

UNIVERSIDAD EAFIT
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA



**IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL EDIFICIO DE INGENIERÍAS DE LA
UNIVERSIDAD EAFIT MEDIANTE PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL**

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRÍA
PRESENTADO POR:
YVONNE MERINO PEÑA

DIRIGIDO POR:
JUAN CARLOS BOTERO PALACIO

Medellín, Mayo de 2014

RESUMEN

Se evalúan las propiedades dinámicas del edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT caracterizadas por frecuencias de vibración, formas modales y amortiguamiento, empleando la metodología de identificación no paramétrica de sistemas, a partir del análisis espectral convencional de señales en el tiempo. Las señales se obtienen de registros de aceleración como respuesta de la estructura ante vibraciones producidas por ruido ambiental. Para la adquisición de señales de respuesta se instrumentó el edificio con una red integrada de acelerómetros digitales. Se determinaron las frecuencias de la estructura reflejadas en el análisis espectral y se validaron con las frecuencias predominantes en las funciones espectrales estimadas para las señales con contenido sísmico. También se determinan las formas modales asociadas a cada frecuencia y así mismo las relaciones de amortiguamiento crítico. Finalmente se encuentran parámetros dinámicos coherentes y con variaciones aceptables con respecto a los obtenidos por medio de la modelación teórica.

Palabras clave: *Instrumentación, Propiedades Dinámicas, Análisis Espectral, Identificación de Sistemas, Vibraciones Ambientales.*

ABSTRACT

Dynamic properties described by vibration frequencies, modal forms and damping ratios of the Engineering Building in EAFIT University are estimated, using non parametric system identification methodology, from conventional spectral analysis of time signals. These signals are obtained from acceleration records as a response by the structure to vibrations generated by ambient noise. To get response signals the building was instrumented with an integrated digital accelerometer network. Structure frequencies from spectral analysis were determined and then checked with predominant frequencies in spectral functions calculated for earthquake signals. Modal forms associated to each frequency are also identified and the damping ratios. Finally, coherent dynamic parameters are found and these have acceptable variations with regard to values obtained from theoretical model.

Keywords: *Instrumentation, Dynamic Properties, Spectral Analysis, System Identification, Ambient Vibrations.*

INTRODUCCION

La práctica del diseño en ingeniería abarca numerosas teorías en constante estudio con el fin de elaborar modelos analíticos que se acerquen a una representación cada vez más real de lo que será la estructura una vez sea materializada. Sin embargo, aún se siguen investigando los fenómenos físicos que ocurren en una estructura al someterse a una fuerza perturbadora; lo que representa la mayor preocupación en cuestión de análisis para los ingenieros en la actualidad. Si un sistema físico es perturbado sin abandonar su condición de estabilidad, es de esperarse que dicho sistema vuelva a su posición de reposo, pero no sin antes realizar varias oscilaciones que disipen la energía impresa en él, mediante fuerzas internas y amortiguamientos ofrecidos por las propiedades de sus materiales. El comportamiento de estas oscilaciones se conoce como la respuesta del sistema ante dicha perturbación.

En el quehacer común de la ingeniería, se elaboran modelos a los que se asignan ciertas propiedades a partir de datos históricos; y se calcula la respuesta dinámica de la estructura ante ciertas cargas definidas, empleando un procedimiento de análisis teórico ya definido. En investigación, por el contrario, se parte de una respuesta real medida experimentalmente y se analiza metódicamente con el fin de encontrar los valores reales de las propiedades dinámicas del sistema que generen tal respuesta, lo que se conoce como *identificación de sistemas*. Ésta práctica permite ampliar el conocimiento que se tiene hasta ahora acerca de los márgenes de error entre el comportamiento real de una estructura y la formulación teórica con que se estudia su respuesta.

En este trabajo se pretende aplicar una metodología propuesta por (Welch, 1967) y descrita complementariamente en (Bendat & Piersol, 1993), para determinar los parámetros que definen el comportamiento dinámico de un sistema físico, al estudio de un edificio de la Universidad EAFIT, partiendo de señales obtenidas de pruebas de vibración ambiental realizadas mediante la instrumentación de la estructura con una red integrada de equipos de medición que registran principalmente valores de aceleración.

Dentro de la línea de investigación asociada al área de instrumentación sísmica e identificación de sistemas físicos desarrollada por el grupo de Investigación de Mecánica Aplicada se han elaborado trabajos donde se implementa la metodología de análisis aquí presentada al estudio de modelos reales construidos a escala (Henao A. & Botero P., 2013), en los que se han validado los resultados obtenidos de pruebas de excitación forzada y vibración ambiental con un modelo teórico, encontrando variaciones muy pequeñas entre ambos casos de análisis. A partir de estos trabajos se continúa con el proceso de implementación del método de (Welch, 1967) a estructuras de uso real, en las que la componente de ruido en las señales es alta y hace necesario un análisis más detallado del comportamiento del sistema.

Con el propósito de avanzar continuamente en este tipo de investigación, se han instrumentado otras estructuras en la ciudad de Medellín, a las que se han identificado sus propiedades dinámicas a partir de excitación sísmica de baja intensidad (Restrepo & Jaramillo, 2008). Sin embargo, la metodología presentada en (Bendat & Piersol, 1993) se implementa por primera vez en el edificio de Ingenierías de la Universidad EAFIT, con el fin de adelantar estudios de identificación de sistemas, ya que la metodología ha evidenciado resultados óptimos en la aplicación a estructuras en otros países (Muriá V., 2007).

En el corto plazo, el proyecto permitirá contar con una guía para evaluar las propiedades dinámicas de otras estructuras de interés en ingeniería; a largo plazo, metodología de identificación de sistemas empleando análisis espectral de señales de vibración ambiental pueden servir para detectar daños estructurales sobre edificaciones que no se encuentren instrumentadas permanentemente. Si se hacen mediciones comparativas en el tiempo,

particularmente antes y después de un evento sísmico, es posible identificar cambios en las propiedades dinámicas de la estructura, las cuales pueden estar asociadas a daños producidos por la pérdida de rigidez del sistema provocando patologías que pueden comprometer la estabilidad de la estructura.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Validar la metodología de identificación de sistemas empleando análisis espectral de señales en un edificio instrumentado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Instrumentar el edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT con un sistema integrado de acelerómetros.

Determinar las propiedades dinámicas del edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT mediante un análisis espectral convencional en pruebas de vibración ambiental.

Comparar las propiedades dinámicas del edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT con las evaluadas en un modelo analítico de la estructura elaborado mediante el empleo de un programa de cómputo comercial.

Monitorear la estructura del edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT mediante el uso de equipos de medición para instrumentación sísmica.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la vida y regalarme la oportunidad de realizar este proyecto poniendo en mi camino a todas las personas que con su colaboración lo hicieron posible.

A mi familia, por su amor incondicional y entrega. Les dedico este logro: a mi madre y hermana, con quienes aún puedo disfrutarlo, y a mi padre que me cuida desde el cielo.

Al profesor Juan Carlos Botero por sus enseñanzas durante el posgrado y su apoyo en el proyecto de grado.

A quienes les debo la oportunidad de ingresar a esta maestría, el Ing. Hugo Monsalve y el Ing. José Fernando Echeverry.

A todas las personas que de alguna forma aportaron a este trabajo de manera técnica y afectiva.

CONTENIDO

1. EDIFICIO EN ESTUDIO	11
GENERALIDADES	11
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	11
MODELACIÓN	13
2. INSTRUMENTACIÓN	19
EQUIPOS DE MEDICIÓN	19
DISPOSICIÓN DE INSTRUMENTOS	22
INSTALACIÓN DE EQUIPOS	25
DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RUIDO	26
MONITOREO DE LA ESTRUCTURA	29
ADQUISICIÓN DE DATOS	29
3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	31
IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	31
PROCESOS ESTOCÁSTICOS	31
FUNCIONES DE CORRELACIÓN Y ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	32
PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	36
4. PROCESAMIENTO DE DATOS	42
DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
PROGRAMA DE CÓMPUTO "VIBRACIONES"	43
TRATAMIENTO DE SEÑALES	43
ANÁLISIS ESPECTRAL	47
EVENTOS SÍSMICOS DESTACADOS	50
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS PREDOMINANTES	52
DETERMINACIÓN DE FORMAS MODALES	57
CÁLCULO DE AMORTIGUAMIENTO	67
CONCLUSIONES	70
REFERENCIAS	72

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura No. 1. (a) Planta estructural Placa 1 [Área: 2896 m²]; (b) Planta estructural Placa 2 [Área: 550 m²]; (c) Planta estructural Placa Típica (Losas 3 a 9) [Área: 1160 m²].</i>	13
<i>Figura No. 2. Modelo analítico para la estructura del edificio en estudio.</i>	13
<i>Figura No. 3. Modelo analítico para secciones de columnas en concreto reforzado.</i>	16
<i>Figura No. 4. Modelación de Losa Típica.</i>	16
<i>Figura No. 5. Primeros modos de vibración calculados mediante el modelo teórico: (a) Modo 1 [Dirección Longitudinal]; (b) Modo 2 [Dirección Transversal]; (c) Modo 3 [Torsional]; (d) Modo 4 [Dirección Longitudinal]; (e) Modo 5 [Dirección Transversal]; (f) Modo 6 [Torsional].</i>	18
<i>Figura No. 6. Equipos utilizados para la instrumentación (a) Registrador CUSP-Me; (b) Acelerómetros CUSP-3.</i>	19
<i>Figura No. 7. Formas modales para la estructura modelada (a) Primer modo de traslación; (b) Segundo modo de traslación.</i>	23
<i>Figura No. 8. Configuración instrumental No. 1 adoptada para instrumentación permanente y pruebas de vibración ambiental.</i>	24
<i>Figura No. 9. Configuración instrumental No. 2 adoptada para pruebas de vibración ambiental.</i>	24
<i>Figura No. 10. Puntos estructurales seleccionados para la instalación de los sensores de movimiento en los niveles a instrumentar.</i>	25
<i>Figura No. 11. Instalación de placas de soporte para los sensores dentro de buitrones del edificio.</i>	26
<i>Figura No. 12. Señales desfasadas debido a los cambios de temperatura.</i>	27
<i>Figura No. 13. Variación en el tiempo de los desfases máximos de la señal calculados para muestras de dos minutos cada cuatro a cinco horas.</i>	28
<i>Figura No. 14. Variación en el tiempo del ruido máximo registrado en la estructura durante tres semanas.</i>	28
<i>Figura No. 15. Almacenamiento de señales registradas por el equipo.</i>	30
<i>Figura No. 16. Subdivisión del registro original en segmentos continuos.</i>	36
<i>Figura No. 17. Ventana de tiempo de Hanning para una señal de 60 s.</i>	39
<i>Figura No. 18. Curva de respuesta en frecuencia para un sistema con amortiguamiento moderado [Tomado de: (Clough & Peinzen, 2003). β representa la relación de frecuencias entre el sistema y la excitación $\beta = \omega/\omega_n$].</i>	40
<i>Figura No. 19. (a) Configuración instrumental No. 1 para pruebas de vibración ambiental 1, 2, 3, 5 y 6; (b) Configuración instrumental No. 2 para prueba de vibración ambiental 4.</i>	42
<i>Figura No. 20. Presentación programa de cálculo VIBRACIONES.</i>	43
<i>Figura No. 21. Lectura de registro de aceleraciones en el tiempo [Sensor 01 – Dirección X (Transversal)].</i>	44

<i>Figura No. 22. Registro en el tiempo con corrección de línea base [Sensor 07 (P8) – Dirección X (Transversal)].</i>	45
<i>Figura No. 23. Aplicación de filtros de frecuencia al registro en el tiempo.</i>	45
<i>Figura No. 24. Identificación de amplitudes máximas de la señal [Sensor 07 (P8) – Dirección X (Transversal)].</i>	46
<i>Figura No. 25. Espectro de Potencia [Dirección Transversal].</i>	47
<i>Figura No. 26. Parámetros para la subdivisión de la señal en tramos.</i>	48
<i>Figura No. 27. Espectro de Fourier Promedio por tramos [Dirección Transversal].</i>	48
<i>Figura No. 28. Espectro de Potencia Promedio por tramos [Dirección Transversal].</i>	49
<i>Figura No. 29. Funciones espectrales para el análisis de las señales en los sensores 04 (P3) y 07 (P8) [Dirección transversal].</i>	50
<i>Figura No. 30. Registro de aceleraciones – Sismo M_L 3.9 (2013-10-28) [Sensor 02 (S1) – Dirección Longitudinal].</i>	50
<i>Figura No. 31. Registro de aceleraciones – Sismo M_L 3.9 (2013-10-28) [Sensor 02 (S1) – Dirección Transversal].</i>	51
<i>Figura No. 32. Registro de aceleraciones – Sismo M_L 3.9 (2013-10-28) [Sensor 07 (P8) – Dirección Longitudinal].</i>	51
<i>Figura No. 33. Espectro de potencia por tramos de 2048 puntos en dirección transversal (PVA No.1): (a) Venta de frecuencias de 0 Hz a 12 Hz; (b) Ventana de frecuencias de 0 Hz a 6 Hz.</i>	53
<i>Figura No. 34. Espectro de potencia por tramos de 2048 puntos en dirección transversal (PVA No.6).</i>	53
<i>Figura No. 35. Espectro de potencia por tramos en dirección longitudinal (PVA No.1): (a) Venta de frecuencias de 0 Hz a 12 Hz; (b) Ventana de frecuencias de 0 Hz a 6 Hz.</i>	54
<i>Figura No. 36. Espectro de potencia por tramos en dirección longitudinal (PVA No.6).</i>	54
<i>Figura No. 37. Espectro de potencia de las señales durante el sismo (Dirección Transversal).</i>	55
<i>Figura No. 38. Espectro de potencia de las señales durante el sismo (Dirección Longitudinal).</i>	55
<i>Figura No. 39. Función Cociente Espectral entre señales de cubierta y base durante el sismo (Dirección Transversal): (a) Sensor 07 (CB) vs. Sensor 02 (S1); (b) Sensor 06 (CB) vs. Sensor 03 (S1).</i>	56
<i>Figura No. 40. Función Cociente Espectral entre señales de cubierta y base durante el sismo (Dirección Longitudinal): (a) Sensor 07 (CB) vs. Sensor 02 (S1); (b) Sensor 06 (CB) vs. Sensor 03 (S1).</i>	57
<i>Figura No. 41. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.50 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].</i>	58
<i>Figura No. 42. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].</i>	58
<i>Figura No. 43. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 4.20 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].</i>	58
<i>Figura No. 44. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].</i>	59

Figura No. 45. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.15 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].	59
Figura No. 46. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].	59
Figura No. 47. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 3.80 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].	60
Figura No. 48. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].	60
Figura No. 49. Forma modal asociada a la frecuencia 1.50 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].	60
Figura No. 50. Forma modal asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].	61
Figura No. 51. Forma modal asociada a la frecuencia 4.20 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].	61
Figura No. 52. Forma modal asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].	61
Figura No. 53. Forma modal asociada a la frecuencia 1.15 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].	62
Figura No. 54. Forma modal asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].	62
Figura No. 55. Forma modal asociada a la frecuencia 3.80 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].	62
Figura No. 56. Forma modal asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].	63
Figura No. 57. Ángulo de fase en 1.80 Hz [Dirección Transversal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.	63
Figura No. 58. Ángulo de fase en 5.10 Hz [Dirección Transversal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.	64
Figura No. 59. Ángulo de fase en 1.80 Hz [Dirección Longitudinal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.	64
Figura No. 60. Ángulo de fase en 5.10 Hz [Dirección Longitudinal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.	64
Figura No. 59. Funciones de coherencia espectral (PVA No.4) [Dir.T]: (a) Sensor 07 vs. Sensor 01; (b) Sensor 07 vs. Sensor 03; (c) Sensor 07 vs. Sensor 04.	65
Figura No. 60. Funciones de coherencia espectral (PVA No.4) [Dir.L]: (a) Sensor 07 vs. Sensor 01; (b) Sensor 07 vs. Sensor 03; (c) Sensor 07 vs. Sensor 04.	65
Figura No. 63. Forma modal asociada a la frecuencia 6.70 Hz (PVA#4) [Dirección Longitudinal].	66
Figura No. 61. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=1.50$ Hz [Dir.T].	68
Figura No. 62. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=4.20$ Hz [Dir.T].	68
Figura No. 63. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=1.15$ Hz [Dir.L].	69
Figura No. 64. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=3.80$ Hz [Dir.L].	69

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla No. 1. Listado de equipos de laboratorio considerados en el cálculo de las masas de la estructura.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla No. 2. Frecuencias de vibración calculadas mediante el modelo teórico para la estructura en estudio.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla No. 3. Nomenclatura de acelerómetros según la disposición instrumental adoptada.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla No. 3. Primera etapa de pruebas de vibración ambiental.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla No. 4. Segunda etapa de pruebas de vibración ambiental.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla No. 5. Amplitudes máximas registradas [PVA No.6].</i>	<i>46</i>
<i>Tabla No. 6. Comparación de frecuencias del sistema con modelación teórica.</i>	<i>67</i>
<i>Tabla No. 6. Corrección de amortiguamiento [Dir.T].</i>	<i>68</i>
<i>Tabla No. 7. Corrección de amortiguamiento [Dir.L].</i>	<i>69</i>

1. EDIFICIO EN ESTUDIO

Este capítulo se refiere a los aspectos característicos de la estructura que fue objeto principal de análisis en este trabajo y que corresponde al edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT. Se describe el tipo de edificación, su caracterización bajo los parámetros normativos, generalidades del suelo, y propiedades de los elementos estructurales principales como son su configuración, dimensiones, materiales, entre otros.

GENERALIDADES

La estructura seleccionada para este proyecto hace parte del plan piloto para avanzar en la línea de investigación asociada al área de instrumentación sísmica e identificación de sistemas físicos desarrollada por el grupo de Mecánica Aplicada de la Escuela de Ingenierías. Se buscó principalmente estudiar una edificación de la cual fuera posible el acceso a la información de carácter técnico con fines de investigación. El edificio también denominado *bloque 19* funciona como edificio de ingenierías de la universidad EAFIT, donde se concentra el Centro de Laboratorios de la institución, por lo que en sus cuatro primeras losas se puede encontrar maquinaria generadora de constantes vibraciones en el sistema estructural.

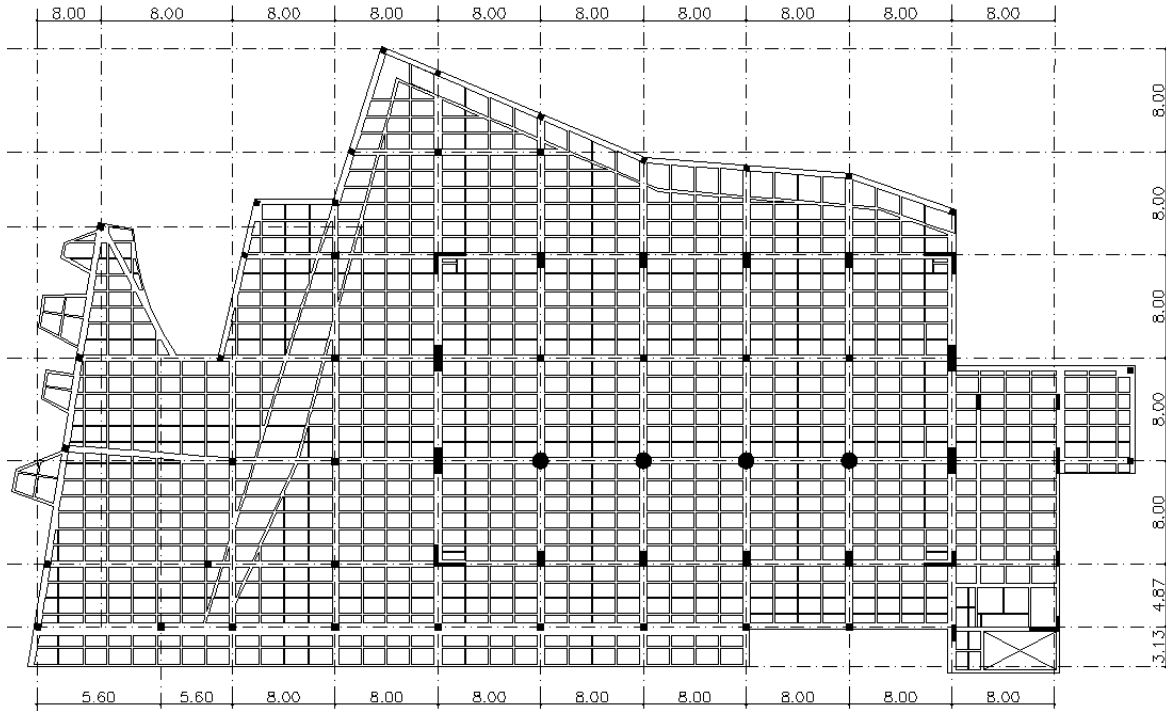
DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El edificio fue diseñado y construido bajo los requerimientos del reglamento NSR-98 (AIS, 1997), según el cual esta obra de infraestructura se clasifica de acuerdo a su uso como una *estructura de ocupación especial (Grupo II)*. Sin embargo, bajo los requerimientos del reglamento NSR-10 (AIS A., 2010), la estructura debería ubicarse en la categoría de uso *Grupo III*, como una *edificación de atención a la comunidad*, condición que le exigiría estar en capacidad de atender emergencias y preservar la salud de las personas después de eventos sísmicos. La obra se proyectó sobre un depósito aluvial de tipo sedimentario del río Medellín y la quebrada la Aguacatala, compuesto en su mayoría por gravas gruesas embebidas en arenas gruesas a finas (Osorio M., 2008). Por su ubicación en la ciudad de Medellín (catalogada por el reglamento NSR-98 como zona de Amenaza Sísmica Intermedia), y sus características de tipo estructural, el edificio se clasifica como una estructura con capacidad de disipación de energía moderada (DMO).

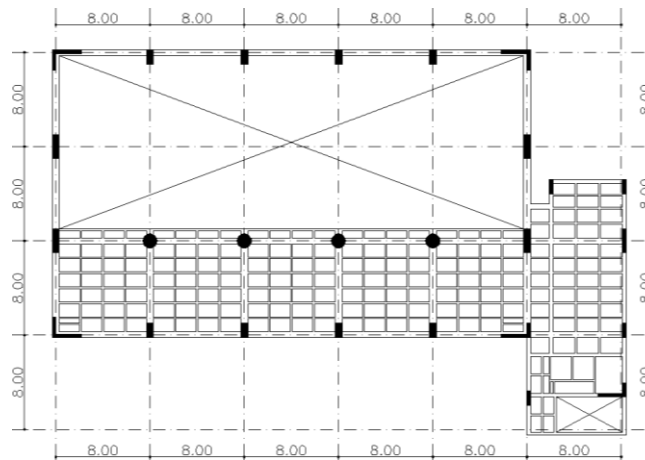
Cimentada sobre pilas excavadas a 6.0 m de profundidad, el edificio de 10 pisos y 40.6 m de altura total se compone de un sistema estructural de pórticos ortogonales en concreto reforzado, con una estructura principal de 9 placas de entepiso de área promedio 1160 m² con luces máximas de 8 m; en su primer nivel una placa de plataforma de mayor área (2896 m²), y en el último nivel se encuentra una cubierta metálica. El concreto de diseño fue especificado para resistir como mínimo 280 kg/cm² en todo el edificio.

La estructura principal está conformada por 6 ejes de columnas en dirección longitudinal y 8 ejes en dirección transversal, 4 columnas son pantallas en concreto con forma de *L* ubicadas en las esquinas del módulo principal del edificio y una similar adicional en el módulo adyacente que conforma las escaleras. Las columnas restantes tienen secciones que varían entre 0.3x1.2 m; 0.6x1.2 m; 0.6x2.0 m y 0.3x2.0 m; y 4 columnas circulares de 1.0 m de diámetro. Las vigas principales tienen secciones que van desde 0.3x0.5 m hasta 0.6x0.5 m y desde 0.4x0.7 m hasta 0.6x0.7 m en la primera losa y losas típicas, y vigas de 0.5x0.5 m y 0.6x0.8 m en las losas de pisos 4 y 5. Por su distribución en planta, se puede decir que las placas 3 a 9 tienen forma regular; las placas 1 y 2 que

corresponden a la plataforma y el mezzanine respectivamente, varían en planta con respecto a las demás debido a su disminución en área; en la *Figura No. 1* se ilustran las plantas estructurales de las placas mencionadas.



(a)



(b)

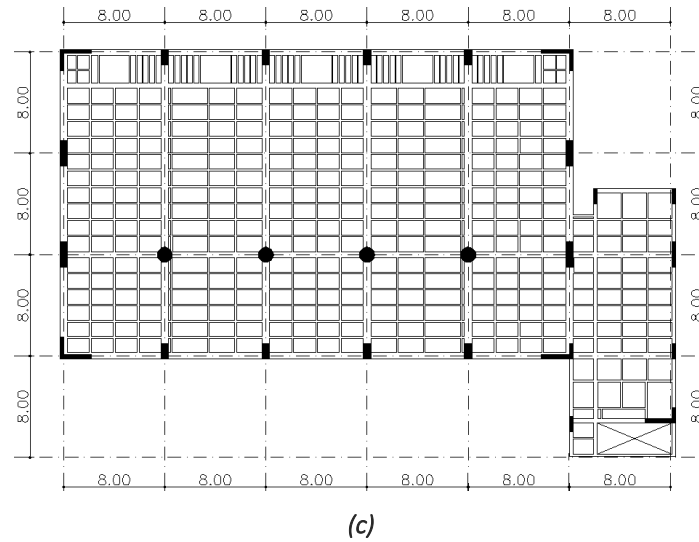


Figura No. 1. (a) Planta estructural Placa 1 [Área: 2896 m²]; (b) Planta estructural Placa 2 [Área: 550 m²]; (c) Planta estructural Placa Típica (Losas 3 a 9) [Área: 1160 m²].

MODELACIÓN

Con el fin de simular el comportamiento dinámico de la estructura, se elabora un modelo analítico empleando el programa ETABS (CSI) que permita determinar las frecuencias de vibración y sus correspondientes formas modales para el edificio en estudio (Figura No. 2).

