



Análisis modal operacional de un edificio utilizando programas computacionales comerciales

Operational modal analysis of a building using commercial computer programs

María Fernanda Padilla Benavides

Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
maria.padillabenavides@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0009-0000-9141-0774>

Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.

Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
yi.liukuan@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-6034-2430>

Luis Carlos Esquivel Salas, M.Sc.

Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
luiscarlos.esquivel@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-4208-6482>

Víctor Schmidt Díaz

Director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
victor.schmidt@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-2911-7232>

Fecha de recepción: 26 mayo del 2023 / **Fecha de aprobación:** 25 octubre 2023 <https://doi.org/10.15517/mym.v12i0.55255>

Índices y Bases de Datos:



Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558

Análisis modal operacional de un edificio utilizando programas computacionales comerciales

Operational modal analysis of a building using commercial computer programs

María Fernanda Padilla Benavides

Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
maria.padillabenavides@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0009-0000-9141-0774>

Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.

Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
yi.liukuan@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-6034-2430>

Luis Carlos Esquivel Salas, M.Sc.

Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
luiscarlos.esquivel@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-4208-6482>

Víctor Schmidt Díaz

Director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería
Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica
victor.schmidt@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-2911-7232>

Fecha de recepción: 26 mayo del 2023 / **Fecha de aprobación:** 25 octubre 2023 <https://doi.org/10.15517/mym.v12i0.55255>

RESUMEN

En este trabajo se presentan los parámetros modales de un edificio de 17,5 m de altura, debido a vibraciones ambientales, obtenidos mediante métodos en el dominio de la frecuencia y del tiempo disponibles en el programa computacional comercial ARTeMIS Modal v.5.0, con el fin de evaluar su eficacia para realizar análisis modal operacional en edificios y utilizando datos de vibraciones ambientales. En la medición se utilizó la técnica de sensores ambulantes, realizando seis configuraciones diferentes, con cuatro acelerógrafos triaxiales modelo TitanSMA. Se compararon datos procesados mediante los programas computacionales Geopsy y ARTeMIS Modal y no se encontró diferencia en los resultados. Se identificaron cinco modos de vibración mediante el análisis espectral, mientras que en el dominio del tiempo los resultados no fueron consistentes. Además, se utilizó el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) para un control cruzado entre las formas modales obtenidas con los métodos de dominio de frecuencias y de tiempo.

Palabras clave: vibraciones ambientales; análisis espectral; análisis en el dominio de la frecuencia; análisis en el dominio del tiempo; sensores ambulantes; análisis modal operacional

ABSTRACT

This paper presents the modal parameters of a 17,5 m high building, due to environmental vibrations, obtained using methods in the frequency and time domain available in the ARTeMIS Modal v.5.0 software, with the aim to evaluate its efficiency to conduct Operational Modal Analysis using data of ambient vibration tests in buildings. In the measurement, the roving sensors technique was used for a total of six test setups, with four TitanSMA triaxial accelerographs. The processing was carried out using the softwares: Geopsy and ARTeMIS Modal, with which no difference was found, and in the analysis five vibration modes were identified through spectral analysis, while the results in the time domain were inconsistent. In addition, the Modal Assurance Criterion (MAC) was used for a cross control between the modal shapes obtained with the two different domains (time and frequency).

Key words: ambient vibrations; spectral analysis; frequency domain analysis; time domain analysis; roving sensors; operational modal analysis

INTRODUCCIÓN

El Análisis Modal puede ser de tipo experimental u operacional, sin embargo, en el primero se debe tener una medición de las fuerzas que inducen la vibración, lo cual resulta muy costoso y complejo para estructuras de gran tamaño, mientras que en el segundo sólo se requiere la medición de la respuesta ante fuerzas desconocidas (Brincker & Ventura, 2015).

Lo anterior resulta de suma importancia en el ámbito estructural, ya que en muchas ocasiones es necesario que el profesional realice una adecuación sísmica, o evalúe el estado de una estructura, ya sea por la cantidad de años que tiene de construida o por un terremoto, y en dichos casos se deben tomar en consideración muchos factores para poder realizar una evaluación certera, como la geometría de la estructura y el estado de los materiales, por ejemplo. Sin embargo, a pesar de que se puede obtener una aproximación del estado de la estructura, ésta puede ser subjetiva porque no toma en consideración el aporte de elementos no estructurales, como particiones, muebles, etc., ni el desempeño de la estructura ante vibraciones debido al viento, al tránsito vehicular o de personas, el deterioro de los materiales o su estado, entre otros, como sí lo hace el Análisis Modal Operacional (OMA, por sus siglas en inglés), lo que resulta más confiable. Asimismo, de acuerdo con Brincker y Ventura (2015), el método permite estimar cargas, estimar niveles de vibración y realizar análisis de fatiga.

