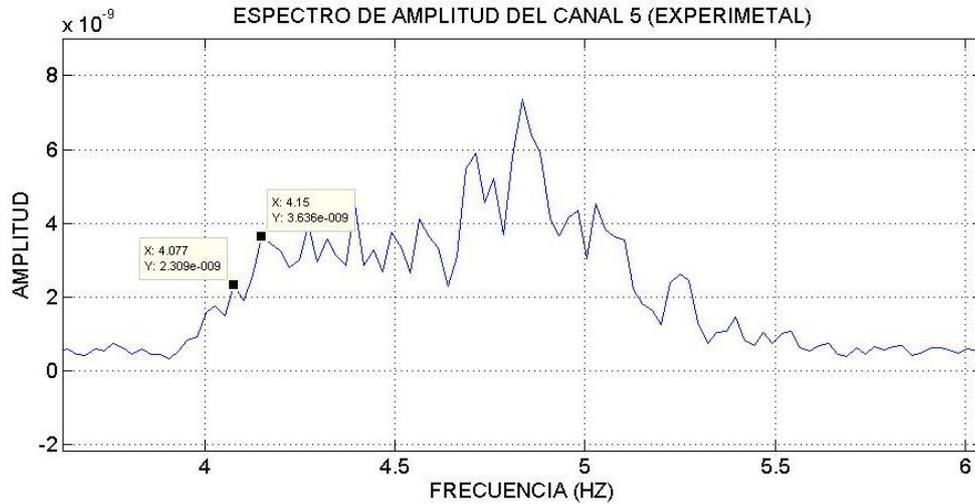


Figura 12. Espectro de amplitud (Experimental)

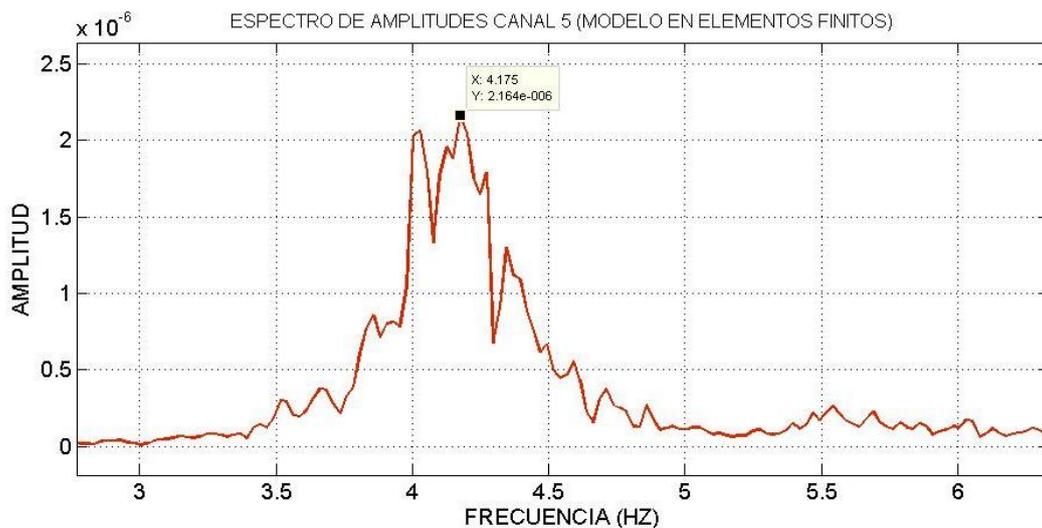


Figura 13. Espectro de amplitud (Analítico)

Como se aprecia en las Figuras 12 y 13, se puede ver la influencia del ruido sobre la señal, lo que hace éste fenómeno es distorsionar la señal y dificultar la correcta identificación de la frecuencia del edificio, se puede observar que las frecuencias cercanas a 4.111 Hz son las correspondientes a 4.077 Hz y 4.15 Hz, son rangos muy grandes y por ello la frecuencia no es identificada en éste intervalo de tiempo correspondiente a 10 minutos, éste fenómeno ocurre de manera frecuente, lo que ocasiona de manera substancial la dispersión en los datos, por otra parte, en la figura 13 se aprecia como el modelo de elementos finitos del edificio, logra responder de manera adecuada cuando se espera que la frecuencia fundamental del edificio (4.111 Hz) aparece con la mayor amplitud en el espectro una frecuencia correspondiente a 4.175 Hz; lo cual permite observar que el ruido tiene una gran

influencia sobre la caracterización de éste parámetro.

Conclusiones

En el presente documento expone el desarrollo e implementación del sistema de monitoreo del comportamiento dinámico en tiempo real del edificio 350. El sistema monitorea las frecuencias naturales, las razones de amortiguamiento y las formas modales del edificio con base en los datos de los 6 canales. Los resultados del monitoreo permitieron realizar varios análisis: i) evaluación del efecto producido por la ocupación del edificio; ii) caracterización de la influencia de las condiciones ambientales; iii) identificación del comportamiento durante y después de dos sismos de mediana intensidad.