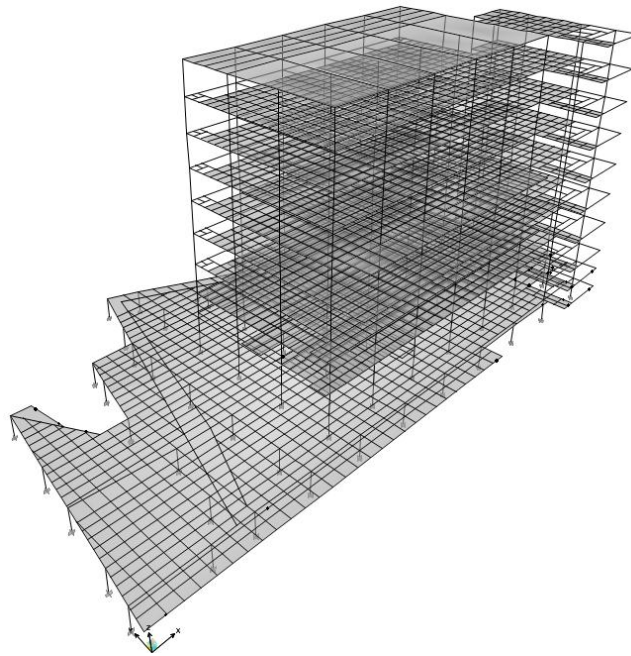


Figura No. 2. Modelo analítico para la estructura del edificio en estudio.

ANÁLISIS MODAL

Existen dos tipos de análisis modal para el cálculo de los parámetros dinámicos: *Análisis con Eigen-vectores* y *Análisis con vectores de Ritz*. Con el uso de los vectores de *Ritz* se busca determinar las frecuencias asociadas a los modos de vibración que son excitados por una carga en particular; por ello es recomendable aplicar este análisis a modelos elaborados para diseño, al cual se le asignan diferentes casos de carga que se espera actúen sobre la estructura. Sin embargo, en este trabajo se pretende simular el comportamiento real del edificio sin considerar más factores que su propio peso y cargas permanentes en sus losas, y así calcular los parámetros dinámicos de la estructura tal como se encuentra construida; por ello se adopta el análisis modal que emplea los *eigen*-vectores para determinar las frecuencias y formas modales innatas de la estructura, debidas a la configuración estructural de sus elementos y los materiales con los cuales se ha construido. No obstante, en los cálculos que se realizan con éste tipo de análisis no se considera el amortiguamiento de la estructura, ya que se ocupa de determinar los parámetros modales para un movimiento de vibración libre *no amortiguada*. Esta condición puede generar desviaciones con respecto a los resultados encontrados con las pruebas experimentales, las cuales deben reflejar los efectos del amortiguamiento en la estructura.

MASA

La masa considerada para el cálculo de las propiedades modales corresponde al peso propio de la estructura debida a las secciones y materiales asignados a sus elementos, además del peso de los equipos que se encuentran anclados a las losas de entrepiso, ya que se consideran como cargas permanentes. Sin embargo, en casos particulares de ciertas edificaciones que soportan cargas móviles mayores a los valores especificados por el reglamento debido a su uso, éste recomienda considerar en el análisis dinámico una porción de la masa de los elementos que puedan constituir carga viva [NSR-98 (AIS, 1997)]. En la modelación del edificio se tuvo en cuenta el peso de los equipos que se clasifican como cargas vivas (no permanentes) dada su condición de apoyo simple sobre las losas de entrepiso. De este peso se consideró un 25% de su valor como masa que contribuye al comportamiento dinámico.

En la *Tabla No. 1* se muestra la información de los equipos que fueron considerados en el análisis para el cálculo de la carga viva en las losas sobre las cuales funcionan laboratorios:

Tabla No. 1. Listado de equipos de laboratorio considerados en el cálculo de las masas de la estructura.

EQUIPO	PESO - kN	EQUIPO	PESO - kN
PISO 1		PISOS 2 Y 3	
Centro maquinado Milltronics VM16	36.0	Cortadora Láser	1.6
Torno CNC Milltronics SL6	32.0	Fresadora	20.0
Torno convencional Vöest Alpine	14.8	Robot	4.0
Rectificadora plana - HK Orion	13.0	Torno	10.0
Fresadora universal - Deckel	12.5	Cámara de Humedad	1.0
Afiladora universal Kuhlman	9.5	Ductilómetro	1.5
Sierra sin fin Jaespa	6.2	Prensa de Compresión HM 3000	1.5
Sierra vaiven Kasto	5.3	Horno de Secado	1.0
Preajustadora de herramientas Zoller	3.5	Consolidómetros 150kg x 2 + pesas 400kg	7.0

EQUIPO	PESO - kN	EQUIPO	PESO - kN
Prensa tornillo Ageo	2.5	Prensa Triaxial HM 3000	1.5
Taladro de banco Flott	1.4	Centrifuga	1.5
Esmeril de pedestal Richmann+sohn	0.8	Cámara Climática	2.6
Centro de maquinado Benchman	3.6	Durómetro Universal	1.1
Dobladora de tubos CNC	24.0	Máquina de Fatiga	2.0
Torno convencional Stankoimport (ruso)	19.0	Laminador	2.0
Fresadora First lc/20vs	14.0	Máquina Universal Instron	2.5
Fresadora First IC 1 ½ V5	10.1	Mármol de Medición y Mármol de Planitud	7.0
Taladro fresador Top Tech DM 45	3.8	Patrones Calibración de Fuerza	5.0
Taladro fresador Top Tech ZX 45	3.8	Máquina de Coordenadas	24.0

RIGIDEZ

Materiales

Para la representación analítica de la estructura se requiere simular los materiales con propiedades que correspondan a la composición actual del edificio con el fin de ser coincidentes entre el modelo y la realidad. Teniendo en cuenta que la estructura fue construida en su mayoría en concreto reforzado, se consultaron los registros de ensayos al concreto realizados durante la construcción a diferentes elementos del edificio y así obtener los valores de resistencia a la compresión a la edad de 28 días. Dichos registros reportan resultados de ensayos a diferentes elementos como losas, muros, escaleras, columnas, durante varias etapas de la construcción a lo largo de 9 meses de seguimiento. Para la modelación de las propiedades del concreto se tomó un valor promedio de resistencia para losas aéreas de 30.18 MPa. El módulo de elasticidad utilizado para el análisis se calculó mediante el empleo de relaciones empíricas establecidas en el reglamento *NSR-98 (AIS, 1997)*, como se muestra en la *Ecuación (49)*:

$$E_c \cong 5500 * \sqrt{f_c} \quad (1)$$

$$E_c \cong 5500 * \sqrt{30.2 \text{ MPa}} \cong 30225 \text{ MPa} \quad (2)$$

Es importante aclarar que todos los elementos estructurales del edificio fueron modelados con el mismo material; por consiguiente presentan las mismas propiedades de elasticidad.

Propiedades de Elementos Estructurales

En el intento por alcanzar una representación estructural cercana a la realidad, al momento de asignar secciones a los elementos verticales del modelo analítico se consideró la rigidez que aporta el refuerzo a la sección en concreto. Con ayuda del método de la sección transformada descrito en *(Rochel A., 2007)*, se calculó la inercia de las secciones estimando la rigidez adicional por parte del refuerzo que contiene cada una de ellas. El método propone básicamente *transformar la sección de concreto y acero en una sección homogénea reemplazando el*

área del acero a tracción A_s por un área de concreto equivalente ($A_c = n \cdot A_s$), donde n representa la relación entre los módulos elásticos de los dos materiales, concreto y acero. Ésta área equivalente debe coincidir con el centroide del refuerzo que trabaja a tracción. De esta forma se obtuvieron inercias mayores para modelar las secciones de columnas. La *Figura No. 3* muestra esquemáticamente el modelo utilizado.

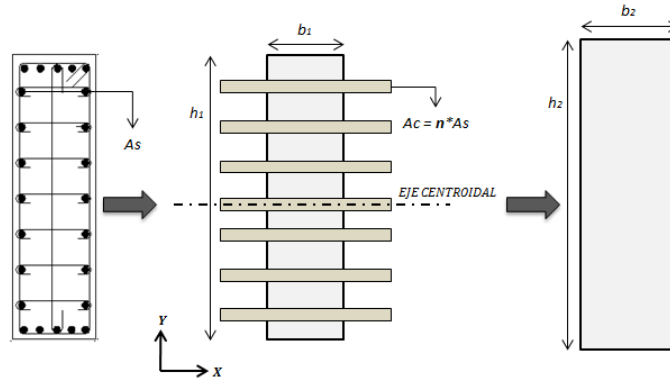


Figura No. 3. Modelo analítico para secciones de columnas en concreto reforzado.

OTRAS HIPÓTESIS

Para la modelación de las losas de entrepiso (*Figura No. 4*) se utilizaron elementos tipo *frame* representando las vigas de diversas secciones con las cuales se construyó el edificio, y nervios de sección 15x43 cm en promedio; todos estos dando soporte a una loseta superior tipo *Shell* de 7 cm de espesor. A cada losa se asignó un diafragma que permite conectar de forma rígida todas las uniones entre elementos estructurales sin afectar las deformaciones fuera del plano de la misma.

La estructura fue modelada sobre apoyos rígidos, bajo el supuesto de un empotramiento total en su base (sótano); por esta razón no se modelan las vigas de fundación existentes en la estructura. Adicionalmente, para las uniones viga-columna se consideró que la zona traslapada entre los elementos es completamente rígida.

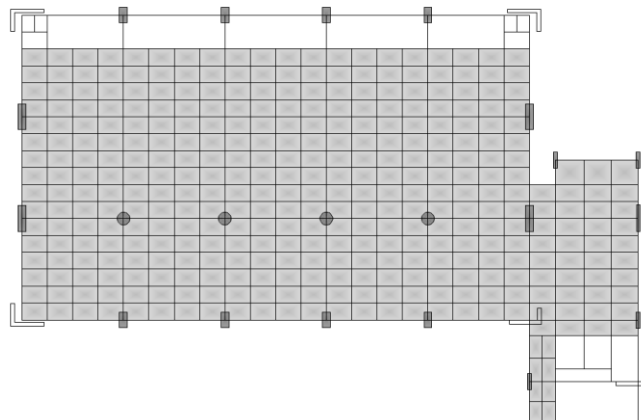


Figura No. 4. Modelación de Losa Típica.

PARÁMETROS MODALES ANALÍTICOS

Una vez modelada la estructura en estudio se realizó el análisis modal y se obtuvieron los parámetros dinámicos que se presentan en la *Tabla No. 2*.

Tabla No. 2. Frecuencias de vibración calculadas mediante el modelo teórico para la estructura en estudio.

Modo #	Periodo - s	Frecuencia - Hz	Frecuencia Circular - rad/s
1	1.18	0.85	5.32
2	0.88	1.14	7.14
3	0.80	1.25	7.85
4	0.35	2.86	17.95
5	0.26	3.85	24.17
6	0.22	4.55	28.56
7	0.16	6.25	39.27
8	0.13	7.69	48.33
9	0.12	8.33	52.36

La *Figura No. 5* muestra las formas modales teóricas asociadas a cada frecuencia de vibración identificada:

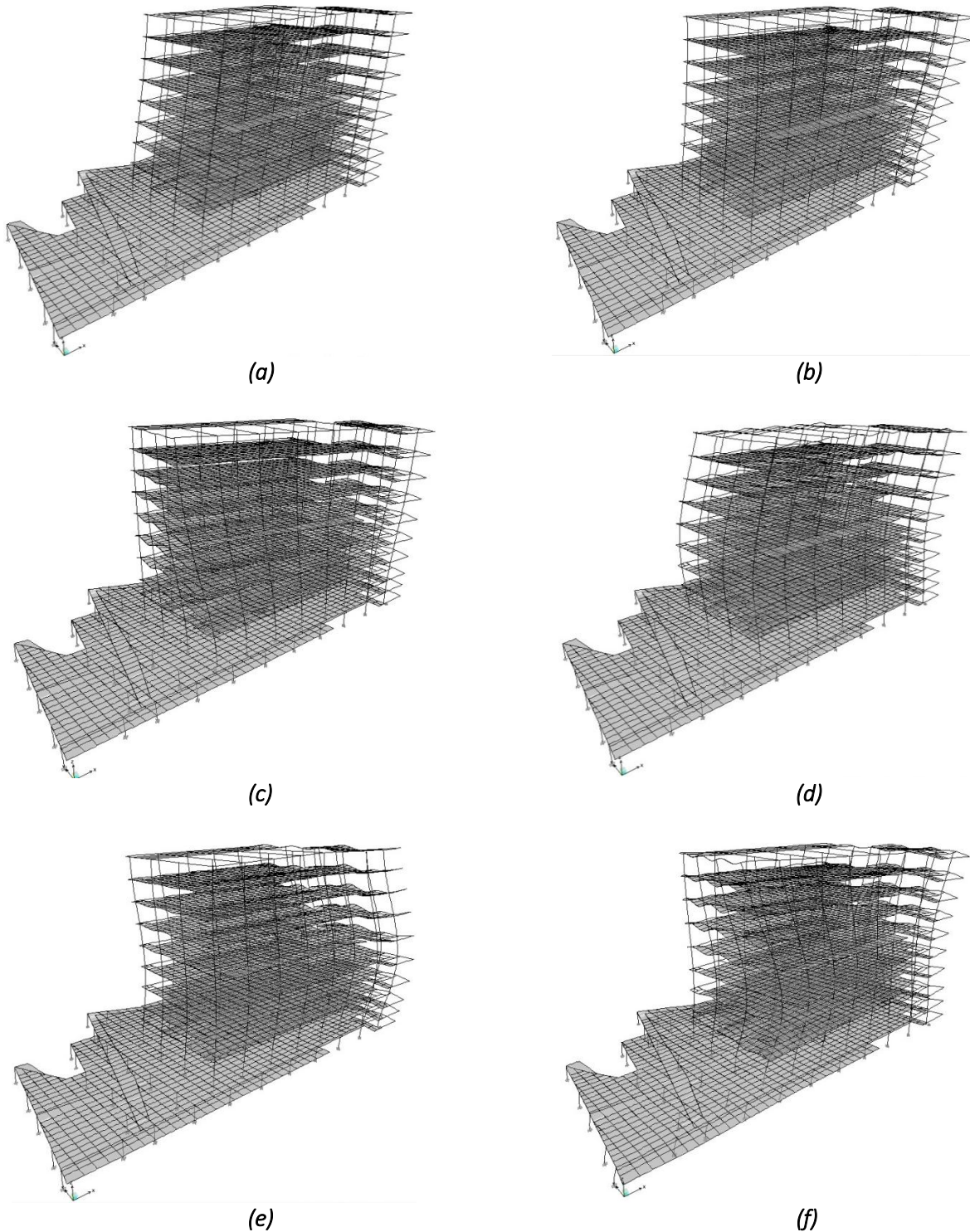


Figura No. 5. Primeros modos de vibración calculados mediante el modelo teórico: **(a)** Modo 1 [Dirección Longitudinal]; **(b)** Modo 2 [Dirección Transversal]; **(c)** Modo 3 [Torsional]; **(d)** Modo 4 [Dirección Longitudinal]; **(e)** Modo 5 [Dirección Transversal]; **(f)** Modo 6 [Torsional]

2. INSTRUMENTACIÓN

Este capítulo describe el procedimiento realizado para instrumentar el edificio de ingenierías; se presentan los equipos empleados, sus características, especificaciones y proceso de instalación; y los aspectos a tener en cuenta para la adquisición de los datos necesarios para la identificación de las propiedades dinámicas de la estructura.

EQUIPOS DE MEDICIÓN

GENERALIDADES

La instrumentación sísmica del edificio se realizó con equipos digitales de la marca CANTERBURY SEISMIC INSTRUMENTS (Nueva Zelanda). Los equipos empleados son los siguientes:

- ✓ 1 Registrador CUSP-Me [Figura No. 6(a)]: Almacena la información que llega de los sensores. Presenta una capacidad de recepción de hasta 16 canales de datos. Cada canal está diseñado para conectarse a un sensor que permite medir diferentes parámetros físicos y ambientales como aceleraciones, desplazamientos, temperatura, etc.
- ✓ 7 Acelerómetros Triaxiales CUSP-3 [Figura No. 6(b)].



(a)



(b)

Figura No. 6. Equipos utilizados para la instrumentación (a) Registrador CUSP-Me; (b) Acelerómetros CUSP-3.

El registrador principal funciona conectado permanentemente a una fuente de energía, y cuenta con una batería alterna de emergencia en caso de fallas en la corriente eléctrica; también contiene un GPS externo para la ubicación en tiempo y espacio de los datos registrados. La información llega al equipo por medio de micro-accelerómetros electro-mecánicos contenido cada uno en un sensor unificado y un circuito de adquisición de datos.

El proceso de toma de datos se realiza básicamente transmitiendo la información que registra el sensor interno en cada uno de los acelerómetros mediante un cable para redes de internet categoría superior a 6, hasta el registrador principal. Una vez los datos se encuentran allí, es posible visualizar en tiempo real las señales de aceleraciones en cada dirección de todos los canales en el visor de interface web del equipo.

ESPECIFICACIONES

Los sensores CUSP-3 empleados para instrumentar el edificio registran aceleraciones de hasta ± 3000 Gal, con una frecuencia de muestreo 200 datos por segundo, es decir, con un delta de tiempo de 0.005 segundos entre cada dato registrado. El rango de medición en frecuencia está definido por $f_{Nyquist}$, que depende de la resolución de muestreo. El valor de $f_{Nyquist}$ se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (3)$$

Donde

$$\Delta t = 0.005 \text{ s}$$

Así,

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2\Delta t} = 100 \text{ Hz} \quad (4)$$

Esto indica que el acelerómetro empleado para las mediciones puede registrar frecuencias entre 0 y 100 Hz.

ALMACENAMIENTO DE DATOS

Para el almacenamiento de los datos, el equipo ofrece dos modos de grabado:

1. Grabado por disparo. Permite configurar umbrales de disparo para cada sensor y así establecer valores de aceleración para los cuales el equipo debe comenzar a grabar la señal en caso de superarlos.
2. Grabado continuo. Graba continuamente las señales obtenidas de cada sensor en registros de 5, 10, 30 minutos; 1, 2 y 6 horas, según su configuración.

SISTEMAS DE DISPARO

Con el fin de controlar la captura de información de interés para el monitoreo de la estructura, el equipo cuenta con herramientas para activar los sensores automáticamente, según el nivel de aceleración y frecuencias que registra. Para ello se puede hacer uso de la configuración de disparos por niveles absolutos de aceleración, o por disparos de tipo STA/LTA, con la opción de emplear un filtro previo al grabado:

Filtrado Previo:

El equipo aplica filtros pasa baja, pasa alta, o una combinación entre ellas establecidos por el usuario con el cual se determina cuando se debe grabar la señal. Así, para el caso de monitoreo sísmico, es posible pre-filtrar la señal con un filtro pasa baja, para que el equipo inicie el grabado si las frecuencias que encuentre en el registro no superan el valor establecido por el filtro; evitando así almacenar registros con grandes aceleraciones debidas a las altas frecuencias generadas por el ruido ambiental.

Las opciones de filtrado previo definidas para el equipo son:

- ✓ 0.1 Hz → Pasa alta.

- ✓ 1 Hz → Pasa alta.
- ✓ 5 Hz → Pasa baja.
- ✓ 10 Hz → Pasa baja.
- ✓ 0.1 – 5 Hz → Pasa banda.
- ✓ 0.1 – 10 Hz → Pasa banda.
- ✓ 1 – 5 Hz → Pasa banda.
- ✓ 1 – 10 Hz → Pasa banda.

Disparos de Niveles Absolutos:

Esta configuración corresponde a la opción más básica de disparo; utiliza un umbral de disparo absoluto establecido por el usuario, que puede variar de 0.1 Gal a 3000 Gal, para compararlo con el valor máximo que calcula internamente para la señal registrada y filtrada en cada canal. Es importante tener en cuenta que al llevar a cabo esta comparación, el equipo determina la aceleración máxima sin eliminar el desfase que tenga la señal en el momento. Así, si el umbral de disparo absoluto es bajo y la señal presenta un desfase mayor a dicho umbral en alguna de sus componentes, el equipo disparará hasta que se remueva este desfase de la señal.

$$\text{Disparar si: } |\text{Dato filtrado}_n| > \text{Umbral preestablecido} \quad (5)$$

Este modo de disparo permite establecer un umbral diferente para cada canal, y configurarse para funcionar en cada uno individualmente (con la opción & entre canales) o combinándolos de forma simultánea (con la opción OR entre canales).

Disparos Tipo STA/LTA:

Este sistema es una herramienta útil para ajustar la sensibilidad del disparo a las condiciones ambientales locales, calculando la relación entre la aceleración promedio en periodo de tiempo corto STA y la aceleración promedio en periodo de tiempo largo LTA. Así, si el valor de la aceleración cambia constantemente con el nivel de ruido en la estructura, pero la relación que establece el umbral se mantendrá constante en condiciones de vibración ambiental. Este valor aumentará cuando se encuentre un evento que genere un impulso de aceleración en un periodo de tiempo muy corto en comparación con el periodo de tiempo largo.

Los valores promedios y la relación para establecer el umbral de disparo se calculan con las Ecuaciones (49) a (49):

$$STA_n = STA_{n-1} + \frac{|\text{Dato filtrado}_n| - STA_{n-1}}{\text{Periodo STA}} \quad (6)$$

$$LTA_n = LTA_{n-1} + \frac{|\text{Dato filtrado}_n| - LTA_{n-1}}{\text{Periodo LTA}} \quad (7)$$

$$\text{Disparar si: } \frac{STA_n}{LTA_n} > \text{Umbral pre - establecido} \quad (8)$$

y pueden variar de 1.1:1 a 200:1 ¹.

DISPOSICIÓN DE INSTRUMENTOS

El proceso de instrumentación de una estructura se basa principalmente en la disposición de la red de sensores para el registro de los movimientos y vibraciones; empleando este arreglo instrumental es posible controlar el tipo de información a adquirir acerca del comportamiento dinámico de la estructura, ya que previo a la instalación de equipos se seleccionan puntos estratégicos de los cuales se pueden encontrar movimientos importantes del edificio a nivel modal. El objetivo es encontrar una configuración para los acelerómetros que permita extraer de las señales de vibración la mayor cantidad de información acerca de las formas modales de la estructura.

Teniendo en cuenta que el análisis dinámico de un edificio parte del supuesto de un sistema de varios grados de libertad, representados cada uno por una masa y una rigidez, donde la masa concentrada de cada uno corresponde a las losas de entrepiso consideradas como diafragmas rígidos, se podría suponer también que el monitorear cada uno de estos grados de libertad permite obtener las formas modales de la estructura, registrando los movimientos de cada uno de ellos. Por consiguiente la tendencia en instrumentación de edificios es la colocación de equipos de medición en los puntos representativos de masas concentradas que definen las formas modales del sistema analizado, como pueden ser las losas de entrepiso, teniendo en cuenta que las señales registradas por cada sensor deben ser representativas de los movimientos de traslación de la estructura, por lo que es apropiado ubicarlos sobre elementos que constituyan la mayor parte de la rigidez ante movimientos de traslación del edificio, por ejemplo cerca de las uniones viga-columna, que contienen una rigidez importante.

Sin embargo, para adquirir un paquete de datos de buena calidad que facilite el análisis de varios puntos estratégicos del edificio de ingenierías en particular, sería necesario contar con demasiados instrumentos de medición en una misma prueba; además estos deberían ser instalados en la estructura de forma permanente. Por esta razón, cuando no es posible monitorear todos los puntos estratégicos en el mismo instante, es común que se utilice más de una configuración de distribución de equipos para obtener la información deseada.

También es necesario tener en cuenta el tipo de instrumento que se posee para las mediciones; en este proyecto se trabajó con acelerómetros de tipo triaxial, los cuales permiten medir movimientos en las tres direcciones en un mismo sensor. Esto permite tener variadas herramientas para depurar los datos obtenidos.

En el proceso de instrumentación del edificio de ingenierías, para cual se cuenta con un total de siete sensores triaxiales de aceleración, se emplearon las siguientes configuraciones:

CONFIGURACIÓN No. 1

Esta disposición de sensores es aplicable a pruebas de vibración ambiental y para instrumentación sísmica permanente. Consiste en medir al menos dos puntos en un mismo nivel, con el fin de captar información de posibles movimientos de torsión en la estructura. Realizando un modelo analítico en el programa ETABS (CSI), se pueden obtener valores aproximados del comportamiento dinámico de la estructura, y así mismo una aproximación de los resultados que se esperarían encontrar para este edificio. Si bien el primer modo de traslación [Figura No. 7(a)] indica que todas las amplitudes tienen el mismo signo haciendo posible ubicar los

¹ Indica una relación STA/LTA de 1.1/1.0 a 200.0/1.0.

instrumentos en niveles arbitrarios para encontrar una forma modal aproximada; se debe tener precaución con el segundo modo para lograr identificar las amplitudes con signos diferentes, como se muestra en la *Figura No. 7(b)*, donde se observa que las amplitudes máximas de la curva se encuentran en la cubierta y el nivel 5, con signos opuestos. Con la ayuda de estos puntos estratégicos, los sensores fueron distribuidos en dos parejas (Losas 5 y 9) y un trío (Base); encontrando la ubicación adecuada para captar información hasta de una segunda forma modal en cada dirección con la cantidad mínima de sensores, como se muestra en la *Figura No. 8*.

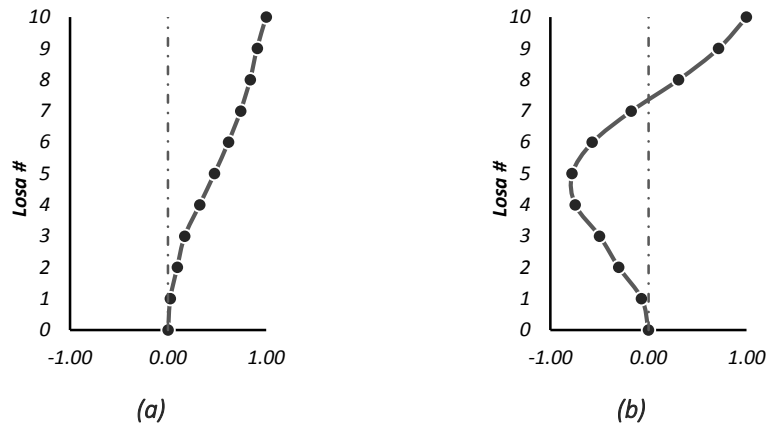


Figura No. 7. Formas modales para la estructura modelada (a) Primer modo de traslación; (b) Segundo modo de traslación.