En Costa Rica se han realizado investigaciones de Análisis Operacional Modal, pero sigue siendo un tema un poco exclusivo dado que muchas veces los métodos que se emplean son códigos fuente cuyo uso requiere de habilidades de programación y conocimiento matemático avanzado del método, tales como los que fueron utilizados en la investigación conducida en materia de puentes (Liu Kuan, Aguero Barrantes, Barrantes Jiménez, & Loría Salazar, 2015). Para que la metodología de Análisis Operacional Modal pueda ser aprovechado y conocido aún más a nivel nacional por más profesionales, es necesario evaluar la posibilidad de utilizar programas de cómputos comerciales disponibles de modo que se facilite su aplicación. Este trabajo pretende contribuir con ese conocimiento, mediante la aplicación del programa computacional ARTeMIS Modal (Structural Vibration Solutions, s.f) en el OMA en un edificio con base en

mediciones ambientales y evaluar su eficacia para el análisis e interpretación de resultados. De igual forma, se pretende aplicar la metodología de medición de sensores ambulantes que, hasta el momento, al conocimiento de los autores, ha sido ejecutada en Costa Rica una única vez en edificaciones (Vásquez González, 2020), con la excepción de puentes (Liu Kuan, Aguero Barrantes, Barrantes Jiménez, & Loría Salazar, 2015), con énfasis en técnicas de identificación en el dominio del tiempo.

Entre los trabajos previos sobre el tema en el país, se encontró el de Carvajal (2015) que fue una de las primeras investigaciones realizadas sobre el uso de técnicas de identificación de parámetros dinámicos a partir de mediciones de vibraciones ambientales, donde utilizó funciones de transferencia. Esquivel y Schmidt (2016a) y Esquivel y Schmidt (2016b) realizaron dos investigaciones relacionadas, pero en ninguna aplicaron la técnica de sensores ambulantes. Godfrey (2018) realizó un trabajo para la identificación de modos rotacionales utilizando el programa computacional MATLAB y únicamente métodos en el dominio de la frecuencia. Albert Vásquez (2019) realizó mediciones de vibraciones ambientales, pero en viviendas de mampostería integral.

Un último trabajo que se encontró fue el de Vásquez G. (2020), que se enfocó en implementar un método de identificación de sistemas en el dominio del tiempo en edificios, donde puso en práctica la misma técnica de medición de vibraciones ambientales que se desea implementar en este proyecto, llamada “técnica de sensores ambulantes”, la cual es descrita en la literatura por Brincker y Ventura (2015), además de que realizó un control cruzado de resultados utilizando el programa computacional ARTeMIS Modal para corroborar los obtenidos mediante un programa implementado en MATLAB.

El documento anterior, presenta similitudes con este proyecto que van a ser de mucho aporte para la investigación que se quiere realizar, sin embargo, el enfoque de este trabajo no es analizar diferentes edificios, sino refinar la metodología de sensores ambulantes mencionada anteriormente, de forma tal que este trabajo sea de utilidad como guía para la realización de pruebas en edificaciones. Adicionalmente, en este trabajo el procesamiento de las señales se va realizar utilizando los programas computacionales Geopsy (Wathelet, 2020) y ARTeMIS Modal.

CASO DE ESTUDIO

El edificio seleccionado para la realización de las mediciones de Vibraciones Ambientales (MVA) corresponde al módulo C de la Facultad de Ciencias Sociales (FCS) de la Universidad de Costa Rica (UCR), donde el módulo D de la misma facultad había sido instrumentado anteriormente en otros trabajos de investigación realizados con el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (Godfrey, 2018; Vásquez G., 2020).

El edificio está compuesto por la decanatura, laboratorios, áreas de estudio y oficinas, entre otros, tiene una altura de 17,5 m, su sistema estructural sismorresistente es de marcos de concreto reforzado y entrepisos prefabricados de losas multitubulares pretensadas con una sobrelosa colada en sitio. Además, sus cimentaciones consisten en placas aisladas sobre pilotes hincados, unidas por vigas de fundación.

La estructura presenta una irregularidad moderada tanto en altura como en planta (Ver Figura 1), accesibilidad para la señal GPS de los equipos y al ser totalmente cerrada, una gran área de contacto para viento, que es la principal fuente de excitación esperada.

Debido a la distribución de las columnas, y la forma del edificio, a criterio de los autores, éste presenta mayor rigidez en el sentido largo del edificio (SO – NE) que en el sentido corto (NO – SE) (Ver Figura 1).

INSTRUMENTACIÓN DEL EDIFICIO

Primero se realizó un modelo estructural preliminar del edificio en el programa de análisis estructural SAP2000 como una guía para seleccionar la mejor ubicación de los sensores, junto con los planos estructurales, y también planear el movimiento de los sensores ambulantes.