El pre-procesamiento de las señales funciona de manera óptima y la forma como el software identifica, procesa y clasifica los datos para posteriores análisis; también el sistema de alerta funciona de manera adecuada ante eventualidades sísmicas. En el caso de vibraciones ambientales, la relación señal-ruido es muy baja, lo que ha impedido que se realice una adecuada identificación modal, provocando alta dispersión en la tendencia de los datos. Por esta razón, es necesario realizar la implementación de otros algoritmos de identificación modal en el tiempo, como el NEXT-ERA, o en el dominio de frecuencias, como el Peak Picking.

Colaboradores:

PETER THOMSON, Ph.D en Ingeniería Aero-espacial. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia. DANIEL GOMEZ PIZANO, M.Sc. en Ingeniería, Universidad del Valle, COLOMBIA, STEFFANY VALENCIA CHARÁ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad del Valle, COLOMBIA. FELIPE GUERRERO MOSQUERA, Ing. Estudiante de maestría en ingeniería, Universidad del Valle.

Referencias:

- [1] Brincker, Rune, and Palle Andersen. 2006. Understanding Stochastic Subspace Identification. In *24th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2006 (IMAC - XXIV)*. St Louis, Missouri.
- [2] Hermans, L., and H. Van Der Auweraer. 1999. MODAL TESTING AND ANALYSIS OF STRUCTURES UNDER OPERATIONAL CONDITIONS: INDUSTRIAL APPLICATIONS. *Mechanical Systems and Signal Processing* 13 (2):193-216.
- [3] Peeters, Bart, and Guido De Roeck. 2001. Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 123 (4):659-667.

- [4] Andersen, P. B., and R. Brincker. 1999. Estimation of modal parameters and their uncertainties. In *17th international modal analysis conference (IMAC-XVII)*. Kissimmee FL.
- [5] Van Overschee, Peter, and Bart L. De Moor. 1996. *Subspace identification for linear systems : theory, implementation, applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [6] Giraldo, Diego, Juan M. Caicedo, Wei Song, Brandon Mogan, and Shiley Dyke. 2006. Modal Identification Through Ambient Vibration: A Comparative Study. In *24th Conference and Exposition on Structural Dynamics 2006 (IMAC - XXIV)*. St Louis, Missouri.
- [7] Jean M. Franco; Juan M. Caiced; Johannio Marulanda C. (2012). “Técnica de identificación rápida de modos para monitoreo estructural de un edificio a escala real”.
- [8] Reza D Nayeri, SamiFMasri , Roger G Ghanem y Robert L Nigbor “A novel approach for the structural identification and monitoring of a full-scale 17-story building based on ambient vibration measurements”
- [9] Asghari A, Johnson E A and Nigbor R L 2006 Environmental effects on identified parameters on the nees sfsi test structure 4th World Conf. on Structural Control and Monitoring (University of California, San Diego, CA)
- [10] Clinton J, Bradford S C, Heaton T and Favela J 2006 The observed wander of the natural frequencies in a structure Bull. Seismol. Soc. Am. 96 237–57
- [11] Guid. Control Dyn. 35 163–9 Peeters B and Roeck G D 2001 One-year monitoring of the z24-bridge: environmental effects versus damage events Earthq. Eng. Struct. Dyn. 30 149–71
- [12] Farrar C R, Doebling S W, Cornwell P J and Straser E G 1997 Variability of modal parameters measured on the Alamosa canyon bridge Proc. 15th Int. Modal Analysis Conf., IMAC (Orlando, FL) pp 257–63
- [13] Sohn H, Dzwonczyk M, Straser E G, Kiremidjian A S, Law K H and Meng T 1999 An experimental study of temperature effect on modal parameters of the alamosa canyon bridge Earthq. Eng. Struct. Dyn. 28 879–97
- [14] Liu C and DeWolf J T 2007 Effect of temperature on modal variability of a curved concrete bridge under ambient loads ASCE J. Struct. Eng. 133 1742–51
- [15] Hua X G, Ni Y Q, Ko J M and Wong K Y 2007 Modeling of temperature frequency correlation using combined principal component analysis and support vector regression technique ASCE J. Comput. Civil Eng. 21 122–35
- [16] Cornwell P J, Farrar C R, Doebling S W and Sohn H 1999 Environmental variability of modal properties. Exp. Tech. 23 45–8

[17] Steffany Valencia Chará, Alejandro Cruz, Johannio Marulanda C. (2012).
“Desarrollo e implementación de un sistema de ajuste de modelos de elementos finitos en tiempo real para un edificio en escala real”