CONFIGURACIÓN No. 2

Esta disposición de equipos de medición se adopta solamente para pruebas de vibración ambiental, ya que los sensores se ubican en un solo punto por nivel con el fin de obtener la información de siete pisos en una misma prueba (*Figura No. 9*) y así validar las formas modales obtenidas con la primera configuración e identificar en lo posible hasta el modo asociado una tercera frecuencia.

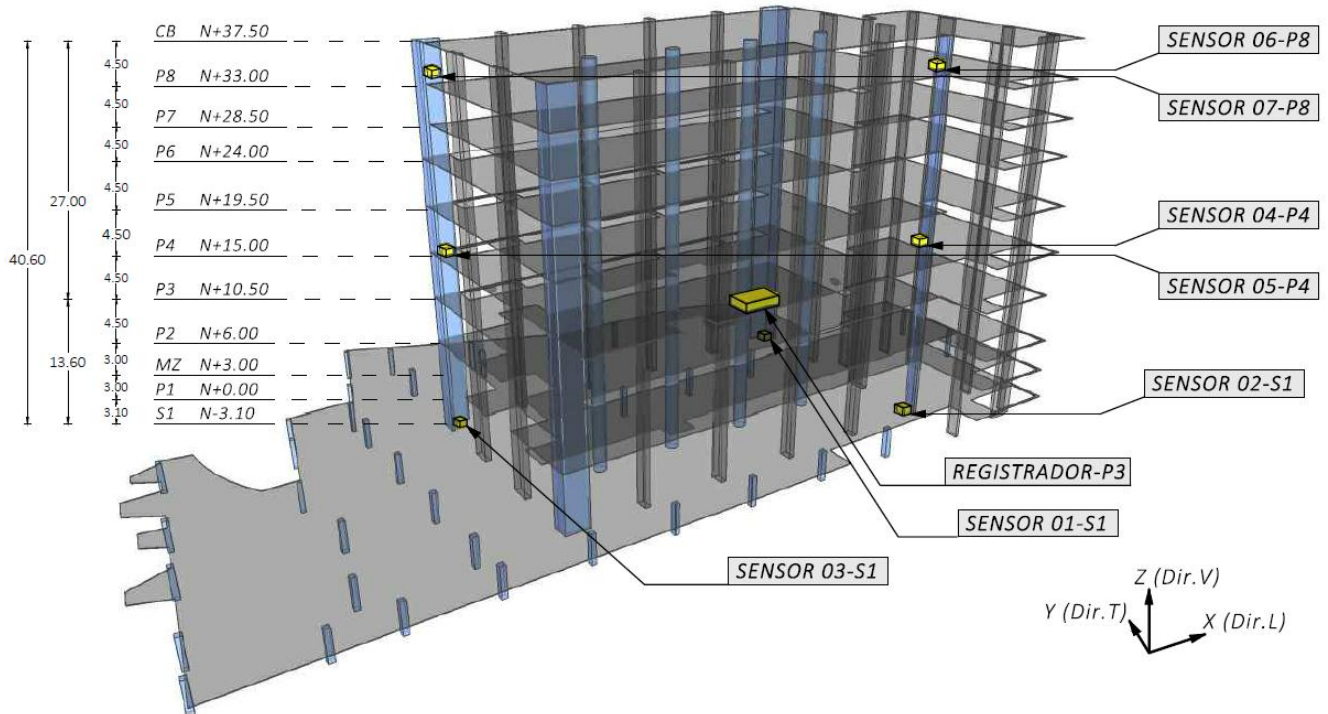


Figura No. 8. Configuración instrumental No. 1 adoptada para instrumentación permanente y pruebas de vibración ambiental.

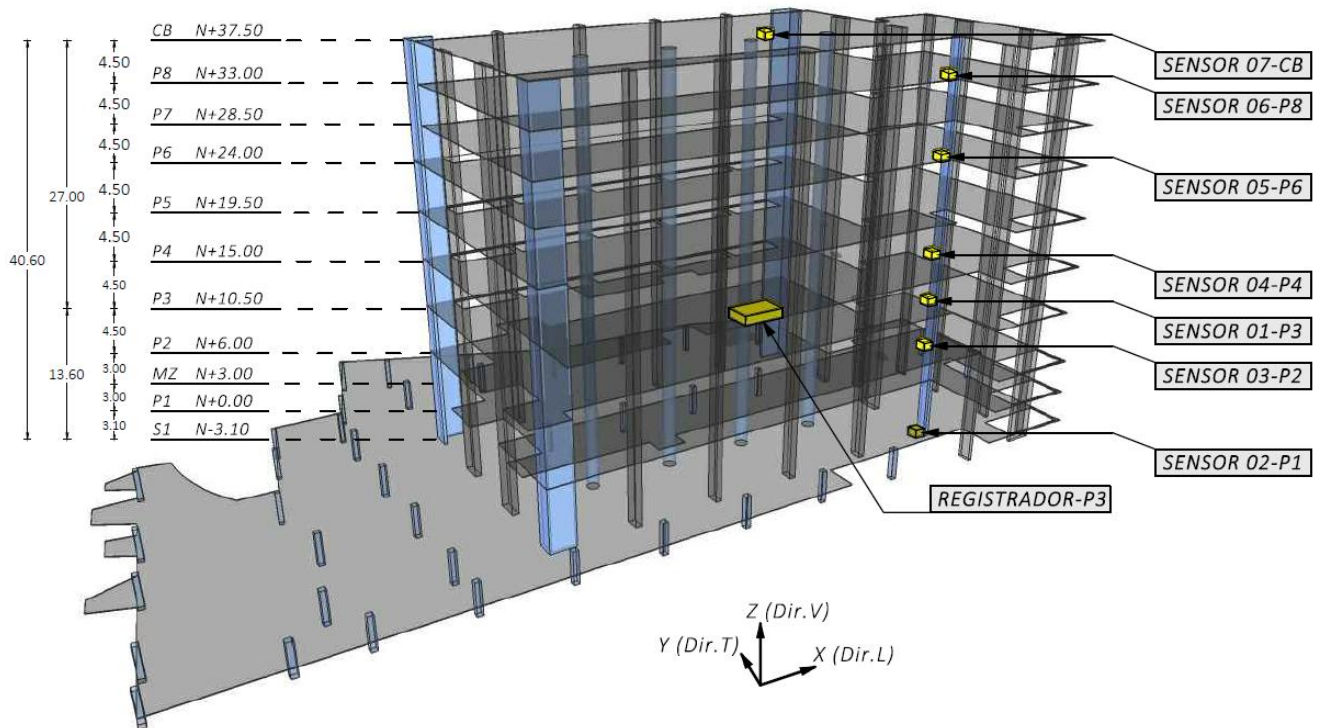


Figura No. 9. Configuración instrumental No. 2 adoptada para pruebas de vibración ambiental.

La *Tabla No. 3* resume la posición de los sensores en los diferentes niveles de la estructura según la configuración adoptada para cada prueba:

Tabla No. 3. Nomenclatura de acelerómetros según la disposición instrumental adoptada.

Nivel	Piso	Sensor (Conf. No.1)	Sensor (Conf. No.2)
10	CB	-	07
9	P8	06, 07	06
8	P7	-	-
7	P6	-	05
6	P5	-	-
5	P4	-	04
4	P3	04, 05	01
3	P2	-	03
2	MZ	-	-
1	P1	-	-
0	S1	01, 02, 03	02

INSTALACIÓN DE EQUIPOS

En el proceso de instalación de los equipos se deben tener en cuenta algunos aspectos que permiten obtener información de buena calidad para el análisis. El primer punto a considerar es que las señales registradas por cada sensor deben ser representativas de los movimientos en los grados de libertad de la estructura, por lo que es apropiado ubicarlos sobre las losas que han sido consideradas como masas concentradas y en los puntos extremos donde se esperan mayores deformaciones de los pórticos de la estructura, como se mostró en las *Figura No. 8* y *Figura No. 9*. Además, es conveniente instalarlos en lugares protegidos de los factores ambientales y de fácil acceso para la inspección técnica. Los acelerómetros del bloque de ingenierías se instalaron dentro de los buitrones que conforman en planta estos puntos extremos de la estructura, conformados por las pantallas estructurales en forma de L, como se muestra en la *Figura No. 10*:

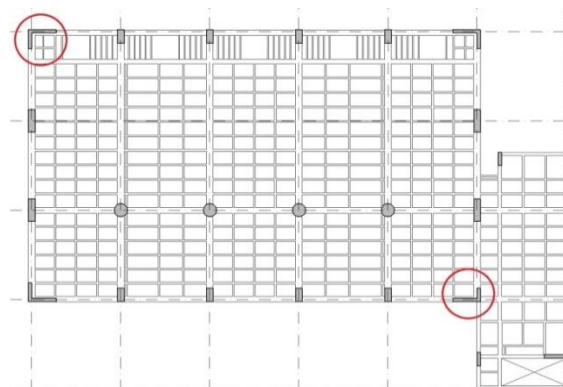


Figura No. 10. Puntos estructurales seleccionados para la instalación de los sensores de movimiento en los niveles a instrumentar.

En la *Figura No. 11* se muestra el procedimiento de colocación de las placas sobre las cuales se instalan los sensores en la estructura. El material de adherencia de estas placas debe garantizar que se encuentren completamente sujetas a los elementos estructurales para que el registro sea representativo de las vibraciones del edificio, y en lo posible nivelarlas con los ejes de medición con el fin de evitar desfases o inclinaciones en las señales.

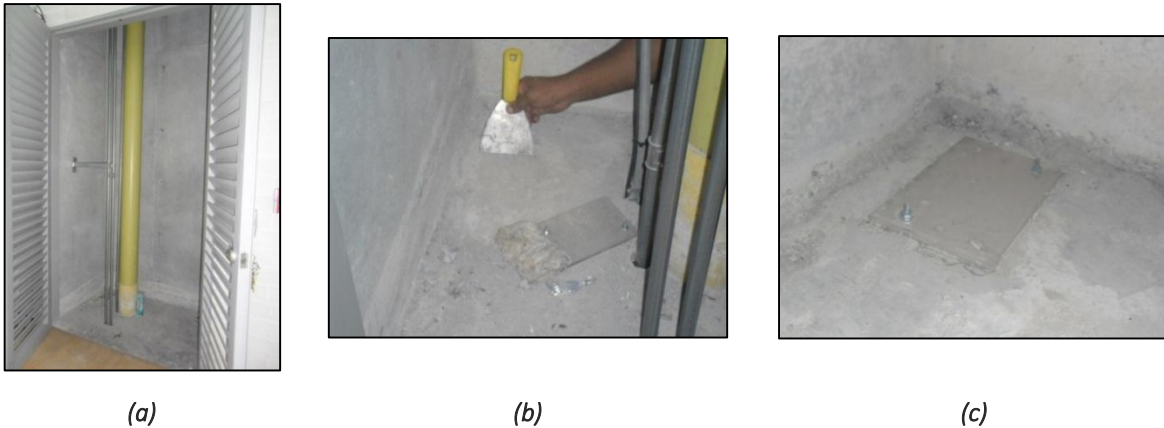


Figura No. 11. Instalación de placas de soporte para los sensores dentro de buitrones del edificio.

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RUIDO

En el proceso de monitoreo de la estructura es importante identificar las desviaciones que presentan los instrumentos y los factores que dan lugar a ellas. Las señales de vibración registradas por los acelerómetros pueden ser alteradas, por ejemplo, por los cambios de temperatura. Los sensores *Canterbury Seismic Instruments* son calibrados durante su fabricación a una temperatura de 20°C; por lo que las variaciones en este parámetro ambiental pueden resultar en un desfase de la señal. También pueden ocurrir inclinaciones del equipo al momento de su instalación. Estas inclinaciones inducen un componente gravitacional el cual es adicionado a las aceleraciones registradas generando un desfase en la señal, como se muestra en la *Figura No. 12*.

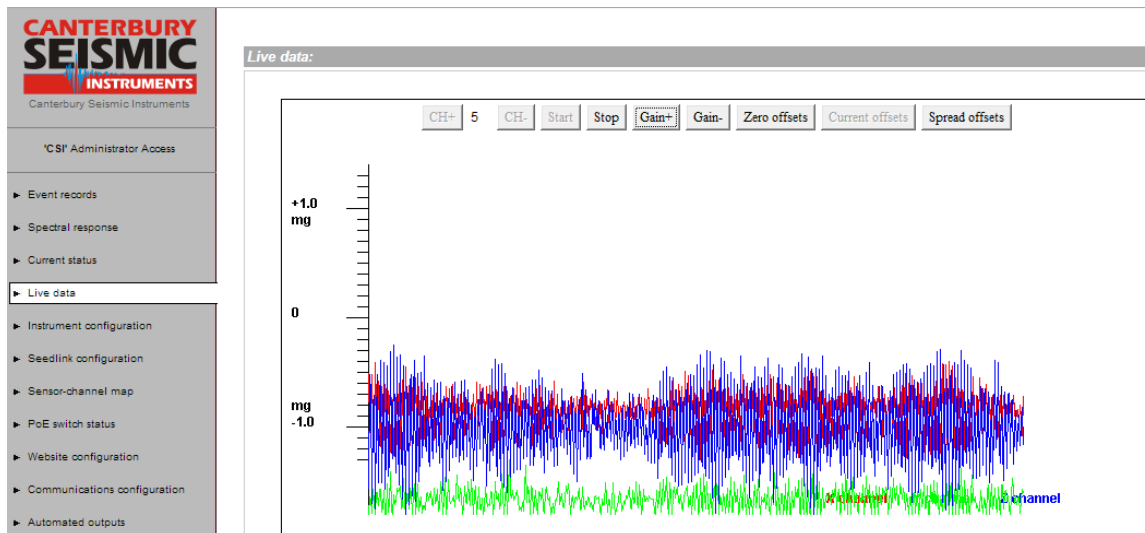


Figura No. 12. Señales desfasadas debido a los cambios de temperatura.

En el caso particular del edificio de ingenierías, dado que los cambios en la temperatura local son mínimos, las variaciones de la señal con respecto a la línea de zeros obedecen a dichas inclinaciones en los acelerómetros.

Cuando se trata de eventos sísmicos el desfase en la señal no representa un factor que altere los resultados significativamente ya que se manejan grandes amplitudes. Para pruebas de vibración ambiental el desfase es importante y debe corregirse. Para ello se debe eliminar este valor promedio al momento de procesar las señales empleando los filtros de frecuencias y ajuste de línea base. Los equipos de la marca Canterbury Seismic Instruments permiten hacer una corrección directa sobre los sensores desde la interface en línea: elimina el desfase que ha calculado como el promedio de las aceleraciones registradas durante el minuto inmediatamente anterior. Sin embargo, es apropiado calcular los desfases promedio de la señal para conocer los niveles normales de aceleración que puede llegar a reportar la señal y que no indiquen necesariamente aceleraciones en la estructura.

Los equipos utilizados en este proyecto ofrecen herramientas para aplicar a las señales registradas por los acelerómetros como la corrección de desfase y filtrado de frecuencias, con el fin de facilitar la caracterización de los datos y así establecer condiciones para el almacenamiento de la información; tales procedimientos no se aplican a los registros almacenados.

A continuación se presenta el gráfico aproximado del comportamiento de valores máximos de desfases (Figura No. 13) presentes en los registros diarios tomados durante un periodo de tres semanas, en las que se hicieron mediciones cada cuatro o cinco horas en el día. Se muestran dos de los siete sensores, el sensor 01 en la base y el sensor 07 en la cubierta. Es posible observar en el gráfico los cambios en niveles máximos de desfase del orden de 0.5 a 1.0 Gal, lo que demuestra que los pequeños cambios de temperatura local ambiental no afectan de manera significativa los registros.

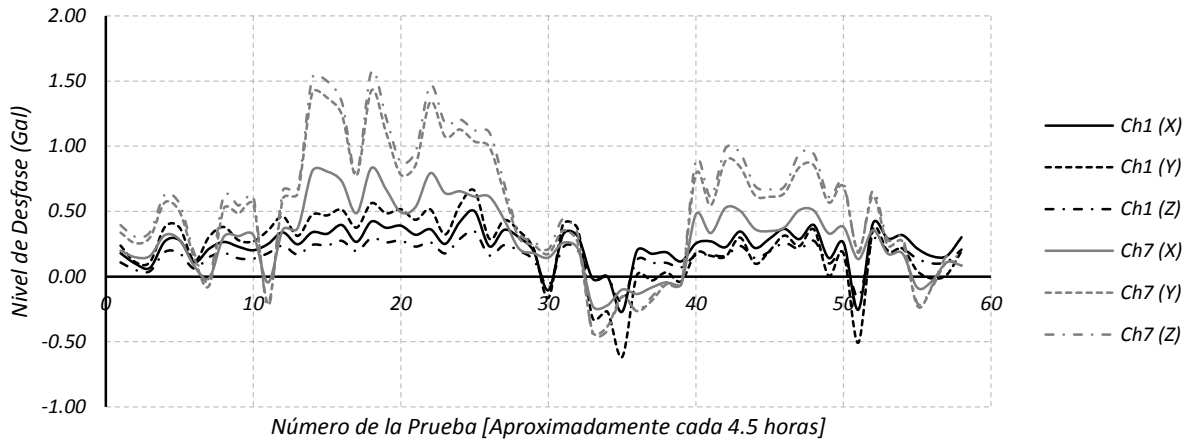


Figura No. 13. Variación en el tiempo de los desfases máximos de la señal calculados para muestras de dos minutos cada cuatro a cinco horas.

Estas muestras también se emplearon para identificar los niveles de ruido máximos en la estructura debido a las condiciones ambientales del lugar y tipo de uso del edificio. El periodo en el cual se tomaron las pruebas es característico de una actividad académica normal, dentro de lo que se puede mencionar el uso frecuente de los laboratorios de ingenierías, de las aulas existentes en este bloque; la ocupación diaria de personal administrativo; el funcionamiento de los laboratorios como servicios de la universidad, etc. También se presentan agentes generadores de ruido ambiental cercanos a la estructura como el metro, el río, y el flujo vehicular en la autopista sur y la avenida Las Vegas.

En la *Figura No. 14* se muestra la variación del ruido máximo registrado en la estructura a lo largo de un seguimiento de 3 semanas y el ruido promedio calculado:

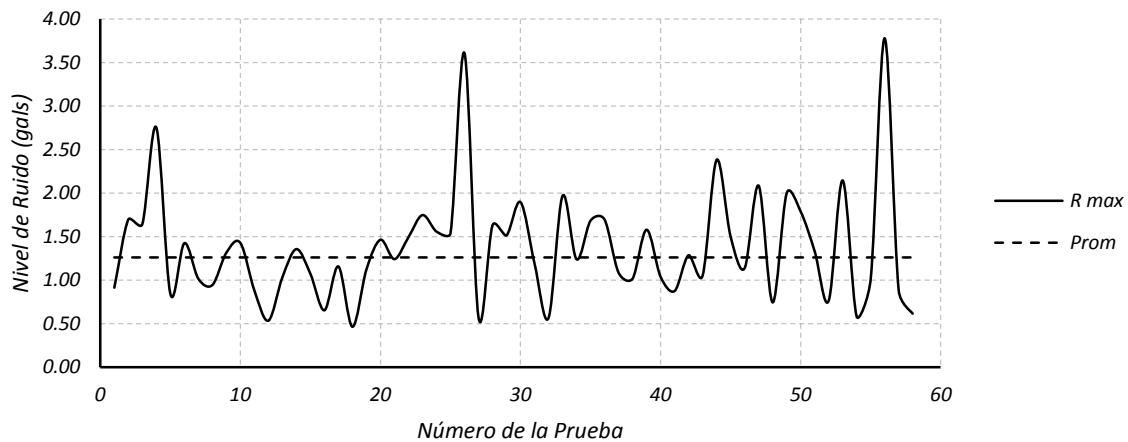


Figura No. 14. Variación en el tiempo del ruido máximo registrado en la estructura durante tres semanas.

El ruido máximo encontrado durante el periodo de muestro fue de 3.78 Gal, de los cuales -0.03 Gal corresponden al desfase en el sensor en ese instante, con lo cual se obtiene 3.81 Gal de ruido ambiental. Los tres picos que se

presentan en el gráfico [2.75, 3.61 y 3.78 Gal] se registraron en horas del día donde la estructura puede presentar altos niveles de vibración (04:30 pm, 05:00 pm y 11:00 am), ya que están dentro del horario laboral y estudiantil. Se puede decir entonces que el ruido ambiental promedio en el edificio es aproximadamente 1.30 Gal.

Si se observan los tramos del gráfico donde se presentan los valores mínimos de ruido, se encuentra que éstos corresponden a las muestras tomadas los fines de semana cuando el ruido debería disminuir dada la ausencia de actividad laboral y académica; es el caso del tramo de la curva entre las pruebas 10 y 20 tomadas entre los días 11 (Sábado) y 12 (Domingo) de Mayo de 2013.

Umbrales de Disparo

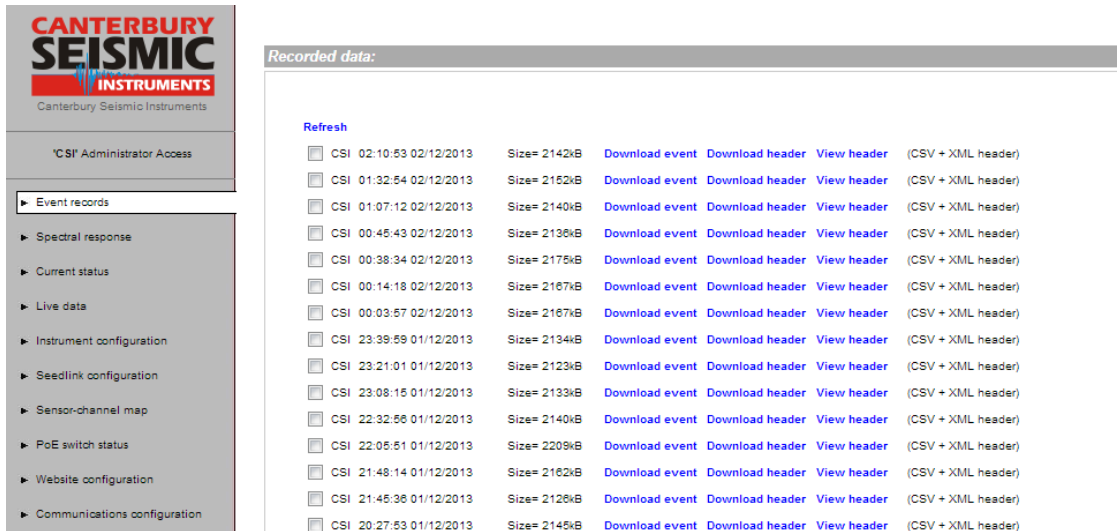
Si bien el nivel promedio de ruido ambiental en el edificio es del orden de 1.30 Gal, se establecieron inicialmente umbrales de disparo absoluto superiores a este valor. Sin embargo, se presentaron situaciones en las que ocurrieron eventos sísmicos de magnitudes importantes ($M_w \geq 4.0$) que se esperaba registrar en el edificio y no fueron captados por el sistema, lo que hizo necesario ajustar los umbrales de disparo a valores de aceleración muy pequeños (0.1 Gal en sensores de primer nivel y 0.5 Gal para sensores en los niveles superiores) con el fin de aumentar la sensibilidad del equipo con respecto a los movimientos fuertes con frecuencias representativas entre 0.1 y 5.0 Hz, identificadas por el sistema mediante el uso de filtros pasa banda (ver sección *equipos de medición*). No obstante, dado el nuevo nivel de sensibilidad del equipo, se registró mucha información innecesaria que fue almacenada debido al disparo de los umbrales de la red por el alto ruido ambiental y que en su mayoría habría que eliminar; por lo que finalmente se establecieron los valores de **0.5 Gal** aplicando un filtro de disparo *pasa-banda* de 0.1 Hz a 5.0 Hz para los sensores 01, 02, 03; y **1.0 Gal** con el mismo filtro para los sensores 04, 05, 06 y 07.

MONITOREO DE LA ESTRUCTURA

El monitoreo de una estructura debe hacerse de manera constante llevando un control diario de los eventos sísmicos registrados por los acelerómetros de la red de instrumentación. Para el caso particular en estudio, se realizó un monitoreo permanente de los registros captados por la red acelerográfica de la estructura, con el apoyo de la RSNC (Red Sismológica Nacional de Colombia) operada por el Servicio Geológico Colombiano y encargada de dar alerta temprana a la ocurrencia de eventos sísmicos en el territorio nacional, además de publicar en línea los últimos eventos ocurridos y registrados por la red. De esta manera fue posible identificar los registros en el equipo que correspondían a movimientos fuertes reportados por la RSNC, y así descartar registros de otro tipo de movimientos que pudieran disparar los umbrales establecidos.

ADQUISICIÓN DE DATOS

Las señales registradas por el equipo, sea bien programadas como pruebas de vibración ambiental o grabadas por actividad sísmica luego de presentarse aceleraciones que superan los umbrales de disparo, son almacenadas en el sitio web del equipo en archivos comprimidos (*Figura No. 15*). Posteriormente se pueden descargar a un computador y manipularlas en programas de cómputo comerciales, ya que se presentan en archivos tipo .csv, que pueden ser leídos por programas convencionales.



The screenshot displays the 'Recorded data' section of the Canterbury Seismic Instruments web interface. On the left is a navigation menu with options like 'Event records', 'Spectral response', 'Current status', 'Live data', 'Instrument configuration', 'Seedlink configuration', 'Sensor-channel map', 'PoE switch status', 'Website configuration', and 'Communications configuration'. The main area shows a table of recorded data with columns for file name, size, and actions (Download event, Download header, View header). A 'Refresh' button is located above the table.