Se utilizaron cuatro acelerógrafos triaxiales modelo TitanSMA de la marca Nanometrics suministrados por el LIS, de los cuales se utilizó únicamente la información de los ejes horizontales. Se tomó un acelerógrafo de referencia, y tres ambulantes, dos en extremos paralelos del edificio para identificar excitaciones torsionales y uno en el centro para movimientos horizontales e información adicional (Ver Figura 2).

En la prueba se planificó realizar seis configuraciones diferentes, una por nivel, manteniendo el mismo eje vertical en cada punto, con el acelerógrafo de referencia en el sexto nivel del edificio. Los resultados de estas configuraciones se deben unir posteriormente, para obtener las formas modales experimentales observadas del edificio completo. La distribución de acelerógrafos, en planta y para la primera configuración, se muestra en la Figura 2(a). La distribución en altura de las seis configuraciones se muestra en la Figura 2 (b).

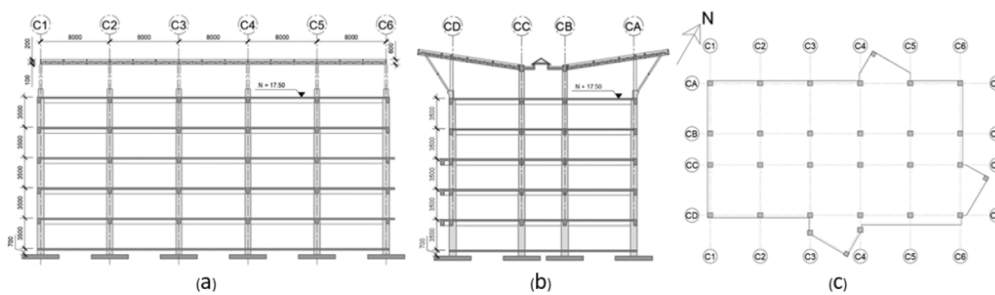


Figura 1. (a) Corte longitudinal esquemático (b) Corte transversal esquemático (c) Esquema de planta estructural

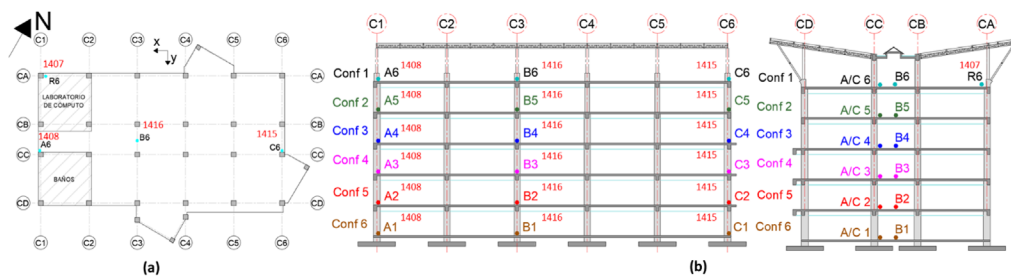


Figura 2. Distribución de acelerógrafos: (a) En planta (b) En altura

Se definió una ventana de medición de 20 minutos, cumpliendo con la recomendación propuesta por Cantieni (2004), de utilizar 1000 (mínimo) a 2000 (óptimo) veces el periodo fundamental de la estructura, el cual se obtuvo del modelo estructural realizado ($T=0,693$ s). Los datos vibratorios fueron muestreados a una frecuencia de muestreo de 200 Hz y con una sensibilidad máxima de 1g en los acelerógrafos.

$$T_1 = 2000 \cdot T_n = 1386 \text{ s} = 23,1 \text{ minutos} \quad (1)$$

$$T_2 = 1000 \cdot T_n = 693 \text{ s} = 11,6 \text{ minutos} \quad (2)$$

PRE-PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El pre-procesamiento de datos se realizó utilizando el programa computacional Geopsy y el programa ARTeMIS Modal, el primero con licencia gratuita y el segundo con la licencia proporcionada por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, con el fin de realizar una comparación entre ambos mediante los métodos del análisis espectral.

Este pre-procesamiento consistió primeramente en la conversión de unidades de cuentas eléctricas a unidades de aceleración en gales (cm/s^2) que en el caso de los equipos

TitanSMA de Nanometrics es dependiente del valor de sensibilidad y frecuencia de muestreo utilizadas durante la medición. Después, se verificó la sincronización de las señales entre equipos y se procedió a recortar cualquier segmento de la traza que presenta un salto inusual y se considere como fuente de ruido para el análisis. Estos pasos fueron realizados en el programa Geopsy debido a que ARTeMIS Modal no está diseñado para revisar y realizar estos tratamientos previos a las señales antes de ejecutar método de identificación de sistemas. En la Figura 3 se presenta el procedimiento seguido para el pre-procesamiento de señales en Geopsy y en ARTeMIS Modal, donde en este último se enfoca en la aplicación de técnicas de identificación de sistemas y en los pre-procesamientos necesarios para lograrla de la mejor forma.