File Name	Size	Download event	Download header	View header	Format
CSI 02:10:53 02/12/2013	Size= 2142kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 01:32:54 02/12/2013	Size= 2152kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 01:07:12 02/12/2013	Size= 2140kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 00:45:43 02/12/2013	Size= 2136kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 00:38:34 02/12/2013	Size= 2175kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 00:14:18 02/12/2013	Size= 2167kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 00:03:57 02/12/2013	Size= 2167kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 23:39:59 01/12/2013	Size= 2134kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 23:21:01 01/12/2013	Size= 2123kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 23:08:15 01/12/2013	Size= 2133kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 22:32:56 01/12/2013	Size= 2140kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 22:05:51 01/12/2013	Size= 2209kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 21:48:14 01/12/2013	Size= 2162kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 21:45:36 01/12/2013	Size= 2126kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)
CSI 20:27:53 01/12/2013	Size= 2145kB	Download event	Download header	View header	(CSV + XML header)

Figura No. 15. Almacenamiento de señales registradas por el equipo.

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Este capítulo trata de la metodología empleada para la interpretación y análisis de señales producidas por vibraciones. Se describe el tipo de fenómeno físico en que se basa la metodología, sus fundamentos teóricos, las herramientas de análisis disponibles y los procedimientos a realizar previos a un análisis espectral; así como las técnicas adoptadas para la identificación de los parámetros dinámicos a partir de los registros de aceleración obtenidos de las mediciones al edificio en estudio.

IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

En la práctica investigativa se entiende por identificación de sistemas el procedimiento por el cual se estiman las propiedades de un sistema, bajo ciertas condiciones, a partir de datos de la respuesta dinámica medida experimentalmente, asumiendo que en él existe una relación lineal entre la entrada y cada medición de salida dada por parámetros constantes, y que cualquier desviación de origen desconocido en este caso idealizado, se atribuye a componentes de ruido externo no correlacionado en las señales registradas (*Bendat & Piersol, 1993*). En sistemas de interés en ingeniería como son las estructuras de edificios, puentes, puertos, etc; se hace verdaderamente compleja la simulación de fenómenos que exciten dichos sistemas al punto de producir una respuesta medible. Es por esto que se deducen las propiedades fundamentales de estas estructuras a partir de un análisis adecuado de datos de respuesta únicamente; apoyándose en la hipótesis que ellas representan el comportamiento del sistema ante vibraciones naturales de tipo aleatorio.

Existen diferentes rutinas para el desarrollo del análisis asociadas a la clasificación de la estructura según la cantidad de señales de entrada y salida del sistema a analizar: el edificio de ingenierías se clasificó como un sistema *Single Input-Single Output* (Única Entrada-Única Salida), dado que para cada punto de medición se tiene una entrada representada por vibraciones ambientales debido al uso de la estructura y las condiciones de ruido cultural presentes en el momento de las pruebas experimentales; y una señal de salida con datos de aceleraciones producidas por la vibración de entrada.

Con respecto a la metodología para el estudio del comportamiento de estos sistemas dinámicos, se puede decir que se cuenta principalmente con dos técnicas: *paramétricas* y *no paramétricas*. Las *técnicas paramétricas* se basan esencialmente en la estimación de las propiedades estructurales necesarias para producir una óptima correlación entre respuestas medidas experimentalmente y calculadas por medio de métodos analíticos; y las *técnicas no paramétricas* consisten en identificar las frecuencias del sistema utilizando funciones en el dominio de la frecuencia, y a partir de ellas se determinan los diferentes parámetros modales asociados a cada una. Para el análisis de la respuesta dinámica de la estructura en estudio a partir de los datos experimentales obtenidos de las pruebas de vibración ambiental, se emplearon técnicas de identificación no paramétricas que requieren de un procedimiento en el cual es necesario aplicar los conceptos que se presentan a continuación.

PROCESOS ESTOCÁSTICOS

Al hablar de vibraciones es necesario mencionar a qué tipo de fenómeno se hace referencia con el fin de establecer la metodología de análisis aplicable a su comportamiento. Ante la ausencia de fuerzas de excitación de carácter sísmico, la mayoría de mediciones tomadas en este tipo de estructuras corresponden a señales de

aceleración producidas por vibraciones ambientales; estos movimientos obedecen a cambios en los parámetros de tipo cultural como son la circulación constante de personas en el edificio, el flujo vehicular en las vías principales aledañas, el funcionamiento permanente de maquinaria mecánica de los laboratorios; y de tipo ambiental como el viento, la temperatura, las precipitaciones, etc. Este fenómeno físico representa un comportamiento de tipo *aleatorio o estocástico*; el cual no es posible predecir en detalle y dentro de márgenes de error razonables, ya que cada prueba produce un registro de historia en el tiempo que no se repite (*Bendat & Piersol, 1993*). Adicionalmente, para aplicar la metodología de análisis espectral empleada en este trabajo, se supone que el comportamiento de las señales es *estacionario*, en el que los valores promedio de cada conjunto² que define el proceso aleatorio permanecen constantes en el tiempo. Para datos estacionarios, el *teorema ergódico* establece que las propiedades calculadas de los promedios para registros individuales del conjunto deben ser iguales a las calculadas del promedio del conjunto de registros en cualquier instante de tiempo t (*Bendat & Piersol, 1993*). Por lo tanto, para efectos de análisis, se considera que las señales de aceleración en el tiempo debidas a las vibraciones ambientales representan un proceso aleatorio, estacionario y ergódico.

FUNCIONES DE CORRELACIÓN Y ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Dada una señal de entrada aleatoria en el tiempo $x(t)$ que es aplicada en un sistema físico, produce una señal de respuesta $y(t)$ que contiene información tanto de la entrada aplicada, como de los efectos de las propiedades del sistema perturbado. En el caso de pruebas de vibración ambiental, dentro de esta señal de respuesta se encontrará también el ruido producido por las condiciones ambientales propias del programa experimental. La metodología empleada en este trabajo propone evaluar mediante procedimientos probabilísticos el grado de dependencia lineal entre las dos variables mencionadas, que en el caso particular representan la vibración ambiental $x(t)$ y la respuesta de la estructura ante este movimiento $y(t)$; con el fin de obtener una función que represente la correlación existente entre ellas. Esta propiedad estadística usualmente se da en términos de productos promedio del registro; éstos definen los coeficientes de correlación [*Ecuación (9)*], que más adelante indicarán la fracción de la varianza de la señal de respuesta que puede ser atribuida a los efectos lineales de la señal de entrada (*Bendat & Piersol, 1993*).

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (9)$$

Donde σ_{xy} es la covarianza entre x y y , y σ es la media del registro analizado.

La función de correlación que representa el comportamiento de la relación de dependencia entre las variables $x(t)$ y $y(t)$ está dada por:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt \quad (10)$$

Donde τ representa el retardo en el tiempo entre ambas señales.

En el caso en que $x(t)$ y $y(t)$ son iguales, se obtiene la función de autocorrelación y se expresa así:

² Recopilación de registros de historias en el tiempo que define un proceso aleatorio

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt \quad (11)$$

FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL

En la mayoría de aplicaciones en ingeniería utilizadas recientemente, es habitual analizar señales de tipo aleatorio en términos de frecuencias de vibración representativas del sistema, por lo que se emplean funciones espectrales en el dominio de la frecuencia para el manejo de los datos, que contienen la misma información que los espectros obtenidos de señales en función del tiempo, pero facilitan el análisis desde el punto de vista de los problemas que se presentan en el campo de la ingeniería estructural.

Las funciones de densidad espectral indican el nivel de energía o potencia disipada entre las dos señales $x(t)$ y $y(t)$ en determinada frecuencia; se determina a partir de la transformada de Fourier de la función de correlación entre ellas. Cuando $x(t)$ es diferente de $y(t)$, la función de densidad espectral recibe el nombre de espectro cruzado de potencia, y se calcula así:

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

En caso contrario, la función se denomina autoespectro o espectro de potencia de $x(t)$ y se calcula con la siguiente expresión:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (13)$$

Además, con el fin de presentar sólo frecuencias positivas, sus correspondientes equivalencias en términos de *espectros unilaterales* son:

$$G_{xy}(f) = 2 \cdot S_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad f > 0 \quad (14)$$

$$G_{xx}(f) = 2 \cdot S_{xx}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad f > 0 \quad (15)$$

El espectro cruzado se puede presentar también en términos de su amplitud y ángulo de fase entre ambas señales así:

$$G_{xy}(f) = |G_{xy}|e^{-j\theta_{xy}(f)} \quad (16)$$

Donde,

$$|G_{xy}| = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)} \quad (17)$$

y,

$$\theta_{xy}(f) = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right] \quad (18)$$

$Q_{xy}(f)$ y $C_{xy}(f)$ representan las funciones *coincidente* (componente real) y *de cuadratura* (componente compleja) de la transformada de Fourier:

$$C_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \text{Cos}2\pi f\tau \, d\tau \quad (19)$$

$$Q_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \text{Sin}2\pi f\tau \, d\tau \quad (20)$$

Una segunda alternativa existente para desarrollar las funciones de densidad espectral es a partir de la transformación de Fourier aplicada directamente a los registros originales en el tiempo y posteriormente el empleo de las operaciones necesarias para calcular la densidad espectral (*Bendat & Piersol, 1993*):

$$X_k(f, T) = \int_0^T x_k(t) e^{-j2\pi fT} dt \quad (21)$$

$$Y_k(f, T) = \int_0^T y_k(t) e^{-j2\pi fT} dt \quad (22)$$

Donde el *k-ésimo* registro de longitud T representa cada prueba.

Espectro de Potencia:

El espectro de potencia o autoespectro de una variable aleatoria $x(t)$ está dado por la expresión:

$$G_{xx}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} E[|X_k(f, T)|^2] \quad f > 0 \quad (23)$$

El operador de valor esperado E denota una operación promedio sobre el índice k .

El autoespectro entrega los valores de las componentes del espectro de frecuencias de Fourier al cuadrado; de esta función se obtienen sólo sus magnitudes.

Espectro Cruzado de Potencia:

El espectro cruzado de potencia entre dos registros $\{x(t)\}$ y $\{y(t)\}$ será:

$$G_{xy}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} E[X_k^*(f, T)Y_k(f, T)] \quad f > 0 \quad (24)$$

Donde $X_k^*(f, T)$ representa la conjugada compleja de $X_k(f, T)$, expresando la transformada de Fourier en su forma compleja (Newland, 1993):

$$X_k(f) = A_k(f)\text{Cos}(ft) - iB_k(f)\text{Sen}(ft) \quad (25)$$

La función entrega información tanto de magnitud como de ángulo de fase entre las señales, además de brindar la posibilidad de identificar el retardo entre ellas τ . Si bien el espectro cruzado es el producto de dos magnitudes, se espera que su propia magnitud crezca con éstas, y así mismo que disminuya con valores pequeños del espectro, imprimiendo cierta sensibilidad en las frecuencias comunes a ambas señales.

La función fase entre los registros $\{x(t)\}$ y $\{y(t)\}$ representa el ángulo de desfase entre ambas variables; su signo indica si sus movimientos se encuentran en fase o son opuestos:

$$\theta_{xy} = \text{Tan}^{-1} \left| \frac{B_k(f)}{A_k(f)} \right| \quad (26)$$

Función de Coherencia:

La función de coherencia proporciona una medida de la similitud entre las señales de entrada y salida del sistema. Representa la consistencia de la señal de salida impuesta por la de entrada, y está dada por:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (27)$$

Donde,

$$0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1 \quad (28)$$

Funciones de Transferencia:

Un sistema físico ideal que se considere realizable, con parámetros constantes, estable, y lineal, posee propiedades dinámicas de interés en ingeniería que están representadas por la respuesta del sistema a una función de entrada. Dicha respuesta corresponde a la señal de entrada afectada por una función de transferencia $h(\tau)$ que ya contiene la información de las características propias del sistema. Desde el punto de vista de problemas aplicados, es común en la actualidad describir el sistema en términos de frecuencias a través de la transformada de Fourier de la función de transferencia, denominada función de respuesta en frecuencia:

$$H(f) = \int_0^{\infty} h(\tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (29)$$

Dada que proviene de una transformación de dominio del tiempo a la frecuencia, la función de respuesta contiene una parte real y una parte imaginaria,

$$H(f) = H_R(f) - jH_I(f) \quad (30)$$

Que se puede expresar en notación compleja polar así:

$$H(f) = |H(f)|e^{-j\varphi(f)} \quad (31)$$

Donde su magnitud $|H(f)|$ representa el factor de ganancia y $\varphi(f)$ representa el factor de fase:

$$|H(f)| = \sqrt{H_R^2(f) + H_I^2(f)} \quad (32)$$

$$\varphi(f) = \text{Tan}^{-1} \left[\frac{H_I(f)}{H_R(f)} \right] \quad (33)$$

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

Bajo la consideración de análisis que las señales aleatorias producidas por vibraciones ambientales representan un proceso estacionario ergódico, es posible evaluar las funciones de densidad espectral de un registro $\{x(t)\}$ a partir la subdivisión de las señales en segmentos continuos en el tiempo, cada uno de longitud T , sobre los cuales se calculan las diferentes cantidades espectrales y se promedian sus resultados con el fin de obtener espectros suavizados y facilitar el estudio de las relaciones lineales entre las variables (Bendat & Piersol, 1993):

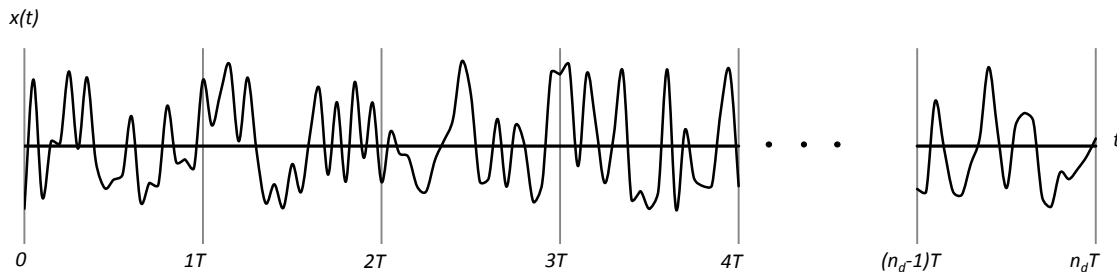


Figura No. 16. Subdivisión del registro original en segmentos continuos.

Dado un conjunto de n_d registros $x_k(t)$ de una señal $x(t)$, la función de densidad espectral o autoespectro se puede estimar con la expresión:

$$\hat{G}_{xx}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{k=1}^{n_d} |X_k(f, T)|^2 \quad (34)$$

Así mismo, para el análisis de dos registros $\{x(t)\}$ y $\{y(t)\}$, el espectro cruzado de potencia está dado por:

$$\hat{G}_{xy}(f) = \frac{2}{n_d T} \sum_{k=1}^{n_d} X_k^*(f, T) Y_k(f, T) \quad (35)$$

Obteniendo como resultado funciones en términos de componentes discretas de frecuencia separadas entre sí por la mínima resolución de frecuencia $B_e = 1/T$.

ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

El análisis de señales en el dominio del tiempo consiste en realizar un tratamiento a los registros para preparar los datos para el análisis espectral que se describe más adelante. Se presentan los procedimientos a realizar a las historias de aceleración en el tiempo:

Filtrado

Los filtros de frecuencia se aplican a las historias en el tiempo, que en este caso representan historias de aceleración; para eliminar rangos de frecuencia dentro de la señal que no corresponden a los sistemas analizados en el campo de la ingeniería civil. De esta manera se puede facilitar la identificación de las frecuencias de interés al momento del análisis espectral. El filtrado es necesario como tratamiento previo del registro, ya que de no hacerlo, se puede caer en errores estimativos durante el proceso de integración de la señal, generados por amplitudes ficticias. Sin embargo, al momento de filtrar se debe tener cuidado de no excluir frecuencias del sistema; que para efectos de análisis de estructuras como edificios, puentes, y demás obras de infraestructura civil, generalmente se encuentran entre 0.1 Hz y 20 Hz.

Para evitar el ruido en la señal ocasionado por la presencia de frecuencias bajas debidas a las condiciones instrumentales del equipo, se puede emplear un filtro *pasa-alta*, que sólo permite el paso de frecuencias mayores a un valor f_{min} definido. Análogamente, para remover el ruido ocasionado por la presencia de frecuencias altas debidas a las condiciones ambientales del entorno, se emplea un filtro *pasa-baja*, que permite el paso de frecuencias menores a un valor f_{max} definido; o disponiendo de ambas herramientas mediante filtros *pasa-banda* y *quita-banda*, que fijan un rango delimitado por f_{min} y f_{max} , que conserva las frecuencias dentro de esta ventana y elimina las demás por fuera de ella, o viceversa, respectivamente.

Existen básicamente cuatro tipos de filtro que son aplicables en el análisis realizado a las señales registradas en este trabajo:

- ✓ Filtro Pasa Baja: Permite el paso de bajas frecuencias y elimina las altas frecuencias.
- ✓ Filtro Pasa Alta: Permite el paso de altas frecuencias y elimina las bajas frecuencias.
- ✓ Filtro Pasa Banda: Permite el paso de frecuencias en un rango limitado, y elimina las frecuencias fuera del rango.

- ✓ Filtro Quita Banda: Elimina el paso de frecuencias en un rango limitado, y permite el paso de frecuencias fuera del rango.

Corrección de línea base y línea de tendencia

Como se presentó en el capítulo de instrumentación, las señales pueden presentar desfases con respecto a la línea de ceros debido a inclinaciones del equipo o a cambios en la temperatura del sistema. Estos valores adicionales de aceleración se deben eliminar de la señal empleando el procedimiento denominado *corrección de línea base* en el cual se calcula el valor promedio α de los datos del registro, y se resta a cada valor de aceleración a_i , obteniendo así la señal sobre la línea de ceros (Botero P., 2011):

$$a_{\text{corregido}} = a_i - \alpha \quad (36)$$

Donde,

$$\alpha = \sum_{i=1}^n a_i / n \quad (37)$$

Cuando se presentan componentes de frecuencias bajas en la señal con longitudes de onda mayores al tamaño del tramo de registro analizado, se imprime una tendencia en la historia de aceleraciones que puede removerse ajustando la señal a un polinomio de bajo orden derivado de un procedimiento de mínimos cuadrados. Las Ecuaciones (38) y (39) representan los coeficientes b_0 que denota el intercepto con el eje vertical y b_1 que denota la pendiente de una línea de regresión lineal cuyos valores deberán ser extraídos del registro original a_i para eliminar la tendencia:

$$b_0 = \frac{2(2N + 1) \sum_{n=1}^N u_n - 6 \sum_{n=1}^N nu_n}{N(N - 1)} \quad (38)$$

$$b_1 = \frac{12 \sum_{n=1}^N nu_n - 6(N + 1) \sum_{n=1}^N u_n}{\Delta t N(N - 1)(N + 1)} \quad (39)$$

Método de Ventanas

El procedimiento de estimación espectral a partir de tramos en tiempo de la señal original demanda un cuidado especial para cada uno de estos, con el fin de proporcionar un suavizado de la señal en la entrada y salida a cada uno de los segmentos a analizar. Para ello se utilizan ventanas de tiempo que se multiplican a la señal original para estrechar su amplitud en los extremos mencionados, evitando la fuga de energía en frecuencias cercanas a una frecuencia principal. Entre muchas ventanas desarrolladas para tal fin, la *ventana de Hanning* ha sido empleada comúnmente por sus recientes aplicaciones. Es una función que multiplica la señal en el tiempo y se emplea para evitar anomalías en el comportamiento de las amplitudes del espectro de Fourier por medio del uso de una función coseno (Bendat & Piersol, 1993):

$$w_h(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi t}{T} \right) \right] \quad (40)$$

Para $0 \leq t \leq T$.

La Figura No. 17 muestra a manera de ejemplo la ventana de Hanning que se debe aplicar a una señal con un periodo de 60 s:

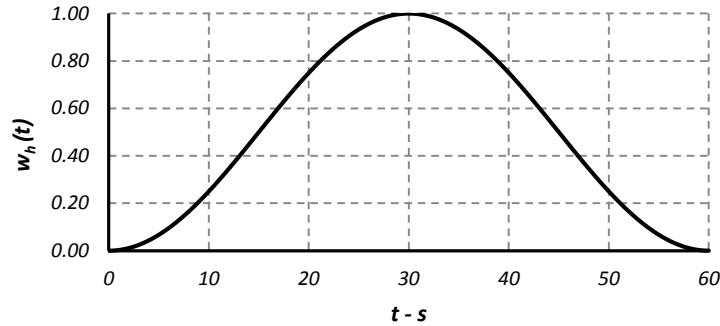


Figura No. 17. Ventana de tiempo de Hanning para una señal de 60 s.

ESTIMACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO

Otro parámetro que contribuye a la descripción y predicción del comportamiento dinámico de un sistema físico corresponde al valor de amortiguamiento proporcionado por los materiales que lo componen. El amortiguamiento es el resultado de la disipación de energía cinética mediante múltiples mecanismos como la fricción que generan los movimientos relativos entre los componentes del sistema ó en forma de energía calorífica debida a ciclos repetidos de tensión elástica en los materiales. Bajo la hipótesis de que los componentes de la estructura son representativos de todo el sistema, el valor del amortiguamiento total se estima a partir de las propiedades de éstos elementos.

Existen numerosos métodos para estimar los valores de amortiguamiento a partir de la respuesta del sistema ante una excitación dada. En este proyecto se estima el amortiguamiento empleando el método de ancho de banda o media potencia (Clough & Peinzen, 2003). El método se basa en la función de respuesta en frecuencia de la estructura considerando en principio un sistema de un grado de libertad, para el cual su función de respuesta está dada por:

$$\rho = \frac{p_0}{k} [(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{-1/2} \quad (41)$$

El ancho de banda se define como el ancho Δf en la curva de la función de respuesta cuando su magnitud se reduce a $1/\sqrt{2}$ veces el valor máximo ρ_{max} en la frecuencia natural del sistema f_n .

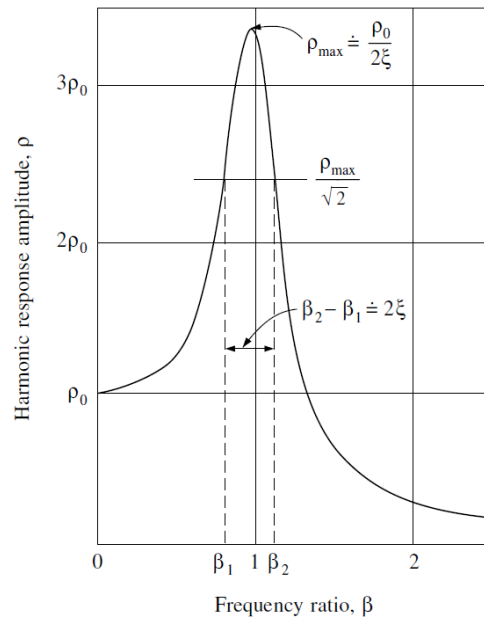


Figura No. 18. Curva de respuesta en frecuencia para un sistema con amortiguamiento moderado [Tomado de: (Clough & Peinzen, 2003)]. β representa la relación de frecuencias entre el sistema y la excitación $\beta = f/\lambda$.

A partir de esta propiedad es posible estimar el valor del amortiguamiento en el sistema con la siguiente expresión:

$$\xi = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_2 + \beta_1} = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (42)$$

Dado que las aplicaciones de este método se requieren en el análisis dinámico de sistemas con múltiples grados de libertad, el mismo procedimiento suele aplicarse para el cálculo del amortiguamiento asociado a cada frecuencia modal (De Silva, 2007), siempre que el sistema presente una función de respuesta con picos de frecuencias resonantes espaciados debidamente tal que sea posible definir las frecuencias f_1 y f_2 para cada modo de vibración [Ecuación (43)]. Es importante tener en cuenta que esta relación es válida para valores pequeños de amortiguamiento y se basa en el análisis de sistemas lineales:

$$\xi_i = \frac{\beta_{2i} - \beta_{1i}}{\beta_{2i} + \beta_{1i}} = \frac{f_{2i} - f_{1i}}{f_{2i} + f_{1i}} \quad (43)$$

El procedimiento de estimación del amortiguamiento a partir de la respuesta del sistema se emplea en el análisis espectral de señales generadas por vibraciones de tipo aleatorio mediante el cálculo de las funciones de densidad espectral de los registros medidos directamente sobre el sistema empleando ventanas de tiempo; sin embargo, la convolución entre transformadas de Fourier que implica el procedimiento permite fugas de potencia incrementando el ancho de banda, y así mismo el valor del amortiguamiento. Por esta razón es pertinente corregir este valor mediante las ecuaciones propuestas en (Boroschek K. & Hernández P., 2010), en función del tamaño de la ventana utilizada:

$$\beta = C_1(\beta_{aparente} - C_4)^3 + C_2(\beta_{aparente} - C_4)^2 + C_3(\beta_{aparente} - C_4) + 0.001 \quad (44)$$

Donde,

$$C_1 = 2.038 * 10^{-4} N_{ciclos}^3 - 0.06044 N_{ciclos}^2 + 5.3796 N_{ciclos} + 203.396 \quad (45)$$

$$C_2 = -1.844 * 10^{-5} N_{ciclos}^3 + 5.733 * 10^{-3} N_{ciclos}^2 - 0.5039 N_{ciclos} - 17.487 \quad (46)$$

$$C_3 = \begin{cases} -0.0336 N_{ciclos} + 2.6850, & \text{si } N_{ciclos} < 20 \\ -0.0047 N_{ciclos} + 2.1902, & \text{si } 20 \leq N_{ciclos} \leq 100 \\ -0.0012 N_{ciclos} + 1.8247, & \text{si } 100 < N_{ciclos} \end{cases} \quad (47)$$

$$C_4 = 0.6745 N_{ciclos}^{-0.9709} \quad (48)$$

4. PROCESAMIENTO DE DATOS

En éste capítulo se presenta la metodología y herramientas empleadas para el procesamiento de los datos obtenidos de la instrumentación sísmica y pruebas de vibración ambiental en la estructura del edificio de ingenierías.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

Además de la instrumentación sísmica permanente con la cual cuenta el edificio de ingenierías en la actualidad, y ante la ausencia de eventos sísmicos de gran magnitud que perturben la condición cuasi estática de la estructura, se realizaron pruebas de vibración ambiental, bajo condiciones de servicio de la edificación. Para ello se optó por ejecutar pruebas de 30 minutos de duración dentro de horarios en los que se espera un ruido cultural bajo y poco flujo vehicular en las vías aledañas. Inicialmente se realizaron las pruebas mostradas en la *Tabla No. 4*, empleando la configuración de sensores mostrada en la *Figura No. 19(a)*. Además de la prueba 1, las pruebas 2 y 3 fueron programadas con el fin de comparar los resultados preliminares y verificar que éstos fueran consecuentes en el tiempo.

Tabla No. 4. Primera etapa de pruebas de vibración ambiental.

Prueba #	Configuración No.	Fecha	Hora Local
1	1	Mayo 13	19:00
2	1	Junio 20	00:00
3	1	Julio 11	21:30

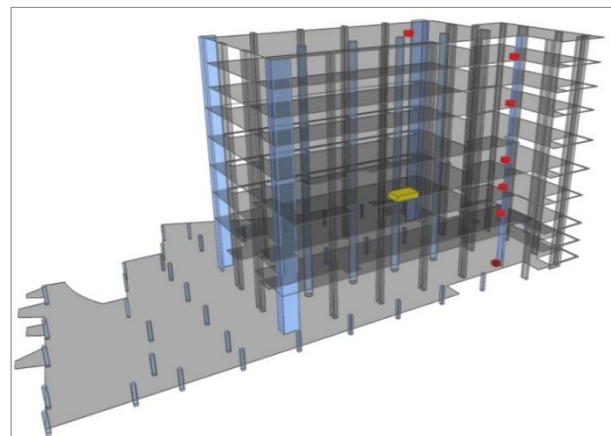
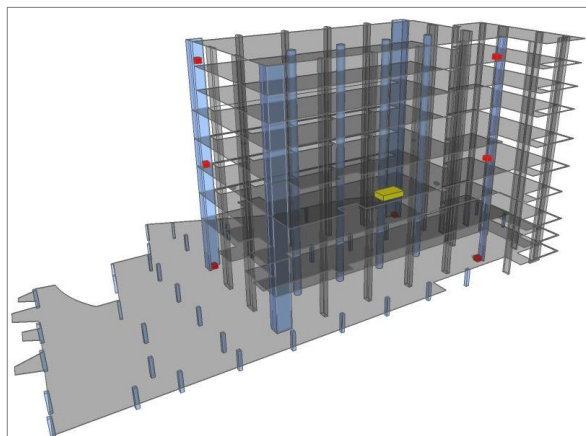


Figura No. 19. (a) Configuración instrumental No. 1 para pruebas de vibración ambiental 1, 2, 3, 5 y 6; (b) Configuración instrumental No. 2 para prueba de vibración ambiental 4.

En la segunda etapa experimental se realizan las pruebas 4, 5 y 6, como se presenta en la *Tabla No. 5*. La prueba 4 se ejecutó empleando la ubicación de sensores que se muestra en la *Figura No. 19(b)*, con el fin de instrumentar los puntos necesarios para obtener claramente las formas modales de la estructura, correspondientes a cada una

de las frecuencias de vibración. Las pruebas 5 y 6 se llevaron a cabo, de forma análoga a las pruebas 2 y 3, para validar la consistencia de los resultados encontrados en la primera etapa experimental después de un periodo de tiempo mayor al que se tuvo entre las pruebas 1, 2 y 3.

Tabla No. 5. Segunda etapa de pruebas de vibración ambiental.

<i>Prueba #</i>	<i>Configuración No.</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora Local</i>
4	2	Agosto 31	01:00
5	1	Septiembre 10	01:30
6	1	Septiembre 13	02:00

PROGRAMA DE CÓMPUTO “VIBRACIONES”

El programa *VIBRACIONES* (Henao A., 2013) se empleó como herramienta para el cómputo de las funciones de densidad espectral, dado que esta herramienta implementa apropiadamente la metodología aplicada.

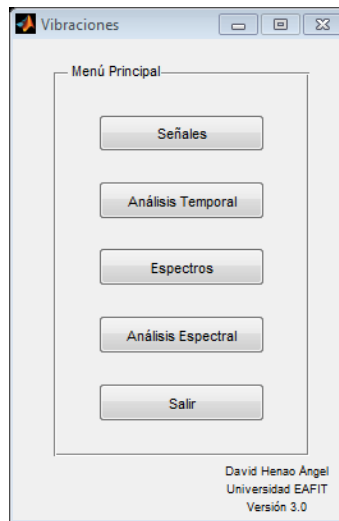


Figura No. 20. Presentación programa de cálculo VIBRACIONES.

VIBRACIONES (Figura No. 20) permite leer señales a partir de archivos de datos o generarlas manualmente a partir de parámetros definidos por el usuario. Contiene herramientas para realizar tanto análisis temporal calculando las funciones de correlación y de correlación cruzada entre las señales, como análisis espectral estimando funciones de densidad espectral como coherencias, espectros cruzados de potencia, ángulos de fase y funciones de transferencia a partir de la determinación de las transformadas de Fourier de cada señal.

TRATAMIENTO DE SEÑALES

A continuación se presenta el tratamiento realizado a las señales obtenidas de la red acelerográfica instalada en el edificio de ingenierías de la Universidad EAFIT. Se toma a manera de ejemplo el registro del Sensor 07 en la dirección transversal $[x]$.

LECTURA DE SEÑALES

Se visualizan los registros de los siete sensores en cada dirección de análisis, como se muestra en la *Figura No. 21*:

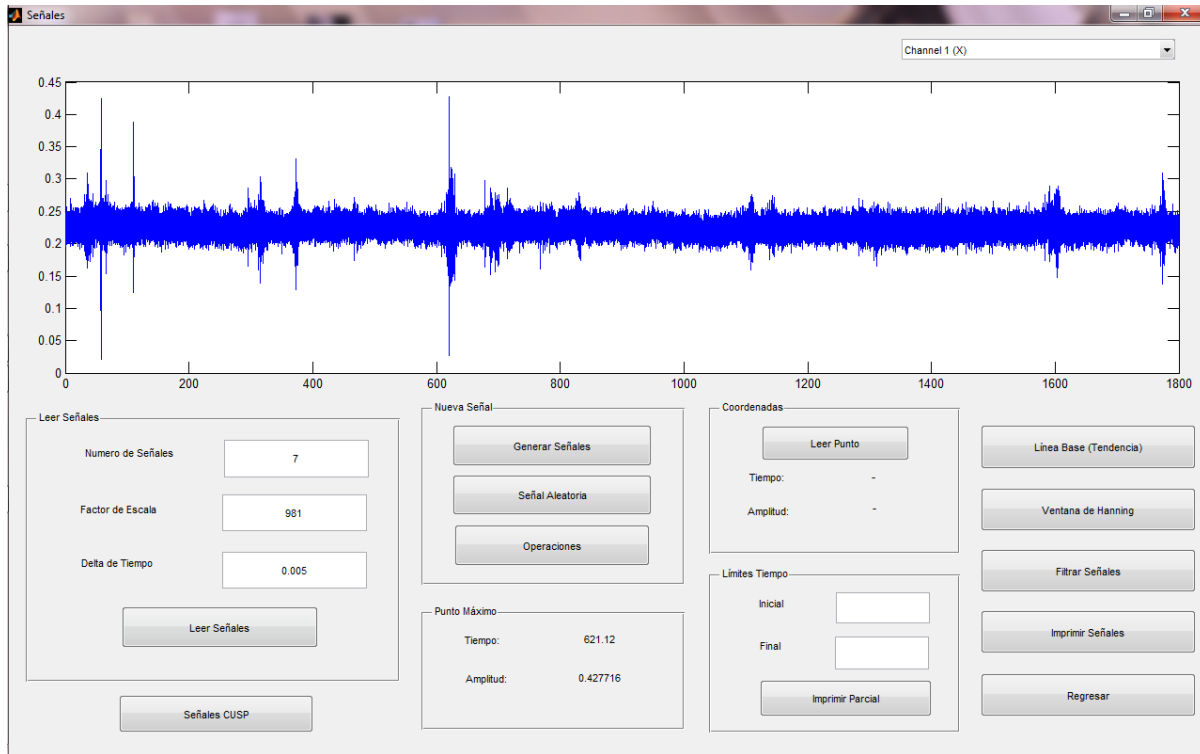


Figura No. 21. Lectura de registro de aceleraciones en el tiempo [Sensor 01 – Dirección X (Transversal)].

CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE

En la *Figura No. 21* se observa un valor central de la señal entre 0.20 y 0.25 Gal. Al corregir la línea base se obtiene la señal sin tal desfase, es decir, su valor promedio se ubica sobre la línea de ordenada cero:

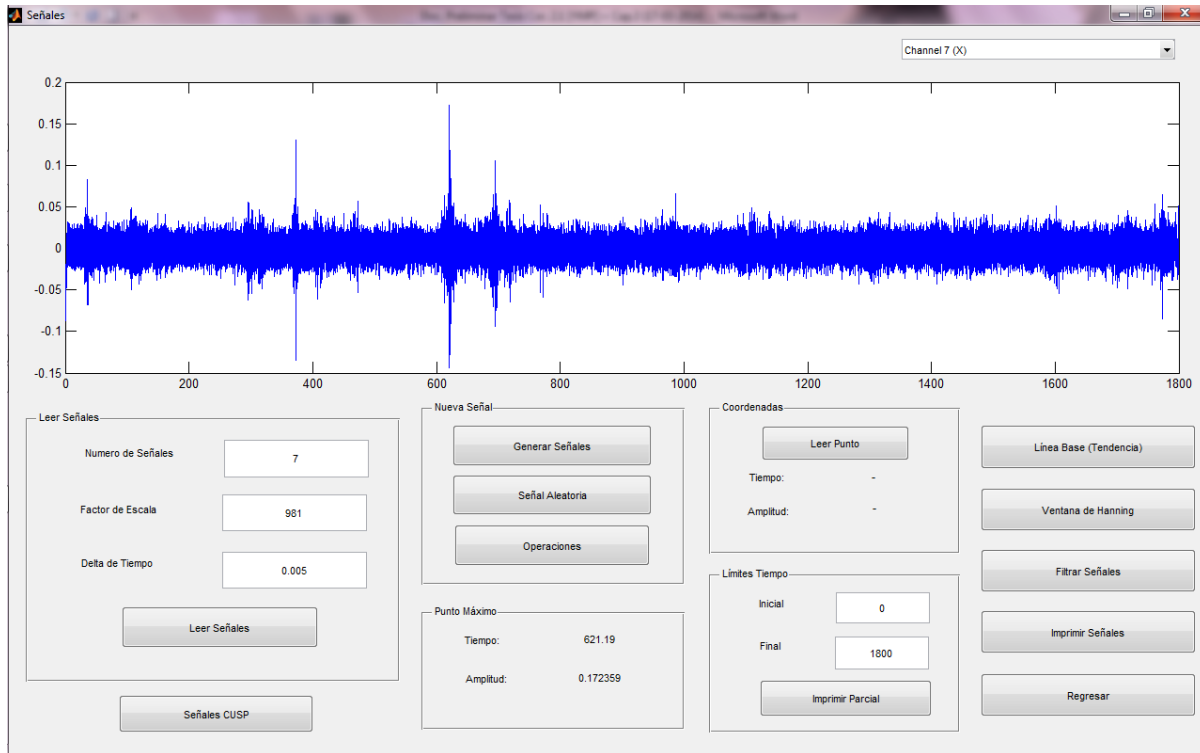


Figura No. 22. Registro en el tiempo con corrección de línea base [Sensor 07 (P8) – Dirección X (Transversal)].

FILTRADO DE LA SEÑAL

Se ajusta la señal con el empleo de un filtro tipo *pasa banda* (Figura No. 23) entre $f_{min} = 0.1 \text{ Hz}$ y $f_{max} = 20 \text{ Hz}$ para eliminar posibles periodos largos que imprimen cierta inclinación sobre la señal, y frecuencias mayores a 20 Hz; la ventana de frecuencias de 0 a 20 Hz corresponde a una aproximación del rango dentro del cual se encuentra la gran mayoría de obras de infraestructura del mismo tipo que el sistema que se analiza en este proyecto:

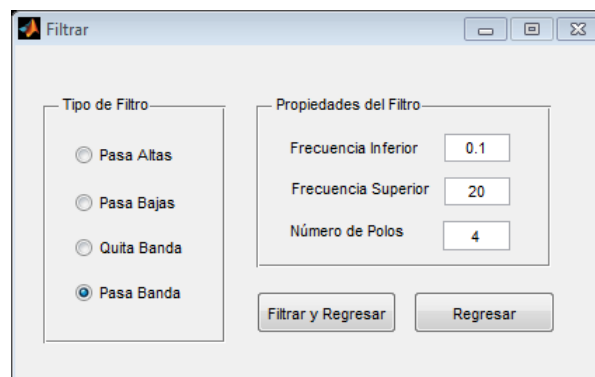


Figura No. 23. Aplicación de filtros de frecuencia al registro en el tiempo.

En este momento se puede identificar el punto en el tiempo en el que se presenta la máxima amplitud de vibración en cada señal:

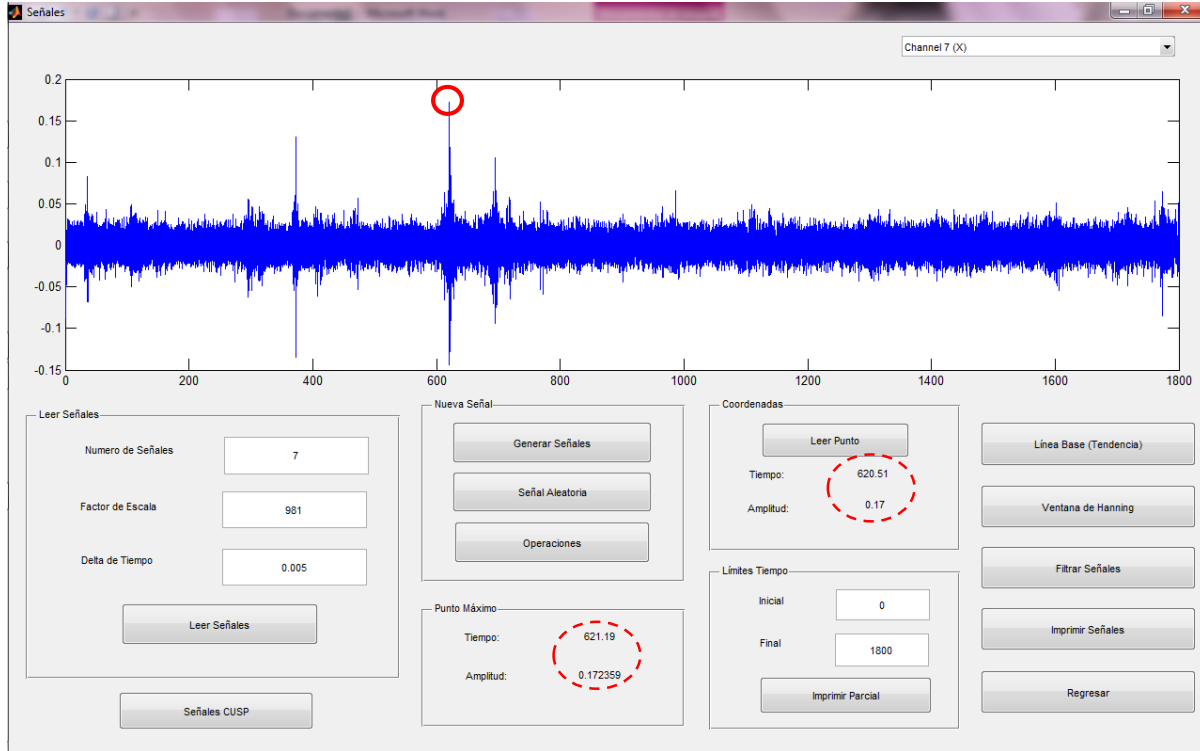


Figura No. 24. Identificación de amplitudes máximas de la señal [Sensor 07 (P8) – Dirección X (Transversal)].

Para las diferentes señales de cada sensor en las direcciones trasversal y longitudinal, se obtienen los valores de amplitudes promedio de los registros:

Tabla No. 6. Amplitudes promedio registradas [PVA No.6].

DIRECCIÓN (X)	SENSOR	AMPLITUD PROMEDIO (Gal)	DIRECCIÓN (Y)	SENSOR	AMPLITUD PROMEDIO (Gal)
TRANSVERSAL	01-S1	±0.01	LONGITUDINAL	01-S1	±0.04
	02-S1	±0.01		02-S1	±0.07
	03-S1	±0.01		03-S1	±0.07
	04-P1	±0.10		04-P1	±0.20
	05-P1	±0.03		05-P1	±0.15
	06-P1	±0.05		06-P1	±0.40
	07-P1	±0.03		07-P1	±0.10

Se evidenció en los registros de los sensores 01 (S1) a 07 (P8) que tal como se esperaba, se presentan niveles de ruido más bajos a los que se midieron para determinar el ruido ambiental promedio en el edificio en horarios laborales durante el día.

La herramienta ventana de Hanning no se aplica a las señales durante éste tratamiento previo ya que se aplica automáticamente al momento de calcular las funciones de densidad espectral.

ANÁLISIS ESPECTRAL

Como se menciona anteriormente, una de las formas implementadas para procesar los datos para el análisis espectral es mediante el uso de las transformadas de Fourier aplicadas directamente a los registros en el tiempo. Es por esto que posteriormente al tratamiento de cada señal, se determinan las funciones de densidad espectral en frecuencia mediante transformadas de Fourier. Una primera aproximación a las frecuencias representativas del sistema es la obtención de los espectros de potencia de las señales provenientes de todos los sensores como se muestra en la *Figura No. 25*.

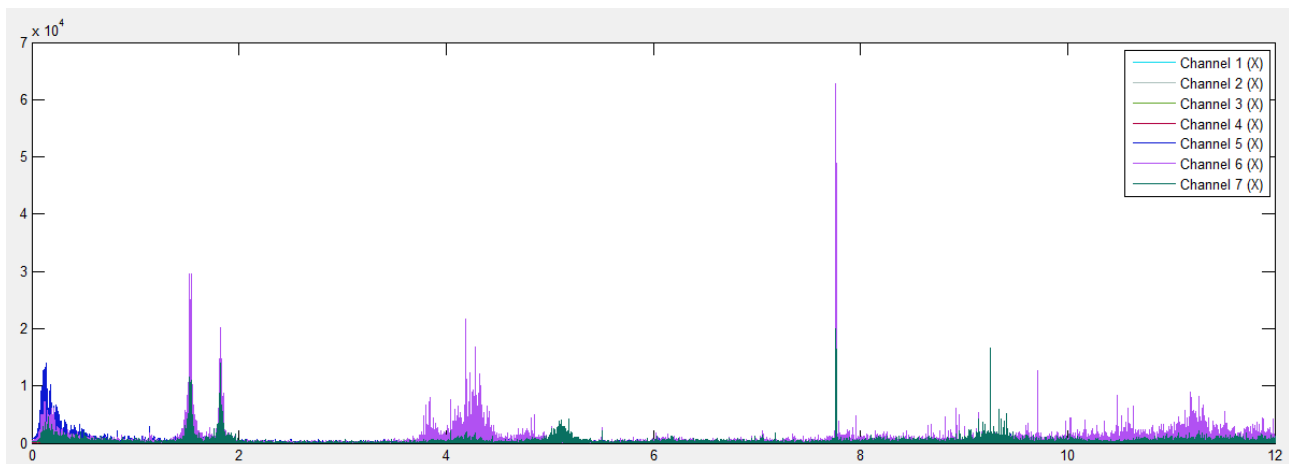


Figura No. 25. Espectro de Potencia [Dirección Transversal].

Como se expuso anteriormente, la metodología empleada propone estimar las funciones espectrales a partir de la subdivisión de los registros en tramos de cierto tamaño T ; para este proyecto se toma un tamaño de tramo de 2048 datos de señal en el tiempo [$T = 10.24$ s]:

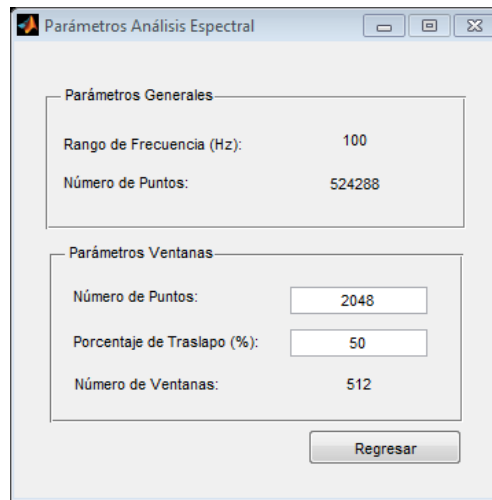


Figura No. 26. Parámetros para la subdivisión de la señal en tramos.

De esta manera se obtienen las funciones espectrales promedio:

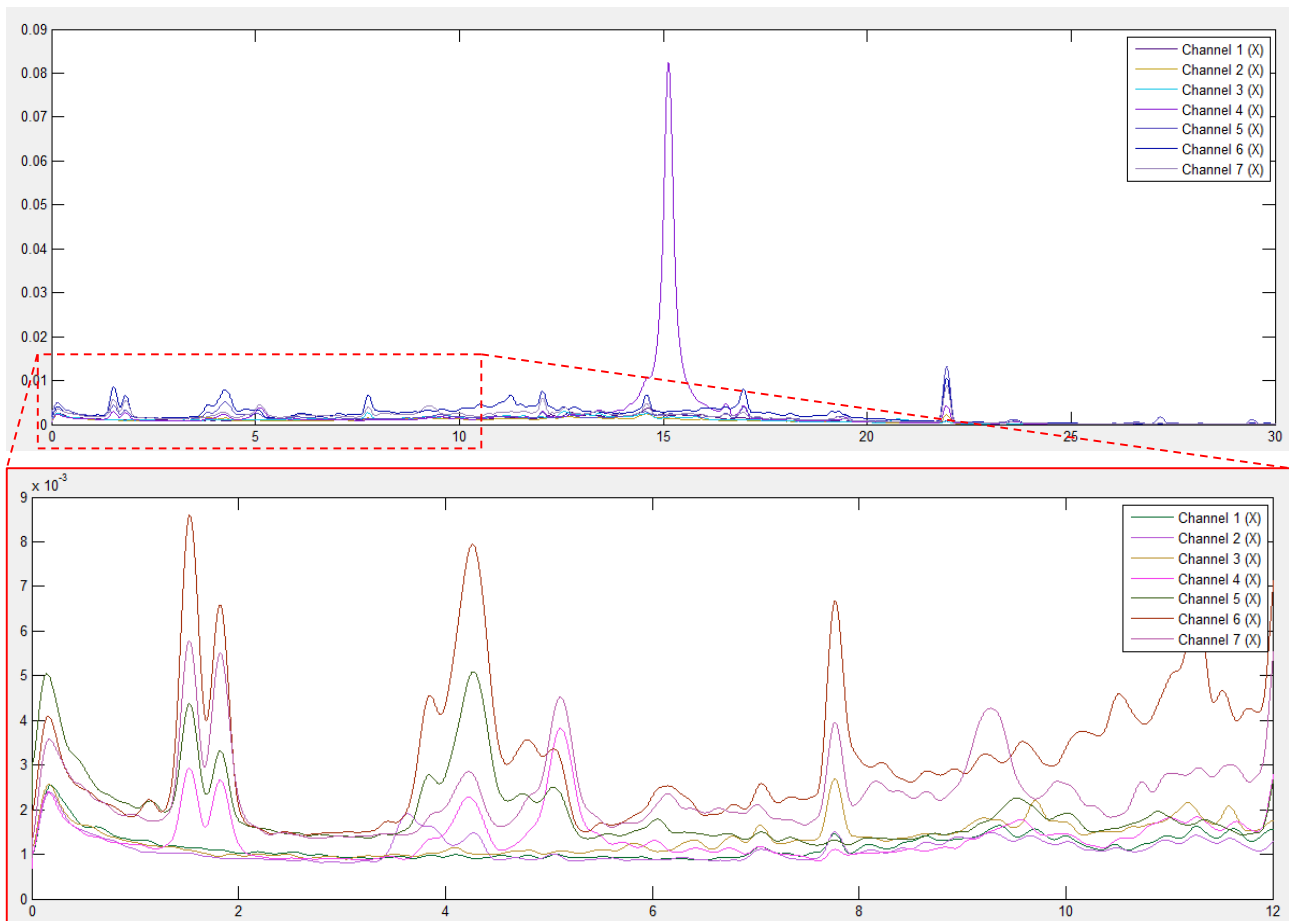


Figura No. 27. Espectro de Fourier Promedio por tramos [Dirección Transversal].