La comparación entre los pre-procesamientos se realizó utilizando cuatro casos diferentes, los cuales se describen en la Tabla 1.

Comparando los resultados de los pre-procesamientos realizados en Geopsy y ARTeMIS modal, se observó que no varían significativamente entre casos lo que indica que no existe una mejoría notable que implique que es mejor usar un pre-procesamiento sobre el otro. Sin embargo, en ambos casos se apreció que cuando los registros

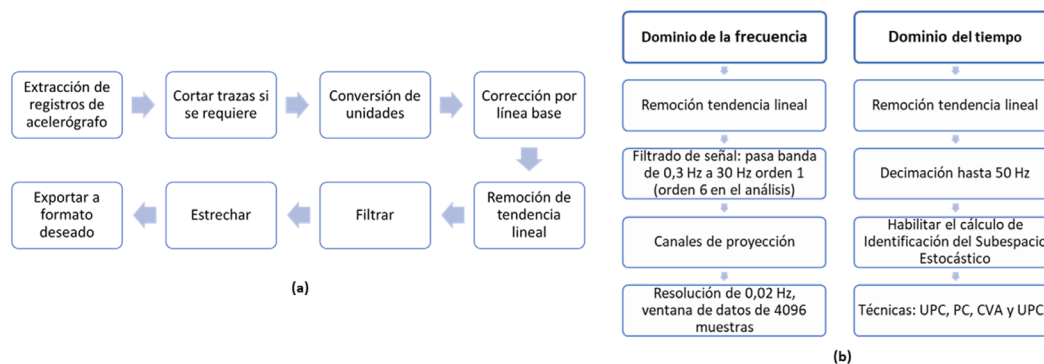


Figura 3. Pre-procesamiento de señales en (a) Geopsy y (b) ARTeMIS Modal

Tabla 1. Casos utilizados para el pre-procesamiento de los datos	
Nombre del caso	Descripción
Caso A: Geopsy/ARTEMIS Modal (todas excepto 1408 conf 2)	Con los datos originales de todas las configuraciones realizadas durante la medición (sin recortes), con excepción de los datos de la configuración dos del acelerógrafo 1408.
Caso B: Geopsy/ARTEMIS Modal recortados (todas las configuraciones)	Con los datos de todas las configuraciones recortados para descartar picos o saltos atípicos en la señal, con excepción de los registros del acelerógrafo 1408 en la configuración dos, que inicialmente no se recortaron al inicio
Caso C: Geopsy/ARTEMIS Modal recortados – 1408 recortado al inicio (sin acelerógrafo 1416 ni configuración 6)	Con los datos de todas las configuraciones recortados para descartar picos o saltos atípicos en la señal, excluyendo los datos de la configuración seis y del acelerógrafo 1416
Caso D: Geopsy/ARTEMIS Modal recortados – 1408 recortado al inicio (sin 1416)	Con los datos de todas las configuraciones recortados para descartar picos o saltos atípicos en la señal, excluyendo los datos del acelerógrafo 1416

originales no son recortados para descartar picos o saltos atípicos en la señal, los resultados obtenidos se alejan de los demás, razón por la que se resalta la importancia de eliminar cualquier anomalía que se observe en las señales recolectadas antes de proceder con cualquier análisis.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La identificación de los parámetros dinámicos operacionales se realizó tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, ambos con el procesamiento realizado en el programa computacional ARTeMIS Modal. En el análisis espectral se estudiaron dos casos: el primero sin los datos de la configuración seis ni del acelerógrafo 1416 (ubicado por el centro de la planta del edificio), y el segundo solamente sin los datos del acelerógrafo 1416. El primero de estos casos también se utilizó en el dominio del tiempo para comparar resultados entre dominios.

Análisis Modal Operacional en el dominio de la frecuencia

En cada uno de los casos, se obtuvieron resultados con los métodos espectrales disponibles en el programa ARTeMIS Modal: Método de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD), Método de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia Mejorado (EFDD) y Método de Descomposición en el Dominio de la Frecuencia Curva-

ajustada (CFDD), y luego, se realizan un control cruzado entre ellos mediante el Criterio de Aseguramiento Modal (MAC), el cual consiste en calcular la correlación entre dos vectores complejos normalizados de forma modal (Allemang, 2003).