La *Figura No. 27* muestra una ventana del espectro ampliada a un rango de 0 -12 Hz para mejor visualización del comportamiento de la curva:

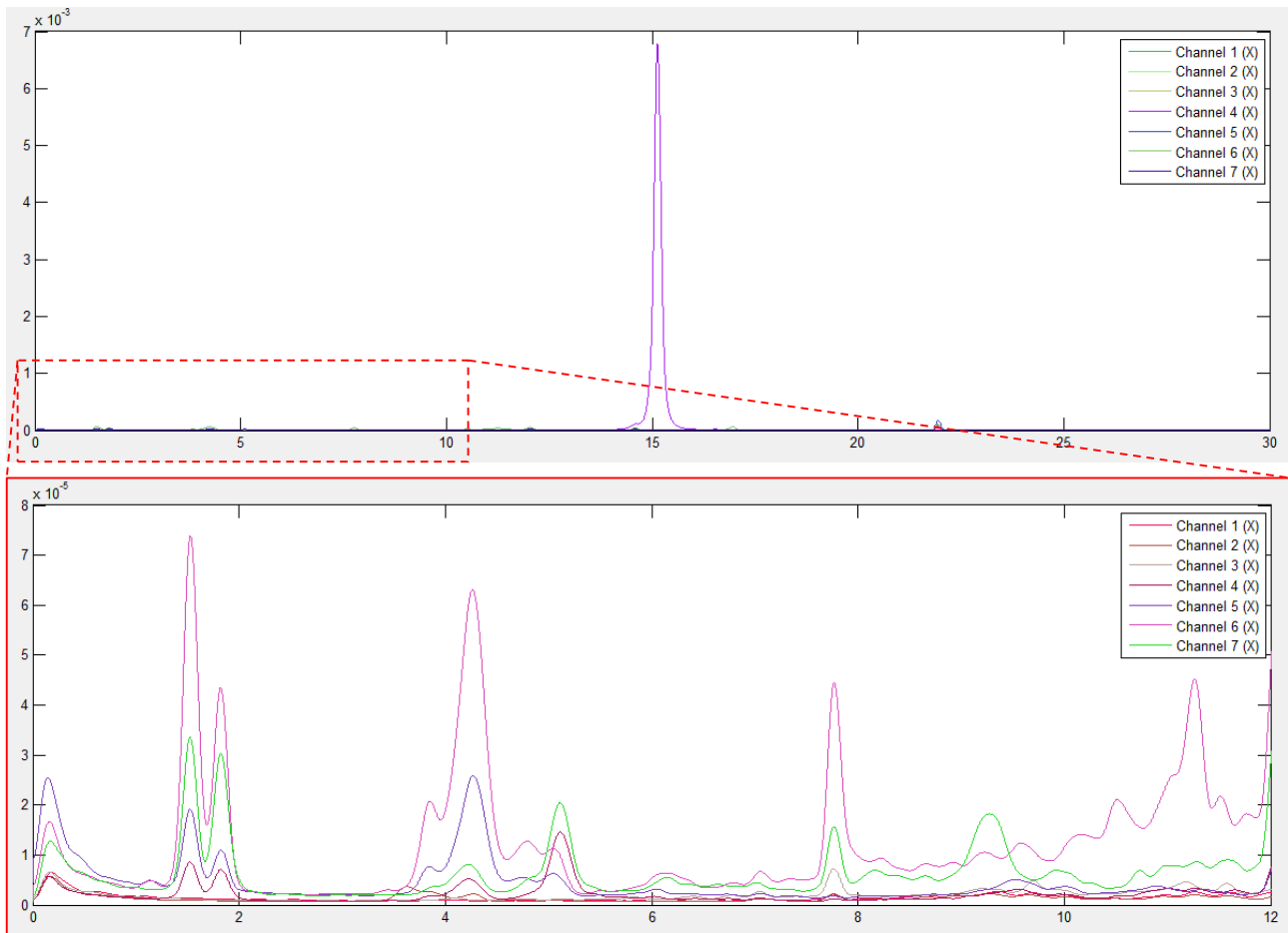


Figura No. 28. Espectro de Potencia Promedio por tramos [Dirección Transversal].

Adicionalmente se calculan las relaciones espectrales entre parejas de registros que permiten realizar un análisis más detallado entre señales, como el espectro cruzado de potencia, funciones de transferencia, ángulos de fase, y función de coherencia:

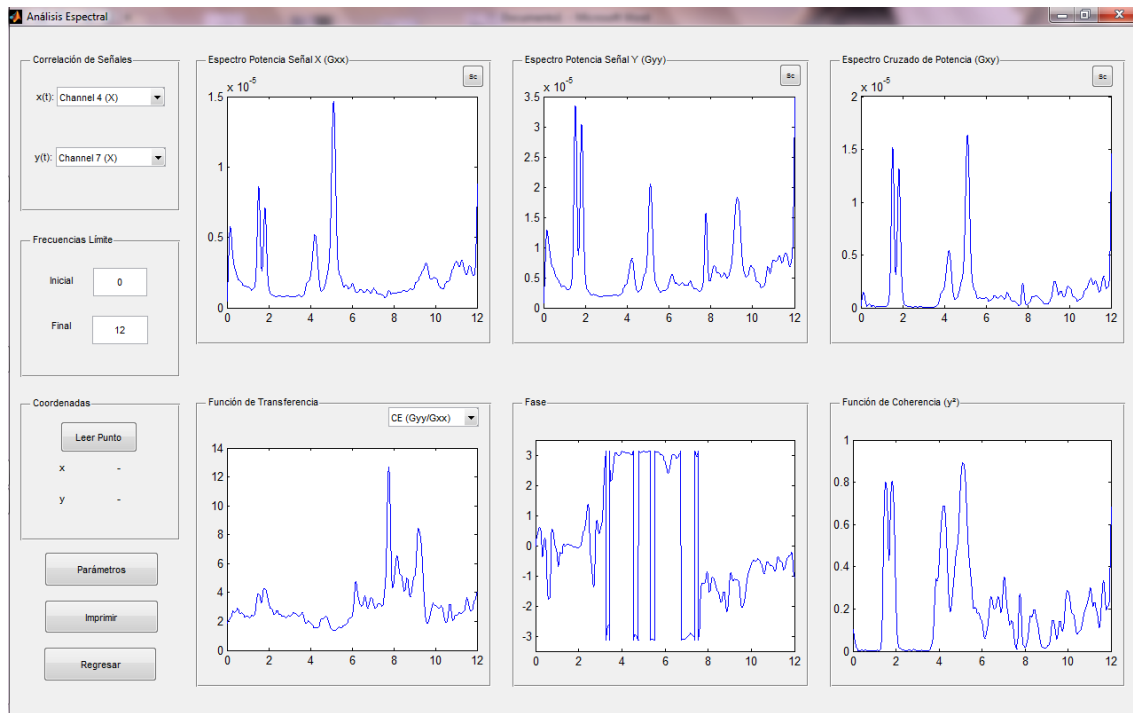


Figura No. 29. Funciones espectrales para el análisis de las señales en los sensores 04 (P3) y 07 (P8) [Dirección transversal].

EVENTOS SÍSMICOS DESTACADOS

Durante el proceso de instrumentación comprendido entre el periodo de desarrollo del presente proyecto se registraron eventos sísmicos de baja magnitud localizados a distancias mayores a 280 km, entre los cuales se toma para el análisis el sismo del 28 de Octubre de 2013 de magnitud M_L 3.9 localizado a 9.5 km al noroeste de Los Santos (Santander), con una profundidad de 148 km (SGC, 2013). Si bien se presentaron movimientos de mayor magnitud durante este periodo, los altos niveles de ruido generaban dificultades para la identificación de estos sismos en los registros de la estructura. Es por esto que se emplean las señales mostradas a continuación, en las que se visualiza de forma clara el arribo de las ondas sísmicas en la base de la estructura.

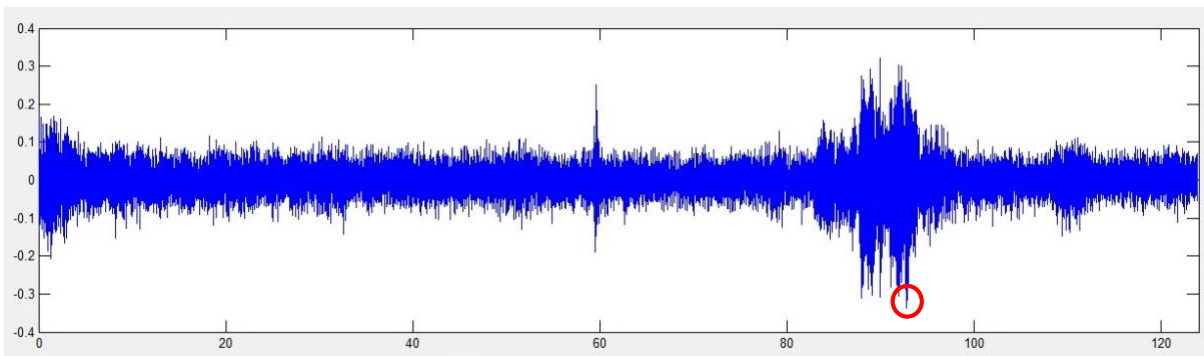


Figura No. 30. Registro de aceleraciones – Sismo M_L 3.9 (2013-10-28) [Sensor 02 (S1) – Dirección Longitudinal].

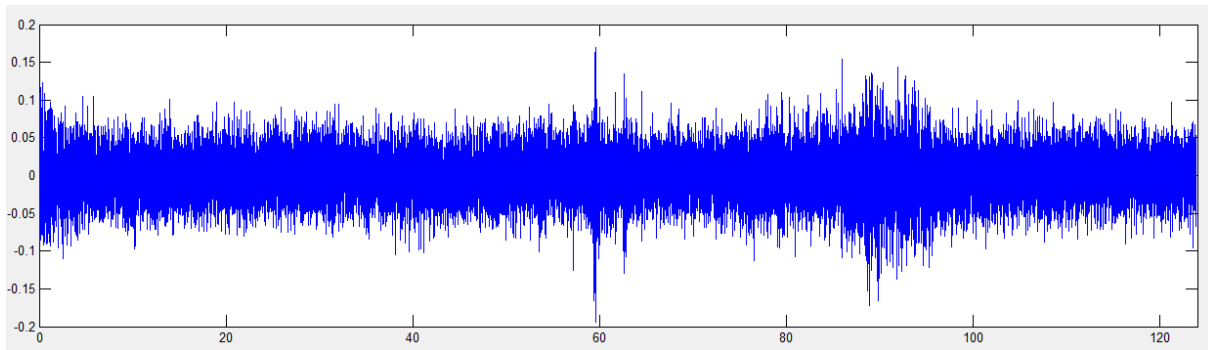


Figura No. 31. Registro de aceleraciones – Sismo M_L 3.9 (2013-10-28) [Sensor 02 (S1) – Dirección Transversal].

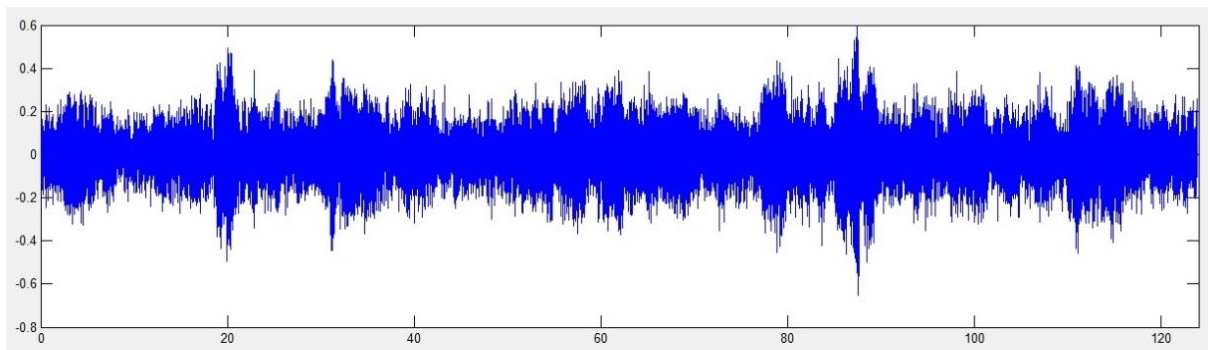


Figura No. 32. Registro de aceleraciones – Sismo M_L 3.9 (2013-10-28) [Sensor 07 (P8) – Dirección Longitudinal].

En las *Figura No. 30* se presentan simultáneamente los registros del evento sísmico en la estructura, a nivel de base (S1) y cubierta (P8). En el registro del sensor 07 (*Figura No. 32*) ubicado en el último nivel del edificio se evidencia el alto nivel de ruido que impiden la identificación de las amplitudes correspondientes al movimiento fuerte del terreno. Sin embargo, en el registro de aceleraciones del sensor ubicado en el sótano (*Figura No. 30*) se puede identificar la amplitud máxima del movimiento en la base de la estructura de 0.34 Gal en dirección longitudinal y de 0.19 Gal en dirección transversal. En el siguiente capítulo se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos del proceso de registro de aceleraciones en el tiempo.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

Éste capítulo desarrolla el análisis de las señales de aceleración tomadas de la estructura estudiada, y procesadas según la metodología presentada en el capítulo anterior; con el fin de identificar tanto las frecuencias de vibración de la estructura, así como las formas modales y el amortiguamiento asociados a cada una de ellas.

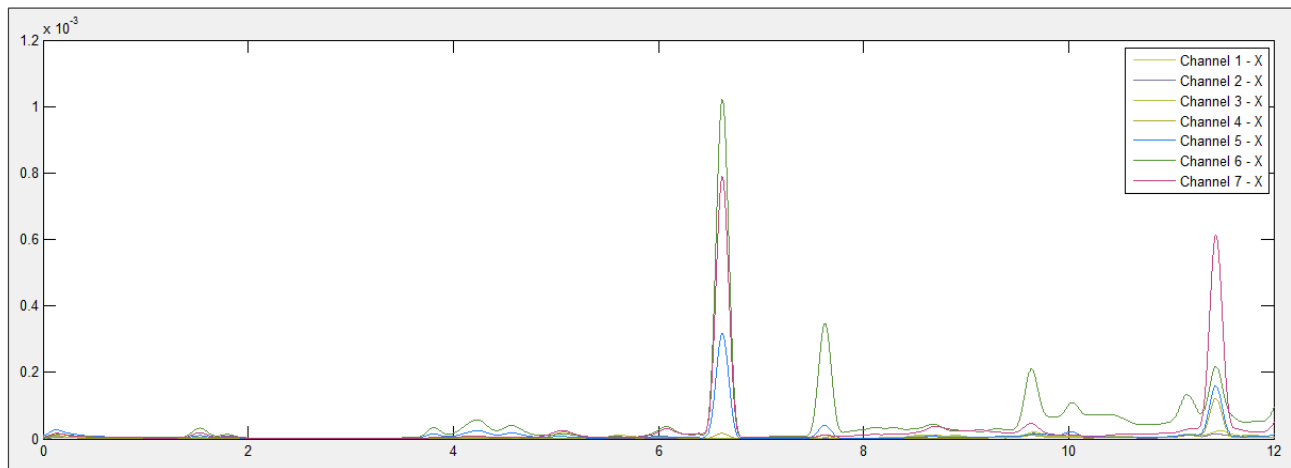
En la presentación éste capítulo se mostrarán resultados sólo para las pruebas 1, 4 y 6. Las demás pruebas corresponden a procesos de verificación y validación de resultados en el tiempo.

IDENTIFICACIÓN DE FRECUENCIAS PREDOMINANTES

PRUEBAS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

Para identificar las frecuencias de vibración innatas de la estructura a partir de los registros de vibración ambiental tomados de varios puntos instrumentados, se acude como primera herramienta de análisis al espectro de potencia por tramos de todos los sensores, el cual evidencia a través de incrementos en la amplitud las frecuencias en las cuales el sistema libera mayor cantidad de energía por movimiento vibratorio, frente a la ausencia de fuerzas externas de mayor intensidad.

En la *Figura No. 34 (a)* se presenta el espectro de potencia de las señales correspondientes a la prueba No. 1 (PVA No.1); para visualizar mejor las primeras frecuencias se adiciona la *Figura No. 33 (b)* con una ventana de menor tamaño.



(a)

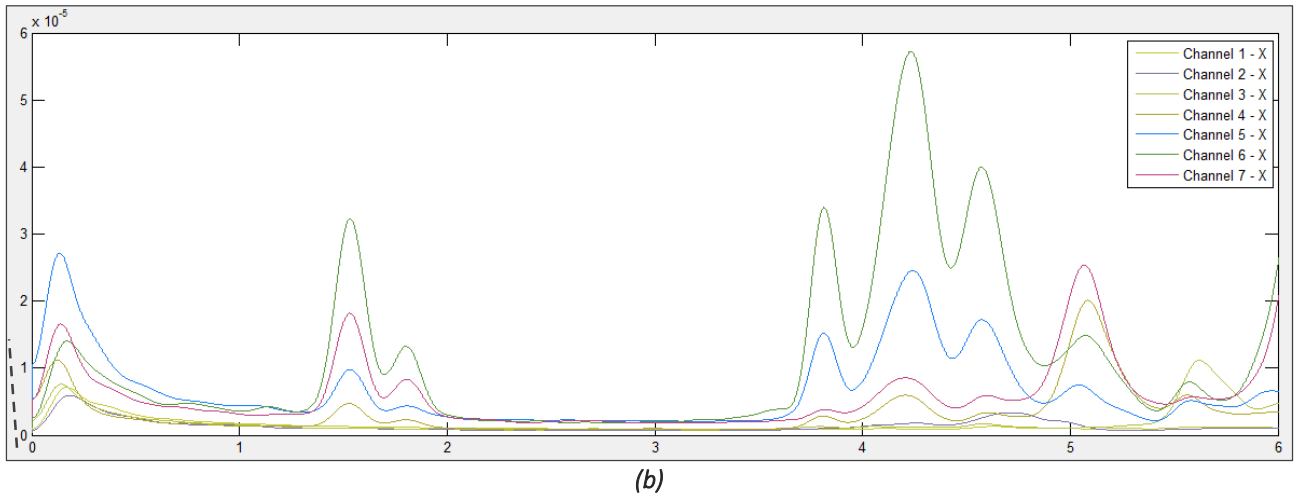


Figura No. 33. Espectro de potencia por tramos de 2048 puntos en dirección transversal (PVA No.1): (a) Venta de frecuencias de 0 Hz a 12 Hz; (b) Ventana de frecuencias de 0 Hz a 6 Hz.

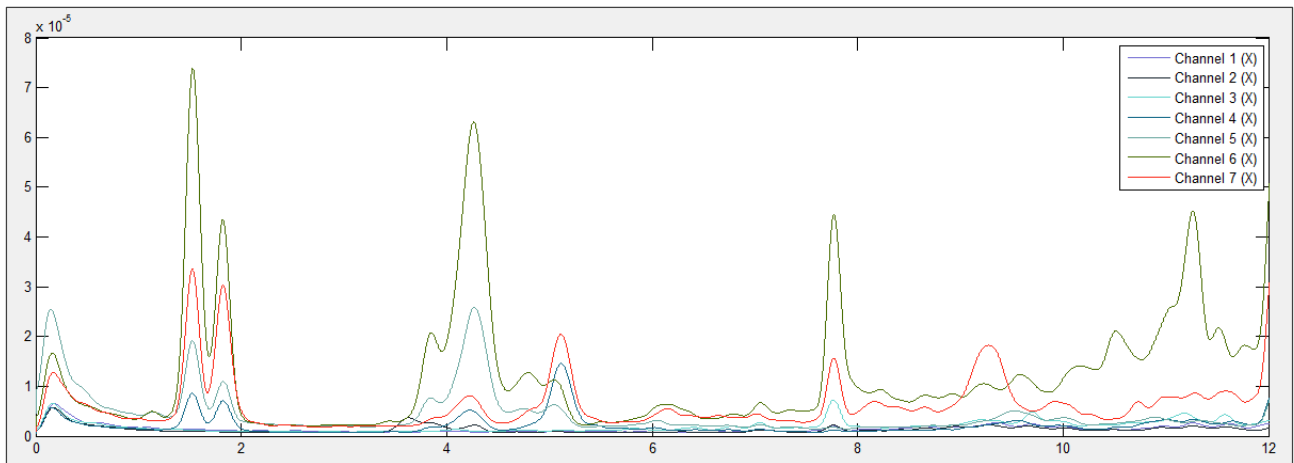
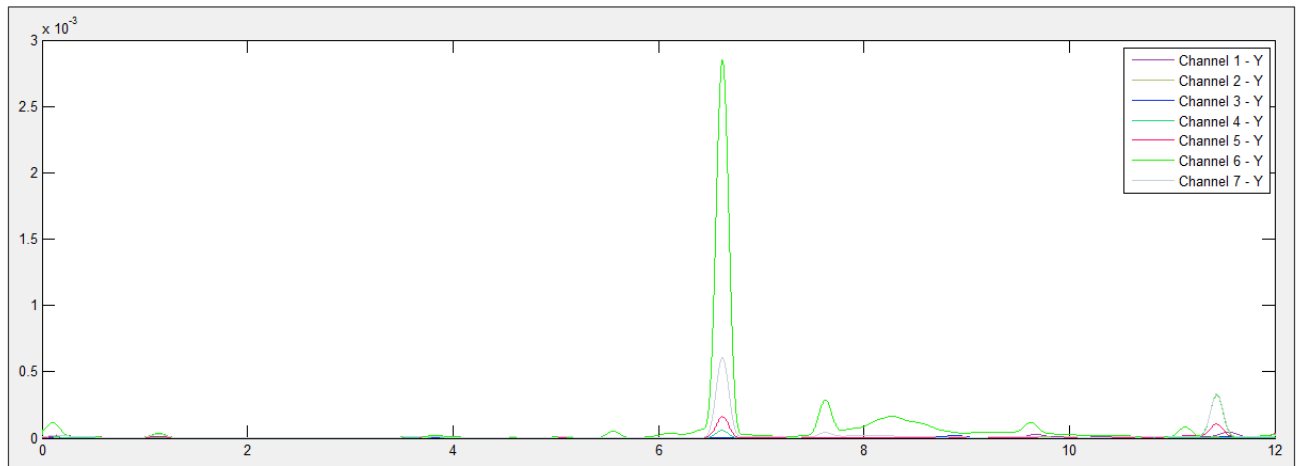
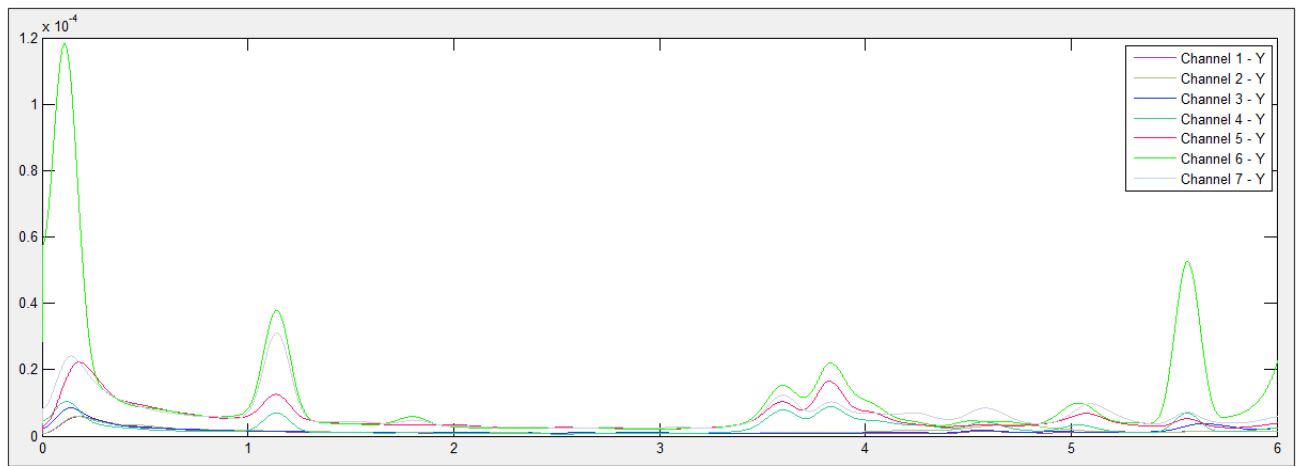


Figura No. 34. Espectro de potencia por tramos de 2048 puntos en dirección transversal (PVA No.6).

Los espectros de potencia en la *Figura No. 34* corresponden a las señales de la prueba No. 6. Se destacan frecuencias muy similares en los espectros de las pruebas No. 1 y No. 6; lo que indica la permanencia de los datos en el tiempo. Las amplitudes pueden variar en cada frecuencia, ya que el nivel de ruido siempre es diferente de acuerdo con las condiciones ambientales del lugar al momento del ensayo experimental. Para ambas pruebas se evidencian frecuencias importantes como 1.50 Hz, 1.80 Hz, 3.80 Hz, 4.20 Hz, 5.10 Hz y 7.80 Hz en la dirección transversal. De igual manera, para la dirección longitudinal se observan las frecuencias representativas 1.15 Hz, 1.80 Hz, 3.80 Hz, 5.10 Hz y 7.80 Hz [*Figura No. 35 (b)* y *Figura No. 36*]. Sin embargo, para identificar cuáles de ellas corresponden a frecuencias modales de la estructura se debe complementar el análisis con el empleo de más relaciones espectrales.



(a)



(b)

Figura No. 35. Espectro de potencia por tramos en dirección longitudinal (PVA No.1): (a) Vista de frecuencias de 0 Hz a 12 Hz; (b) Ventana de frecuencias de 0 Hz a 6 Hz.

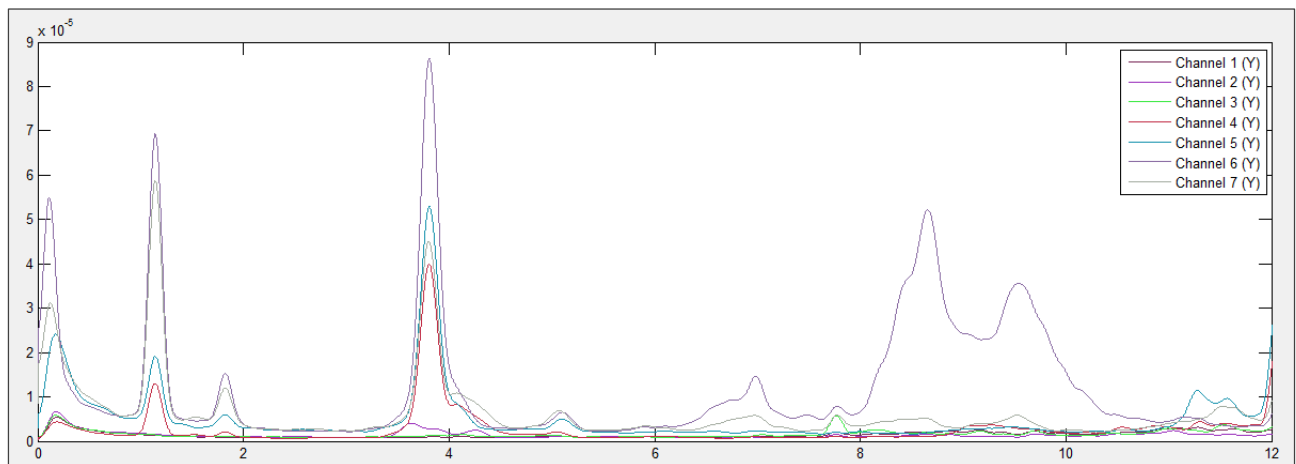


Figura No. 36. Espectro de potencia por tramos en dirección longitudinal (PVA No.6).