Caso 1: sin los datos de la configuración seis ni del acelerógrafo 1416

En la Figura 4(a) se puede observar el gráfico de Descomposición en Valores Singulares, el cual se amplió en la Figura 4(b), donde se corroboró que se tuvieron suficientes fuentes de excitación para tres modos del edificio (ya que existen tres valores claramente separados del resto) (Brincker & Ventura, 2015).

Se pudieron identificar cinco modos con cada uno de los métodos espectrales, junto con su porcentaje de complejidad, el cual es indicativo de si el modo es normal o no, donde entre más cercano sea el porcentaje a 0% más normal es el modo y viceversa (Structural Vibration Solutions, s.f). Además, con los métodos EFDD y CFDD se obtuvieron los valores de amortiguamiento correspondientes. Estos resultados se presentan en la Tabla 2.

Según se pudo observar, los valores de frecuencia entre métodos son muy similares entre sí, con porcentajes de complejidad bajos, siendo el más alto de 5,19 %. En el caso del EFDD y el CFDD con porcentajes de amortiguamiento

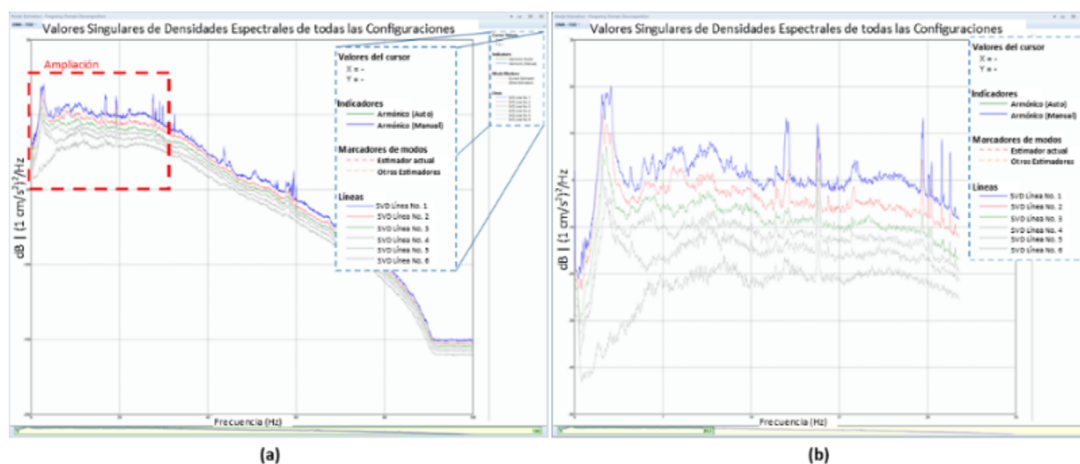


Figura 4. (a) Gráfico de Descomposición en Valores Singulares (b) Ampliación del gráfico de Descomposición en Valores Singulares

Tabla 2. Resultados obtenidos con métodos espectrales en el Caso 1			
Método	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Complejidad (%)
FDD	2,197	-	2,7
	2,49	-	1,058
	2,881	-	1,082
	4,468	-	5,19
	6,226	-	3,484
EFDD	2,193	1,166	1,785
	2,483	1,486	0,548
	2,864	2,338	0,182
	4,463	1,266	4,264
	6,213	1,137	3,004
CFDD	2,192	4,729	1,785
	2,478	1,734	0,548
	2,865	1,74	0,182
	4,46	0,64	4,264
	6,226	0	3,484

bajos también, todos inferiores al 5%, lo que es congruente con lo señalado por los autores Hesameddin, Irfanoglu y Hacker (2015), aunque presentan diferencias relativamente grandes entre sí, especialmente en el primer modo, además de que con el CFDD uno de los amortiguamientos no pudo ser identificado.

En la Tabla 3 se muestra el promedio de los valores de las frecuencias identificadas, así como su periodo y el tipo de modo observado para cada una de ellas.

Tabla 3. Resumen de resultados espectrales para Caso 1		
Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Tipo de modo
2,194	0,46	Flexión N-S
2,484	0,40	Flexión O-E
2,870	0,35	Torsión
4,464	0,22	Torsión
6,222	0,16	Flexión SO-NE

Las formas modales obtenidas para este caso en específico, se pueden observar en la Figura 5.

Los resultados anteriores fueron validados utilizando el Criterio de Aseguramiento Modal, el cual oscila entre cero y uno, indicando si los modos son perpendiculares o iguales, respectivamente (Structural Vibration Solutions, s.f), para lo cual calculó el MAC entre todos los métodos, y al obtener valores cercanos a la unidad se verificó que

los modos eran los mismos, y se pudo visualizar que los modos entre el método de EFDD y CFDD tuvieron la mayor concordancia entre sí.

Caso 2: sin los datos del acelerógrafo 1416

Al igual que en el caso anterior, se utilizaron los tres métodos disponibles en el programa, FDD, EFDD y CFDD. Además, el gráfico de Descomposición en Valores Singulares obtenido resultó satisfactorio para el análisis, a pesar de presentar una separación un poco menor entre cada uno de los valores singulares, y más “picos” indicativos de ruidos, con respecto al caso sin la configuración seis, lo cual no afectó el análisis para el rango de frecuencias de interés y las fuentes de excitación fueron apropiadas de acuerdo con Brincker y Ventura (2015).

En este caso, también se obtuvieron cinco modos con los tres métodos diferentes, con valores muy semejantes entre sí, todos con porcentajes de complejidad bajos, siendo el valor más alto de 4,244%, y al observar su forma modal los resultados se consideran satisfactorios.

Por otro lado, los valores de amortiguamiento están por debajo del 3% lo cual es adecuado para estructuras de concreto (Hesameddin et al, 2015), sin embargo, se debe señalar que con el método CFDD no se obtuvieron valores de amortiguamiento para el primer y el último modo, por lo que el método EFDD se considera más apto para los datos de esta medición.

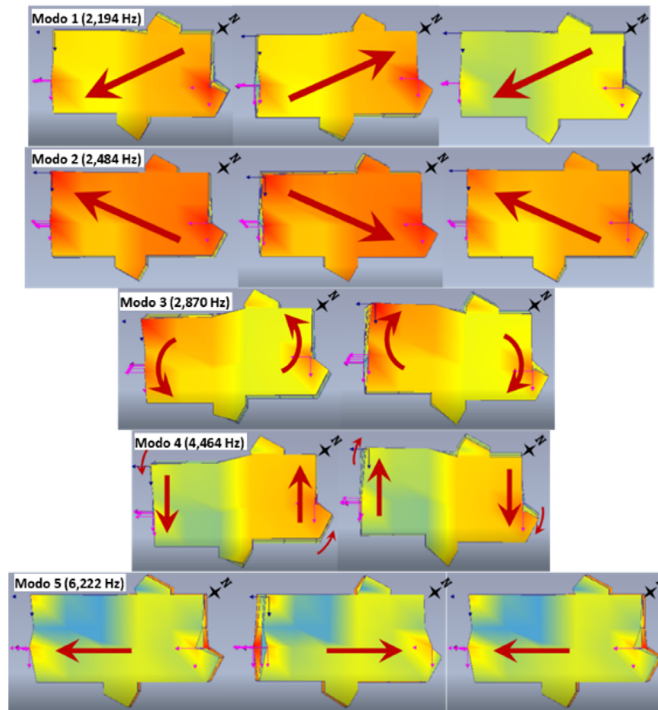


Figura 5. Modos identificados en el dominio de la frecuencia para Caso 1 (salidas gráficas del programa)

Los resultados obtenidos por cada uno de los métodos se pueden observar en la Tabla 4, mientras que el resumen de los resultados, con el periodo y el tipo de modo observado en la Tabla 5. Además, las formas modales obtenidas fueron las mismas que las observadas en el Caso 1 (Ver Figura 5).

Para este caso también se obtuvo los valores del MAC entre cada uno de los métodos utilizados, donde se pudo observar que los modos coinciden entre ellos, con valores cercanos a uno, y que al comparar el método de FDD o EFDD contra el de CFDD algunos de esos valores eran exactamente la unidad.

Tabla 4. Resultados obtenidos con métodos espectrales en el Caso 2

Método	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Complejidad (%)
FDD	2,197	-	2,901
	2,490	-	1,055
	2,881	-	1,078
	4,443	-	3,656
	6,226	-	4,244
EFDD	2,192	1,076	1,893
	2,487	1,417	0,54
	2,861	2,486	0,184
	4,456	1,228	2,70
	6,203	1,043	3,132
CFDD	2,197	0	2,901
	2,482	1,504	0,54
	2,861	1,765	0,184
	4,454	0,637	2,70
	6,226	0	4,244

En general se observó que los resultados entre ambos casos son prácticamente los mismos, por lo que no se dio una diferencia significativa al eliminar los datos de la configuración seis (del primer nivel del edificio), lo cual se verificó con los valores del MAC los cuales también resultaron muy cercanos a uno.

Tabla 5. Resumen de resultados espectrales para Caso 2

Frecuencia (Hz)	Periodo (s)	Tipo de modo
2,195	0,46	Flexión N-S
2,486	0,40	Flexión O-E
2,868	0,35	Torsión
4,451	0,22	Torsión
6,218	0,16	Flexión SO-NE

Otra observación importante es que el método de FDD fue el que presentó menor diferencia entre los dos casos, lo que indica que es el método menos afectado por la variación entre los casos. Además, se encontró que los periodos obtenidos en cada caso, así como sus formas modales, fueron exactamente los mismos.