Aunque la potencia dinámica del sistema bajo ruido ambiental es un buen acercamiento a las propiedades dinámicas reales, también es útil analizar las señales obtenidas del evento sísmico que a pesar de su pequeña magnitud, representa una fuerza externa de excitación que se espera amplifique las frecuencias previamente identificadas. A continuación se analizan los espectros de potencia de estas señales con el fin de validar las posibles frecuencias de la estructura.

VIBRACIÓN POR EXCITACIÓN SÍSMICA

Las *Figura No. 37* y *Figura No. 38* muestran los espectros de potencia para los registros durante el sismo analizado, en los que es posible identificar las mismas frecuencias detectadas en las pruebas de vibración ambiental, pero con amplitudes mayores del orden de 20 veces el valor inicial durante condiciones de bajo ruido para las pruebas de vibración ambiental No. 1 y No. 6, debidas a las vibraciones producto del movimiento fuerte en la base del edificio.

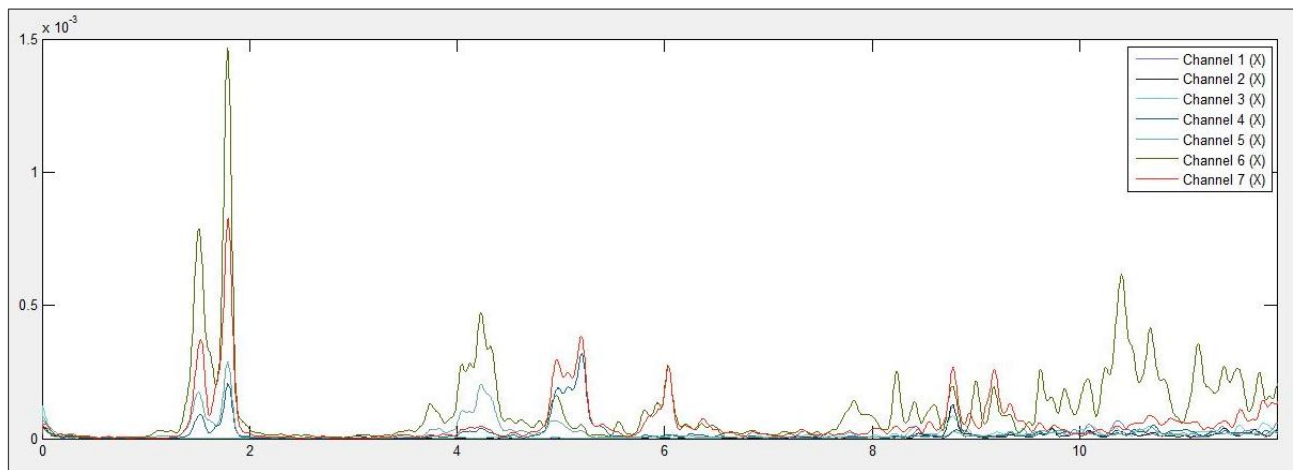


Figura No. 37. Espectro de potencia de las señales durante el sismo (Dirección Transversal).

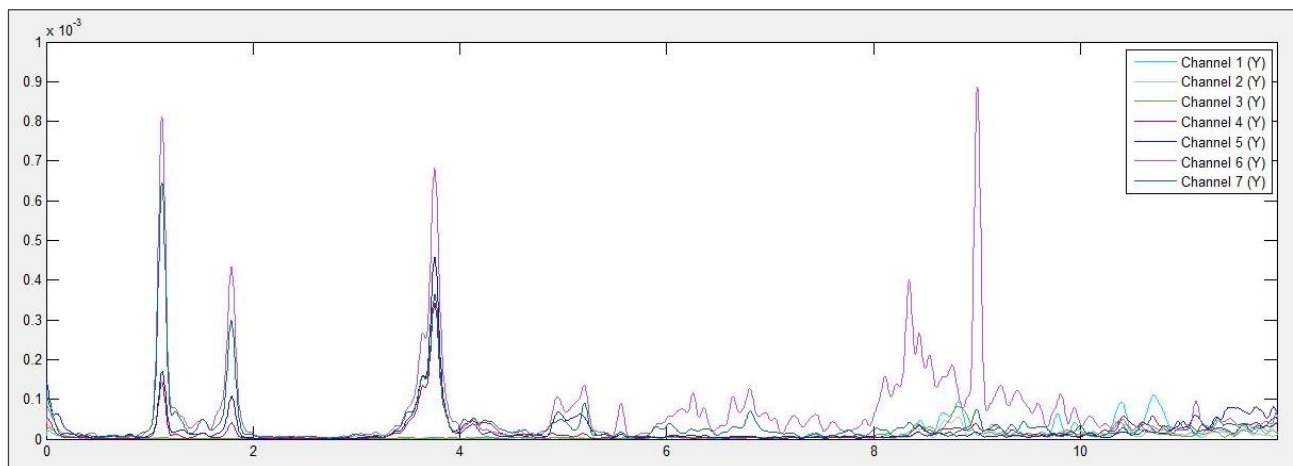


Figura No. 38. Espectro de potencia de las señales durante el sismo (Dirección Longitudinal).

Otra herramienta útil para visualizar las principales frecuencias de la estructura incrementadas por el movimiento fuerte es la función *Cociente Espectral*, representada por una función de transferencia básica:

$$H_{CE} = \frac{G_{yy}}{G_{xx}} \quad (49)$$

El uso de esta función facilita identificar las frecuencias en la señal que corresponden al sistema, al eliminar los picos del espectro correspondientes a la vibración en la base, empleando un cociente entre los espectros de potencia G_{yy} y G_{xx} , de la señal obtenida del último nivel y la señal en la base del edificio, respectivamente. La *Figura No. 39* muestra los cocientes espectrales de registros en base y cubierta en la dirección transversal de la estructura:

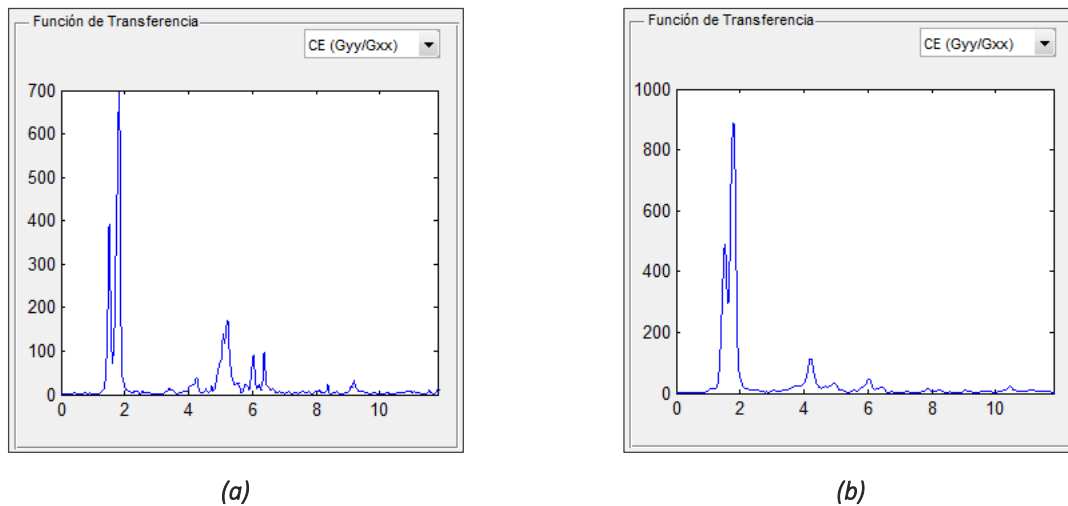


Figura No. 39. Función Cociente Espectral entre señales de cubierta y base durante el sismo (Dirección Transversal): (a) Sensor 07 (CB) vs. Sensor 02 (S1); (b) Sensor 06 (CB) vs. Sensor 03 (S1).

Es evidente la reaparición de las frecuencias ya identificadas previamente en los espectros de potencia 1.50 Hz, 1.80 Hz, 4.20 Hz y 5.10 Hz, lo que podría indicar que si corresponden a modos dinámicos del sistema. También se percibe una frecuencia de 6.00 Hz en los cocientes espectrales de esta dirección que igualmente se presenta en el espectro de potencia de las señales durante el sismo y no se visualiza claramente en las pruebas de vibración ambiental. Más adelante se utilizarán otras herramientas de tipo espectral para aclarar el comportamiento de esta posible frecuencia.

De la misma manera se presentan las funciones de transferencia para las señales en la dirección longitudinal (*Figura No. 40*), donde reaparecen y se validan las frecuencias 1.15 Hz, 1.80 Hz, 3.80 Hz y 5.10 Hz, además de una posible frecuencia de 6.70 Hz que también se observa en el espectro de potencia, y deberá ser estudiada detalladamente más adelante.

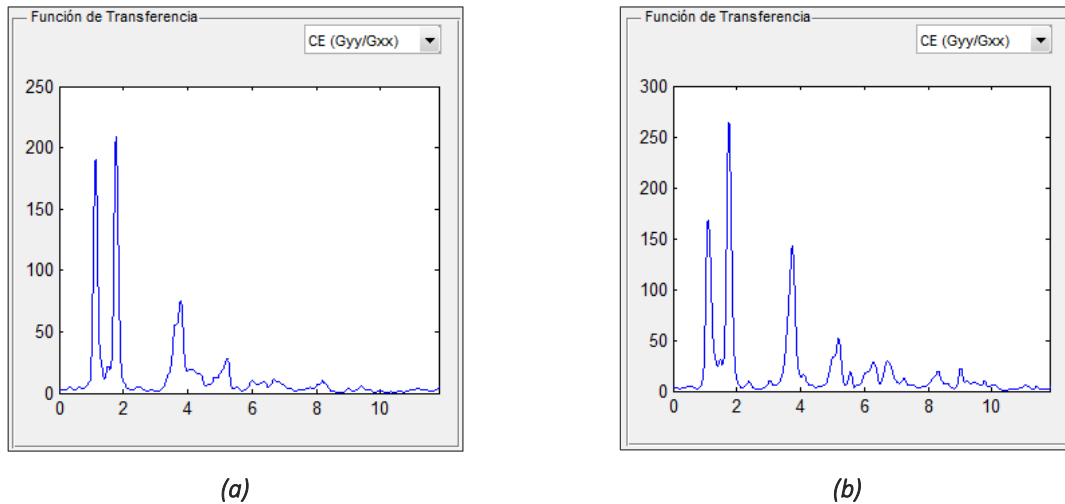


Figura No. 40. Función Cociente Espectral entre señales de cubierta y base durante el sismo (Dirección Longitudinal): (a) Sensor 07 (CB) vs. Sensor 02 (S1); (b) Sensor 06 (CB) vs. Sensor 03 (S1).

DETERMINACIÓN DE FORMAS MODALES

Para la determinación de la forma modal asociada a cada una de las frecuencias identificadas preliminarmente, se recurre a los espectros de potencia donde se visualicen las señales de todos los sensores; se emplean para determinar las amplitudes de vibración de cada señal sobre la frecuencia analizada. Dichas amplitudes se grafican contra el número del nivel correspondiente al registro, y para efectos de visualización y análisis, se normalizan las amplitudes encontradas. Una alternativa para ello es emplear la normalización con respecto al valor máximo de las amplitudes encontradas.

Las formas modales, además de estar controladas por la cantidad de movimiento generado por cada masa del sistema, dependen de la dirección del movimiento relativo entre ellas, ya que éste cambio en fase entre dos señales indica signos opuestos de amplitud en la forma modal de estos niveles. Dicho cambio se puede percibir en la curva de la función fase asociada al ángulo resultante de la función de transferencia entre dos registros analizados.

Dada la configuración instrumental con la que se realizaron la pruebas 1, 2, 3, 5 y 6 (Configuración No. 1), se cuenta con dos puntos instrumentados horizontalmente en los tres niveles de la estructura en los que se instalaron acelerómetros triaxiales; estas dos señales son útiles para identificar los modos de torsión en los que se espera que para cada nivel, los puntos expongan movimientos opuestos entre sí. Verticalmente sólo se tienen tres puntos instrumentados en altura con esta primera configuración, por lo que se podría perder resolución y claridad en las formas de los modos superiores. Por esta razón, se hace necesario realizar un análisis complementario con las señales registradas en la prueba de vibración ambiental No. 4 (PVA No.4), en la cual se emplea la configuración No. 2, que mide varios puntos en una misma línea verticalmente.

A continuación se presentan las formas modales asociadas a las frecuencias validadas anteriormente a partir de las amplitudes del espectro de potencia y la función ángulo de fase entre los diferentes registros analizados. Las *Figura No. 41 a Figura No. 48* muestran las formas identificadas con las señales de la prueba No. 6:

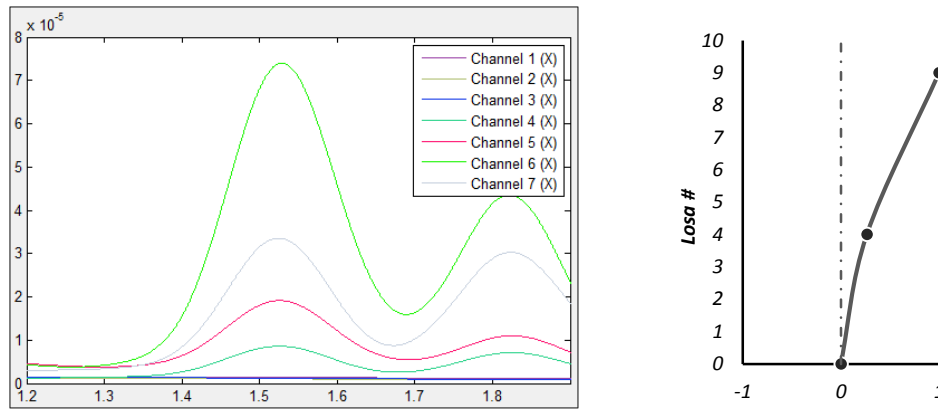


Figura No. 41. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.50 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].

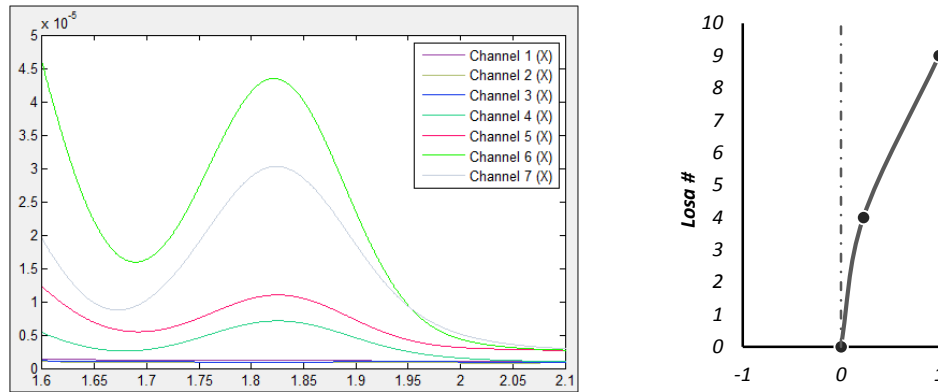


Figura No. 42. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].

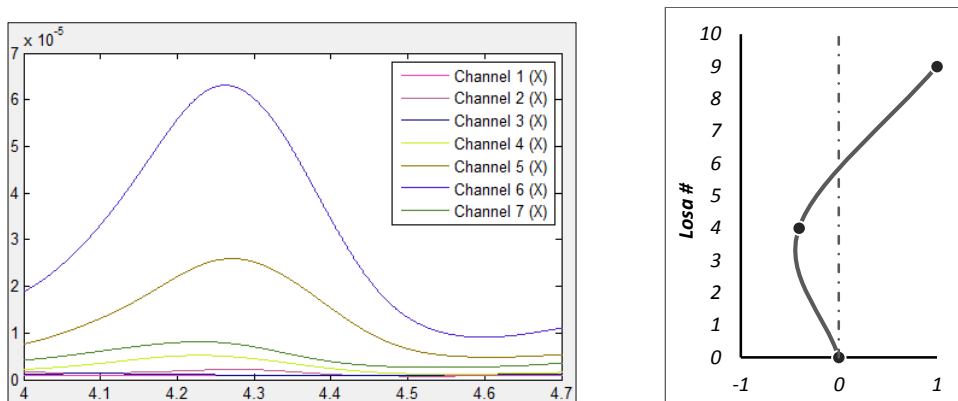


Figura No. 43. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 4.20 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].

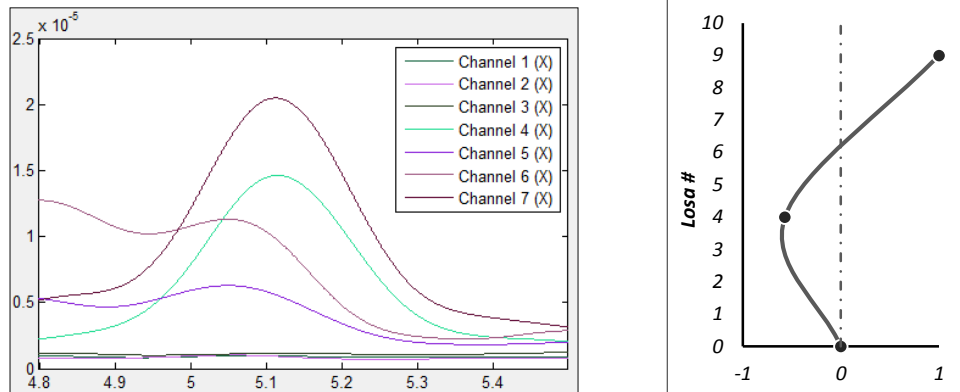


Figura No. 44. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.6) [Dirección Transversal].

De la misma manera para la dirección longitudinal:

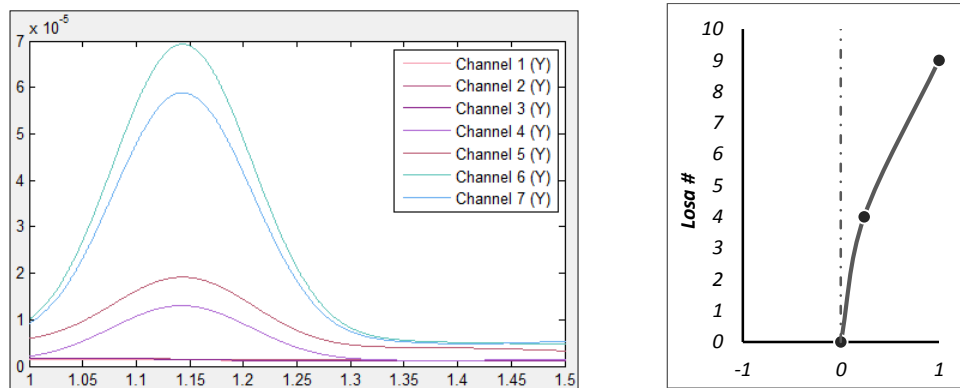


Figura No. 45. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.15 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].

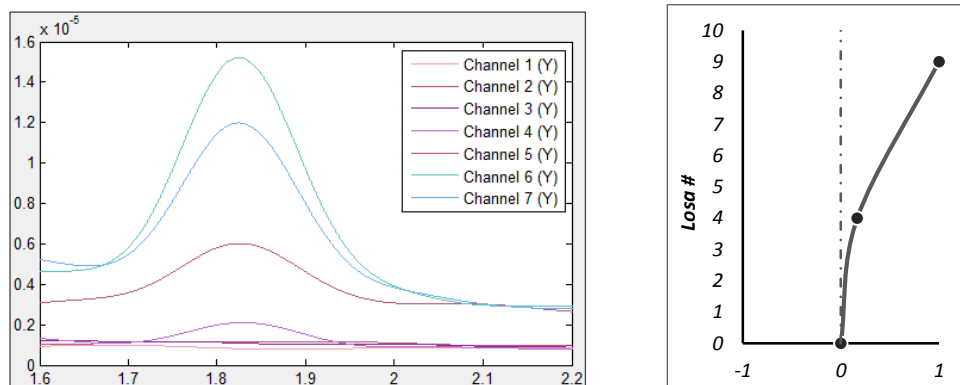


Figura No. 46. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].

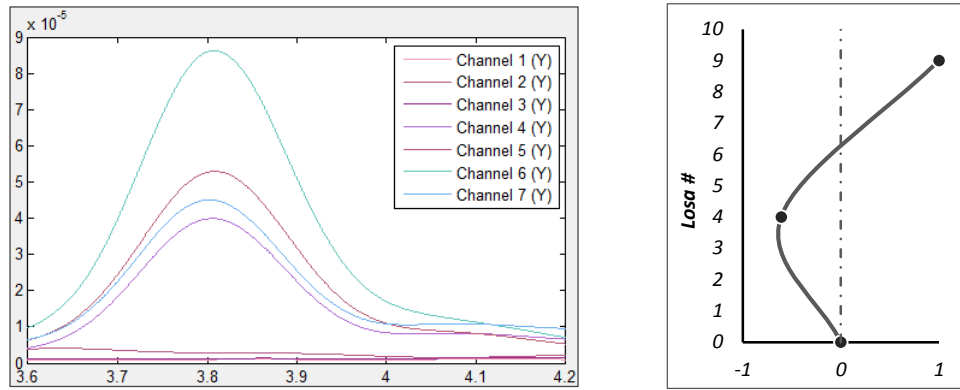


Figura No. 47. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 3.80 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].

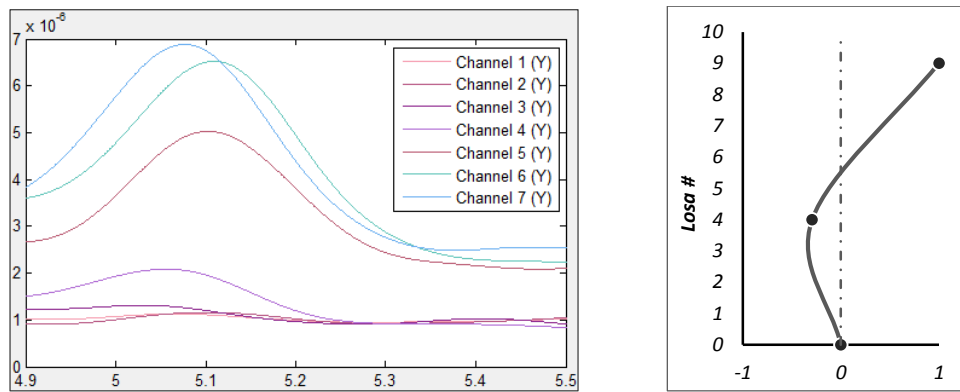


Figura No. 48. Forma modal preliminar asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.6) [Dirección Longitudinal].

Entre las formas modales identificadas se puede estar cobijando algunos modos superiores con curvaturas diferentes cuya forma no es posible concebir claramente aún, dado el poco número de niveles instrumentados (PVA No.6). Para complementar la información requerida se deben analizar las señales obtenidas de las pruebas en las que los sensores se disponen según la configuración No. 2 (PVA No.4). A continuación se presentan las formas modales obtenidas con dichas señales, para las frecuencias en cuestión:

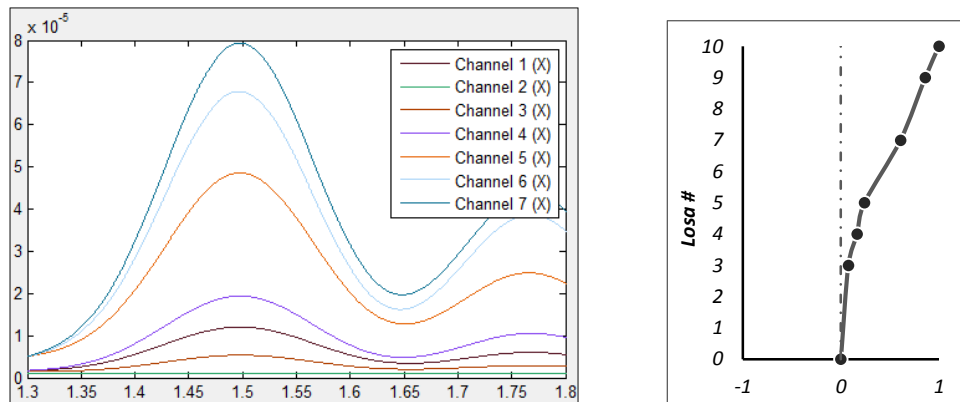


Figura No. 49. Forma modal asociada a la frecuencia 1.50 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].

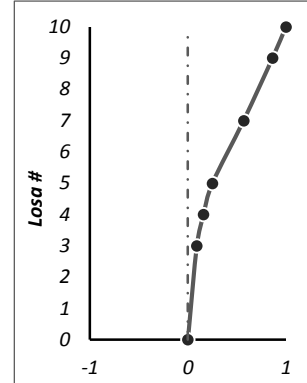
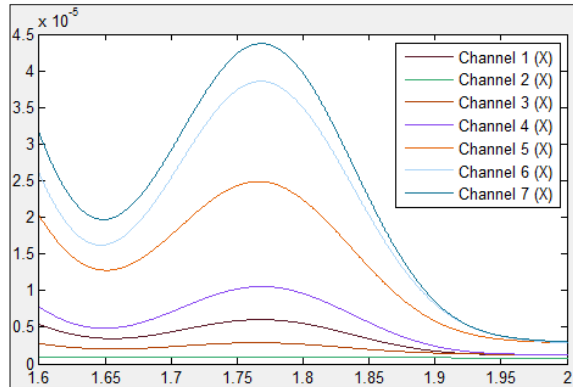


Figura No. 50. Forma modal asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].