Por último, los valores de los amortiguamientos también se asemejaron entre los casos, especialmente los del método EFDD. En el caso del método CFDD, sí se tuvo una mayor diferencia, especialmente en el primer modo, y en el segundo caso tampoco se tuvo un valor de amortiguamiento en dos de los modos.

Análisis Modal Operacional en el dominio del tiempo

Este análisis fue realizado sin la configuración seis, la del primer nivel, debido a que no aporta suficiente información para el método en el dominio del tiempo, por lo que se considera el edificio empotrado en su base. Además, también se descartó la información del acelerógrafo 1416 (el del centro del edificio), porque su información no es relevante en la obtención de las formas modales.

En este caso no se les aplicó ningún filtro a los datos, con base en el trabajo de investigación de Liu, Loh y Ni (2012), donde se encontró que para que funcionen los métodos de

identificación en el dominio del tiempo, la tasa de muestreo no puede ser alta, por lo que siempre se debe reducir decimando los datos, teniendo en cuenta que se debe pasar por un filtro paso bajo antialias con la frecuencia de corte en la frecuencia de Nyquist.

En el caso del dominio del tiempo, el programa ARTeMIS Modal utiliza el método SSI impulsado por datos, conocido como SSI-DATA con diferentes técnicas: Componente principal no ponderado extendido (SSI-UPCX), Componente principal no ponderado (SSI-UPC), Componente principal (SSI-PC), Análisis de variables canónicas (SSI-CVA) y Configuraciones de pruebas fusionadas de componentes principales no ponderados (SSI-UPC-merged), sin embargo, esta última no se utilizó en esta investigación.

En la Tabla 6 se presentan los resultados para cada una de las técnicas, donde se observa que la cantidad de valores encontrados variaba entre técnicas y que los primeros dos valores de frecuencia fueron consistentes únicamente en el SSI-UPC y SSI-CVA, aunque el primer modo de la técnica SSI-UPCX también era cercano. Además, los porcentajes de complejidad eran bastantes altos en su mayoría.

Por otro lado, los porcentajes de amortiguamiento también variaban entre los métodos, con la mayoría de porcentajes por encima del 5%, y se pudo obtener cinco formas modales entre todas las técnicas, pero ninguna coincidente con las obtenidas en el análisis espectral.

Debido a que no se pudo obtener resultados consistentes utilizando el método SSI-DATA, se realizaron diferentes pruebas modificando diferentes parámetros, valores de decimación, eliminando configuraciones o registros, pero no hubo una mejora en los resultados, además de que estos variaban con cada cambio que se realizaba lo que genera incertidumbre en su implementación.

La validación de resultados se realizó entre técnicas de SSI-UPC y SSI-CVA, debido a que, a pesar de los resultados tan inconsistentes, estas técnicas poseen valores cercanos entre sí, y se encontró que el valor del MAC es muy cercano a la unidad para el primer modo, y bastante alto para el segundo modo, lo que indica que el primer modo sí es el mismo y el segundo es bastante cercano.

Tabla 6. Resultados obtenidos en el dominio del tiempo			
Técnica	Frecuencia (Hz)	Amortiguamiento (%)	Complejidad (%)
SSI-UPC	2,45	5,73	12,275
	2,717	5,135	56,679
	8,228	9,964	67,68
	10,582	6,925	26,914
	10,971	8,14	70,284
	13,302	10,309	98,012
	16,651	2,98	68,276
	19,412	5,849	92,041
	22,025	7,432	41,676
	27,681	1,86	51,881
	29,486	4,567	39,084
	33,773	6,056	40,535
SSI-PC	2,852	3,229	23,808
	3,490	2,791	11,160
	11,509	7,347	38,671
	13,529	6,481	36,755
	16,930	4,172	60,294
	19,603	4,485	48,507
SSI-CVA	2,428	3,094	11,173
	2,704	3,06	14,033
	27,624	0,503	53,211
SSI-UPCX	2.404	3.510	6.732
	3.340	10.034	22.663
	6.437	2.584	44.095
	25.455	2.777	41.093
	27.592	1.857	71.849

Comparación de resultados entre métodos espectrales y del tiempo

En general se pudo observar que los resultados del análisis espectral fueron más consistentes que los encontrados con el método de SSI-DATA.

Por otro lado, se pudo notar que los valores del primer modo tanto del SSI-UPC como del SSI-CVA son correspondientes al valor del segundo modo encontrado con los métodos de la frecuencia, incluyendo su forma modal, y que el primer modo del SSI-PC es muy cercano al tercer modo encontrado con los métodos espectrales, pero su forma modal difiere. Sin embargo, el resto de valores no coincidieron.

Se realizó la validación de los datos entre los métodos con valores cercanos, obtenidos con cada uno de los métodos, donde se pudo observar que el valor del MAC entre el valor de 2,49 Hz obtenido con el FDD y el valor de 2,428 Hz obtenido con el SSI-CVA, resultó ser bastante cercano a uno (0,915), por lo que se puede decir se trata del mismo modo corroborando lo observado anteriormente. Por otro lado, el mismo valor de 2,49 Hz del FDD resultó ser cercano, pero en menor grado con respecto al valor de 2,45 Hz del SSI-UPC, ya que el MAC tuvo un valor de 0,897.

El resto de comparaciones realizadas resultaron en valores de MAC muy bajos, siendo el más alto de 0,189 entre el modo de 6,226 Hz del FDD y el de 6,437 Hz del UPCX. Incluso el valor del MAC entre el primer modo del SSI-PC (2,852 Hz) y el tercer modo del FDD (2,881 Hz), resultó de 0,114 lo que indica que los modos no son iguales.

Por todos los análisis realizados, se encontró que el método en el dominio del tiempo de ARTeMIS Modal (SSI-DATA) no tuvo un buen desempeño para los datos obtenidos durante la medición.

CONCLUSIONES

Al comparar el pre-procesamiento de los datos utilizando los programas computacionales Geopsy y ARTeMIS Modal se encontró que no hay diferencia en los resultados, sin importar el programa utilizado, sin embargo, se observó que se obtienen resultados más consistentes siempre y cuando se revisen las señales de medición y se elimine cualquier anomalía en los registros, previo al análisis, especialmente en el caso de ARTeMIS Modal.

Se encontró que el programa computacional ARTeMIS Modal funciona de mejor manera con los métodos espectrales, especialmente si el usuario es una persona con poco conocimiento en los métodos del dominio del tiempo, y que estos obtienen resultados consistentes entre sí, sin importar si se elimina una configuración o acelerógrafo, lo que indica que son menos susceptibles a manipulaciones de los datos de entrada durante el análisis.

Al realizar las configuraciones de instrumentación de piso a piso de manera horizontal, esto con base en las recomendaciones bibliográficas para la técnica de sensores ambulantes, puede presentar dificultades para unir los resultados modales de diferentes configuraciones, sin embargo, no se puede concluir si una configuración con alineamiento vertical sería mejor hasta tener una investigación que lo respalde.

REFERENCIAS

Allemang, R. J. (2003). The Modal Assurance Criterion- Twenty Years of Use and Abuse. *Sound and Vibration*, 14-21.

Brincker, R., & Ventura, C. (2015). *Introduction to Operational Modal Analysis*. West Sussex: John Wiley & Sons.

Cantieni, R. (2004). *Experimental Methods used in system identification of civil engineering structures*. Switzerland.

Carvajal Barrionuevo, O. (2005). *Identificación de parámetros dinámicos de dos tipos de edificio, utilizando técnicas analíticas y experimentales*. Proyecto de Graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Esquivel Salas, L. C., & Schmidt Díaz, V. (2016a). Metodología propuesta para ejecutar y procesar mediciones de vibraciones ambientales utilizando acelerógrafos triaxiales en edificios de concreto reforzado en menos de 100m de altura. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras Vol. 21,1*, 61-77.

Esquivel Salas, L. C., & Schmidt Díaz, V. (2016b). Mediciones de vibraciones Ambientales en tres edificios de concreto reforzado de 28, 11 y 6 pisos. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 95*, 81-103.

Godfrey, R. (2018). *Guía para el procesamiento de señales de aceleración registradas mediante los acelerógrafos Guralp*. San José, Costa Rica: Laboratorio de Ingeniería Sísmica.

Hesameddin, K. I. (2015). Effective Viscous Damping Ratio in Seismic Response of Reinforced Concrete Structures. *6th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering* (págs. 1-8). Chicago: University of Illinois.

Liu Kuan, Y.-C., Aguero Barrantes, P., Barrantes Jiménez, R., & Loría Salazar, L. G. (2015). *Monitoreo estructural del puente sobre el Río Seco Ruta Nacional No. 1 LM-PI-UP-PN20-2015*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

Liu Kuan, Y.-C., Loh, C.-H., & Ni, Y.-Q. (2012). Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(4), 477-498. Obtenido de Wiley Online Library.

Structural Vibrations Solutions. (s.f.). *Do you need to do modal analysis without controlling the input?* Obtenido de Structural Vibrations Solutions: Extraído el 21 de febrero, 2023 de <https://svibs.com/applications/operational-modal-analysis/>

Vásquez González, S. S. (2020). *Implementación de métodos de identificación de sistemas multivariables en el dominio del tiempo con base en vibraciones ambientales para edificaciones*. Proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Wathelet, M. C.-L. (2020). Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878--1889, doi: 10.1785/0220190360.