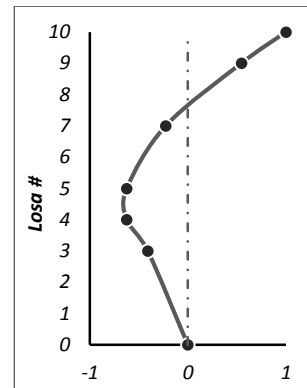
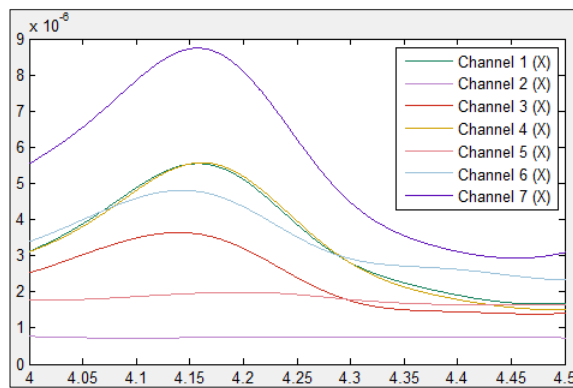


Figura No. 51. Forma modal asociada a la frecuencia 4.20 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].

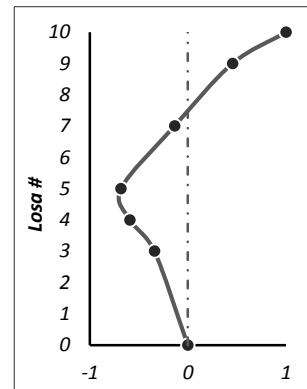
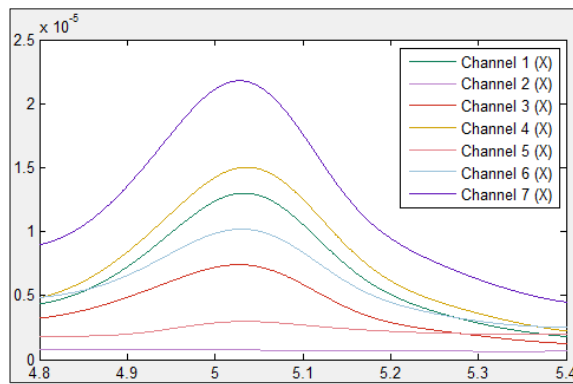


Figura No. 52. Forma modal asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.4) [Dirección Transversal].

De la misma manera para la dirección longitudinal:

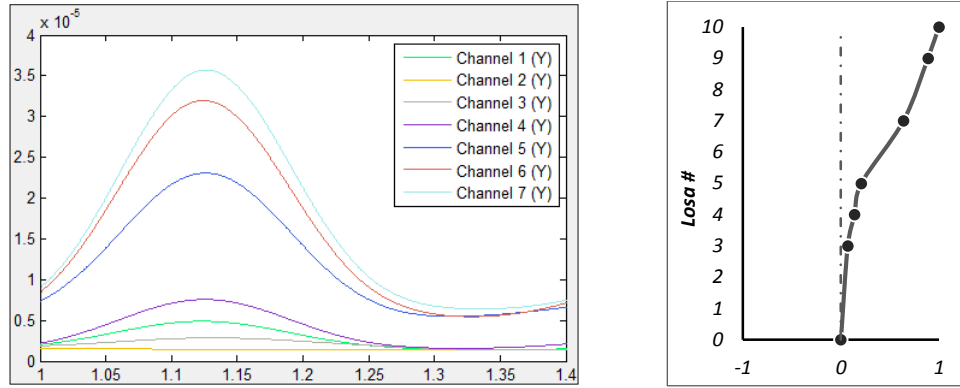


Figura No. 53. Forma modal asociada a la frecuencia 1.15 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].

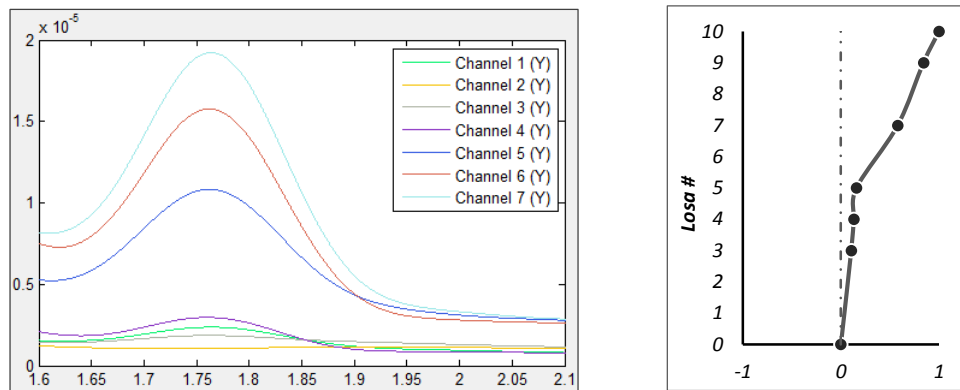


Figura No. 54. Forma modal asociada a la frecuencia 1.80 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].

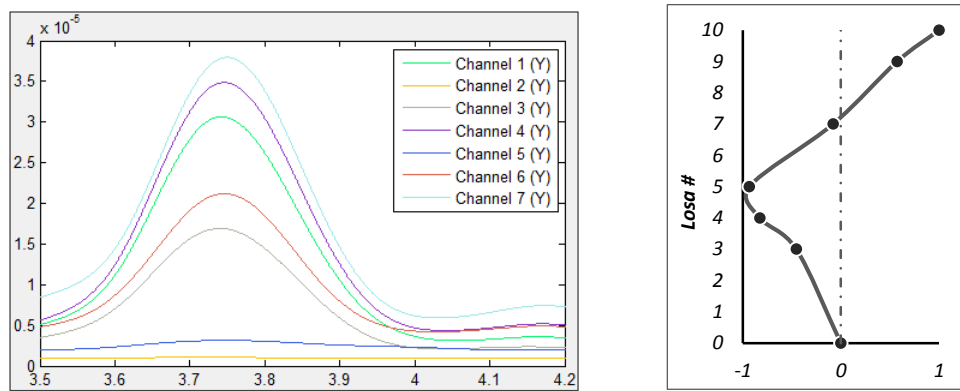


Figura No. 55. Forma modal asociada a la frecuencia 3.80 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].

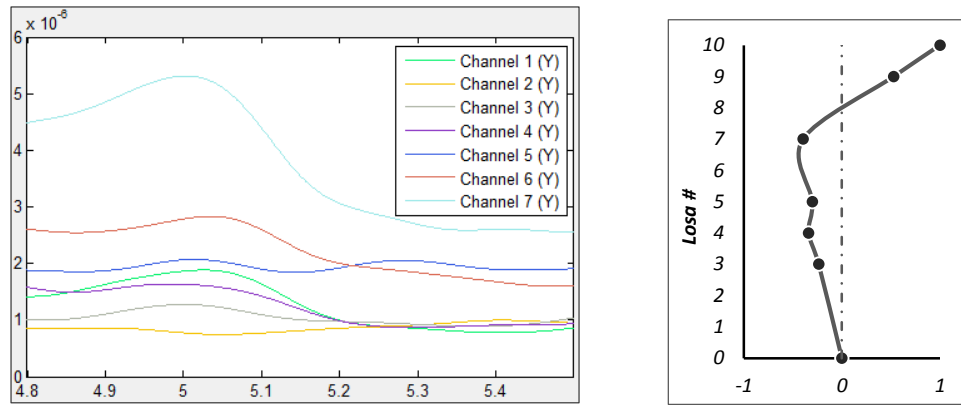


Figura No. 56. Forma modal asociada a la frecuencia 5.10 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].

La reaparición de las frecuencias 1.80 Hz y 5.10 Hz tanto en la dirección transversal como en la dirección longitudinal indica un posible modo de torsión del edificio, ya que es estas frecuencias se esperaría que las vibraciones tengan componentes de movimiento en ambas direcciones. Para admitir esta hipótesis se debe determinar el ángulo de respuesta entre los registros de dos puntos de un mismo nivel empleando la función espectral de fase. Puede calcularse entre los Sensores 06 y 07, o entre los Sensores 04 y 05, en la prueba No.6:

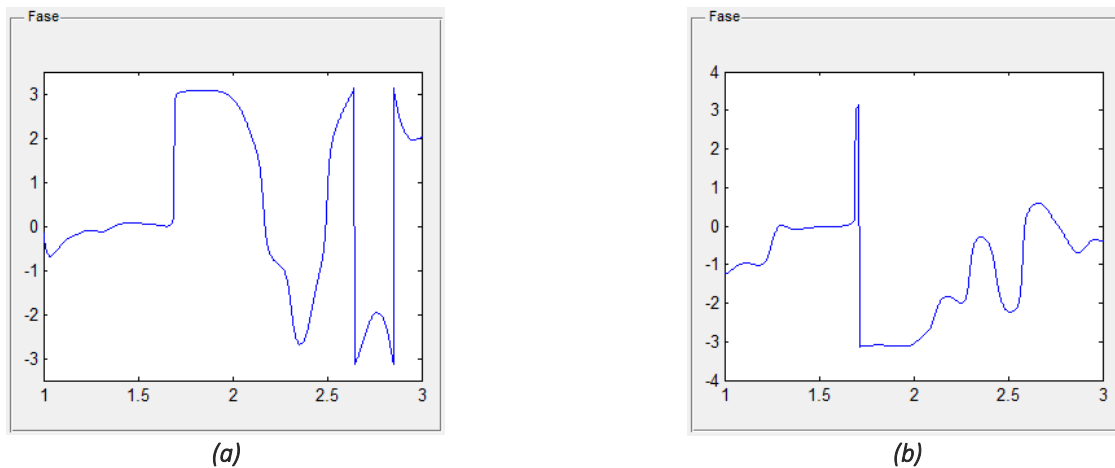
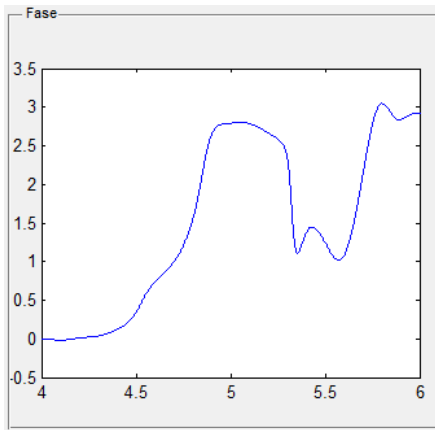
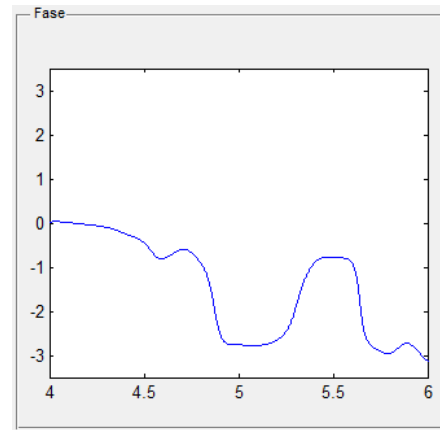


Figura No. 57. Ángulo de fase en 1.80 Hz [Dirección Transversal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.

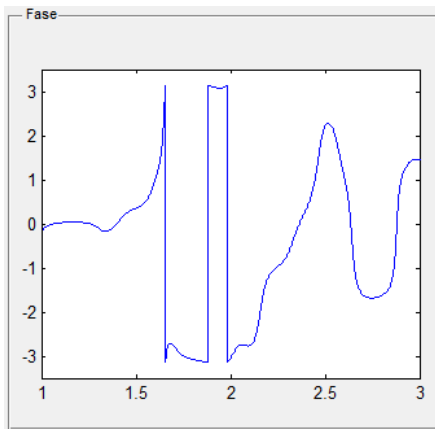


(a)

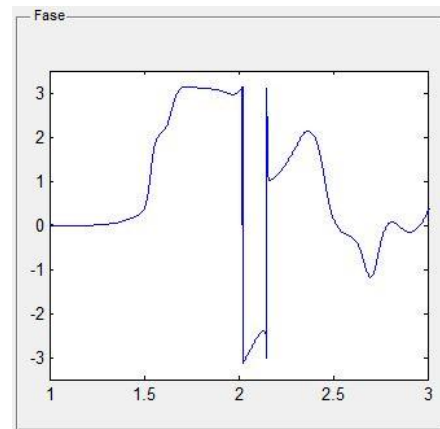


(b)

Figura No. 58. Ángulo de fase en 5.10 Hz [Dirección Transversal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.

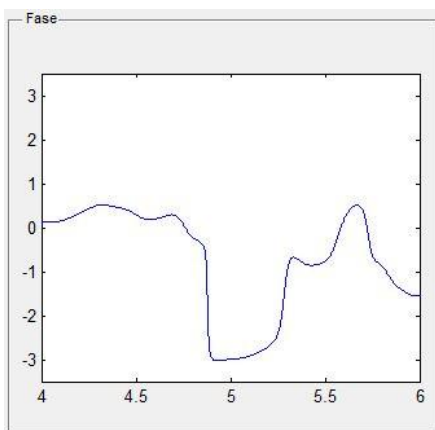


(a)

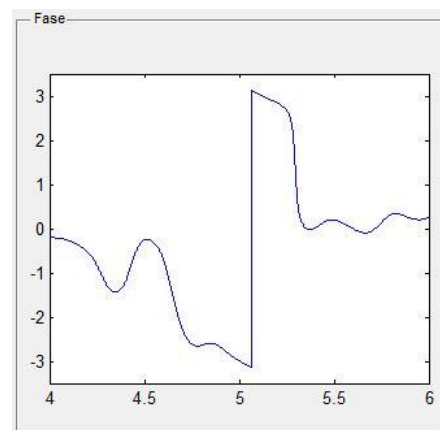


(b)

Figura No. 59. Ángulo de fase en 1.80 Hz [Dirección Longitudinal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.



(a)



(b)

Figura No. 60. Ángulo de fase en 5.10 Hz [Dirección Longitudinal]: (a) Registros de Sensores 04 y 05; (b) Registros de Sensores 06 y 07.

Los gráficos de fase confirman claramente la torsión en los modos asociados a las frecuencias 1.80 Hz y 5.10 Hz, marcando un desfase aproximado π o $-\pi$ entre dos puntos en un mismo nivel.

Un método adicional para determinar el comportamiento de los modos identificados para cada frecuencia, es el uso de la función de coherencia evaluada para las señales de dos puntos de medición diferentes, donde se debe reflejar el grado de dependencia de las variables analizadas. Si se calcula la función de coherencia entre señales de los niveles bajos y las de los niveles superiores de la estructura, se pueden observar las frecuencias en las que la correlación existente entre estos puntos del edificio es cercana a 1.0, indicando un alto nivel de dependencia entre su movimiento:

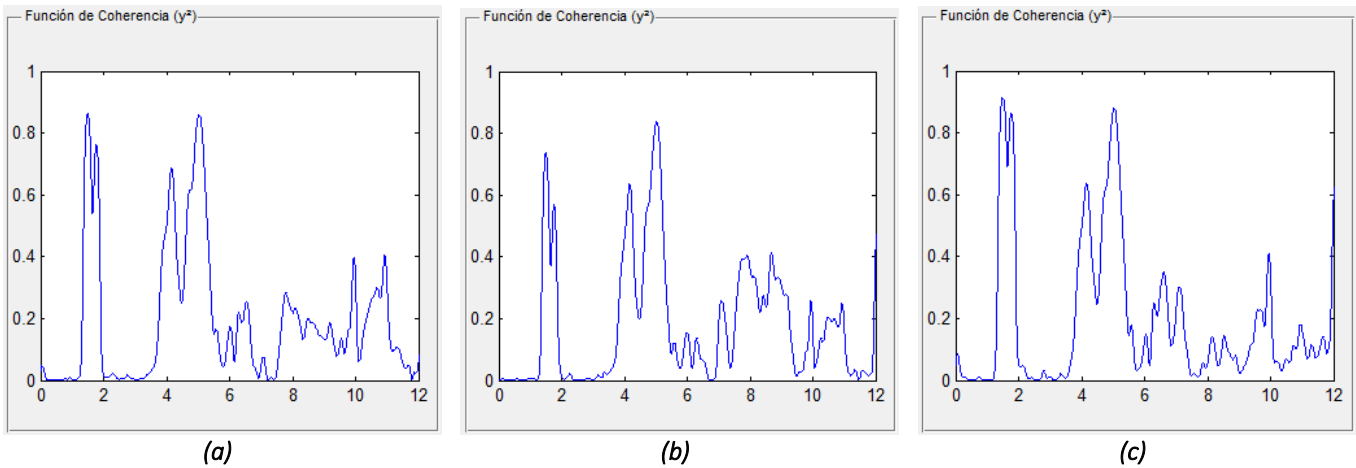


Figura No. 61. Funciones de coherencia espectral (PVA No.4) [Dir.T]: (a) Sensor 07 vs. Sensor 01; (b) Sensor 07 vs. Sensor 03; (c) Sensor 07 vs. Sensor 04.

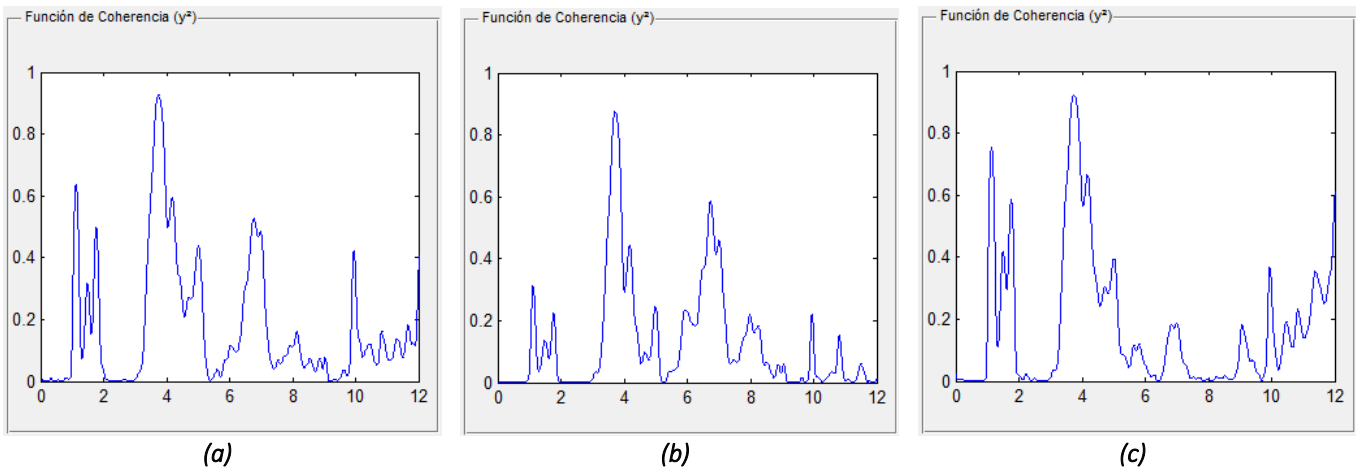


Figura No. 62. Funciones de coherencia espectral (PVA No.4) [Dir.L]: (a) Sensor 07 vs. Sensor 01; (b) Sensor 07 vs. Sensor 03; (c) Sensor 07 vs. Sensor 04.

La *Figura No. 61* presenta la función de coherencia para varias parejas de señales de pisos bajos y superiores, en cada dirección de análisis. Se validan entonces nuevamente las frecuencias predominantes del sistema: 1.50 Hz y 4.20 Hz para la dirección transversal; 1.15 Hz y 3.80 Hz para la dirección longitudinal; 1.80 Hz y 5.10 Hz que corresponden a modos de torsión. Sin embargo, se identifica una frecuencia importante en dirección longitudinal (*Figura No. 62*) alrededor de 6.70 Hz, correspondiente a un tercer modo de vibración de la estructura, reflejado además en los espectros de potencia de las señales en dicha dirección, y en los cocientes espectrales estimados para las señales generadas por el evento sísmico. No obstante, se evalúa la forma modal del sistema en esta frecuencia, con el procedimiento presentado anteriormente, con el fin de esclarecer el comportamiento de la estructura en esta frecuencia:

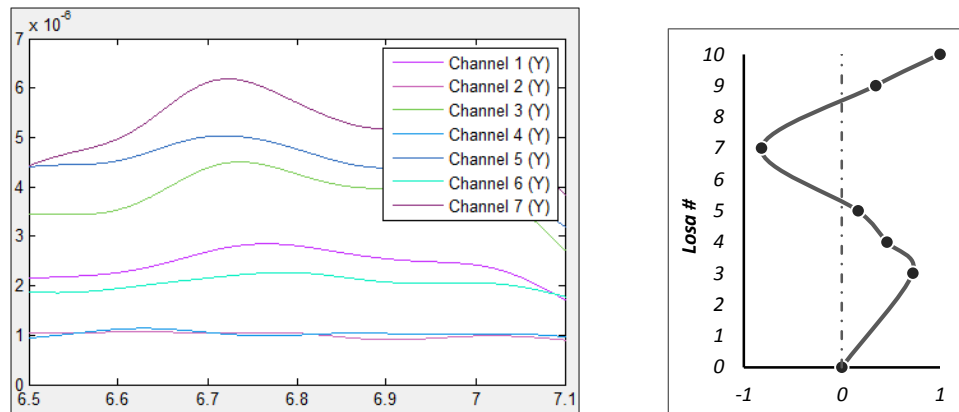


Figura No. 63. Forma modal asociada a la frecuencia 6.70 Hz (PVA No.4) [Dirección Longitudinal].

Así queda definida la componente en dirección longitudinal del tercer modo de vibración para la estructura estudiada.

La *Tabla No. 7* presenta en síntesis las frecuencias dinámicas de la estructura determinadas a partir del análisis espectral de señales producidas por vibraciones ambientales y movimiento sísmico; y las obtenidas del modelo analítico elaborado previamente.

En comparación con las frecuencias de vibración encontradas para el modelo analítico, se evidencia que tanto en la modelación como en el análisis de señales, la frecuencia natural del sistema se da en la dirección longitudinal:

Tabla No. 7. Comparación de frecuencias del sistema con modelación teórica.

Modo #	Dirección	Frecuencia - Hz [Modelo Analítico]	Periodo - s	Frecuencia - Hz [Análisis Espectral]	Periodo - s
1	L	0.85	1.18	1.15	0.87
2	T	1.14	0.88	1.50	0.67
3	V	1.25	0.80	1.80	0.56
4	L	2.86	0.35	3.80	0.26
5	T	3.85	0.26	4.20	0.24
6	V	4.55	0.22	5.10	0.20
7	L	6.25	0.16	6.70	0.15
8	T	7.69	0.13	-	-
9	V	8.33	0.12	-	-

Al comparar los valores de frecuencias encontrados a partir del análisis espectral de señales con respecto a las frecuencias del modelo analítico se evidencia variaciones que pueden obedecer a la magnitud de las amplitudes de vibración ambiental. Los movimientos se consideran tan pequeños que las propiedades de los materiales en los elementos estructurales se encuentran siempre en el rango de comportamiento elástico; mientras que en el modelo teórico se considera que el módulo elástico del concreto depende de la relación empírica existente con la resistencia a la compresión de los especímenes ensayados durante la construcción; elementos que se llevaron hasta la condición de falla, cuando ya abandonaban el comportamiento netamente elástico. Esta posible dependencia de las frecuencias de vibración con las amplitudes del movimiento se ha evidenciado también en otros estudios (Muriá V., 2007).

CÁLCULO DE AMORTIGUAMIENTO

Como bien se presenta en la metodología, el amortiguamiento del sistema se calcula a partir de la respuesta de la estructura ante movimientos que en este caso son de naturaleza aleatoria; mediante la determinación del ancho de banda sobre cada una de las frecuencias modales ya identificadas. Adicionalmente se corrigen los valores encontrados con el ancho de banda, con base en el método propuesto por (Boroschek K. & Hernández P., 2010).

Para el cálculo del ancho de banda se toman como referencia los dos primeros modos de vibración, dada su claridad en las funciones espectrales y cantidad de energía liberada por el sistema en cada uno de ellos. Las *Tabla No. 8* y *Tabla No. 9* presentan los valores de amortiguamiento corregido obtenido para cada modo en direcciones transversal y longitudinal:

Tabla No. 8. Corrección de amortiguamiento [Dir.T].

Duración de Ventana [s]	5	10	20	41	82	164
# Puntos	1024	2048	4096	8192	16384	32768
# Ventanas	512	256	128	64	32	16
f_1	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
f_2	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
b_1	16.9%	5.2%	3.3%	2.0%	1.6%	0.7%
b_2	7.2%	4.8%	4.5%	-	-	-
$b_{1\text{ cor}}$	17.4%	1.2%	1.7%	1.4%	1.6%	0.5%
$b_{2\text{ cor}}$	5.9%	4.3%	4.3%	-	-	-
N_{c1c1}	7.8	15.7	31.3	62.7	125.3	250.7
N_{c1c2}	21.5	43.0	86.0	172.0	344.1	688.1

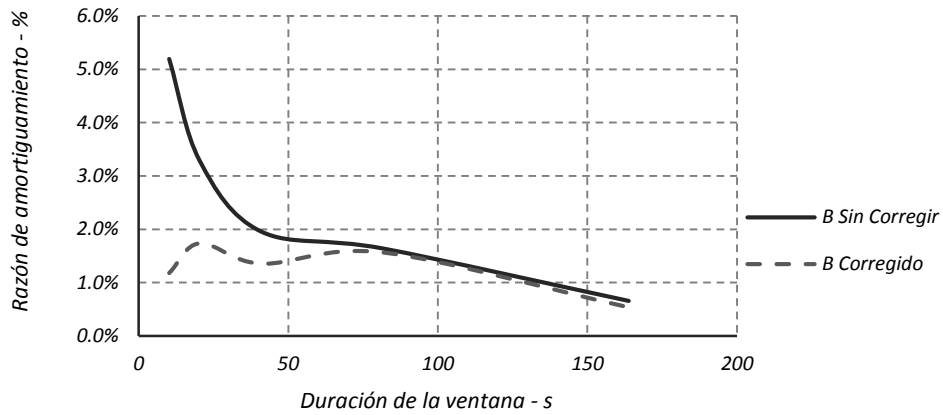


Figura No. 64. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=1.50$ Hz [Dir.T].

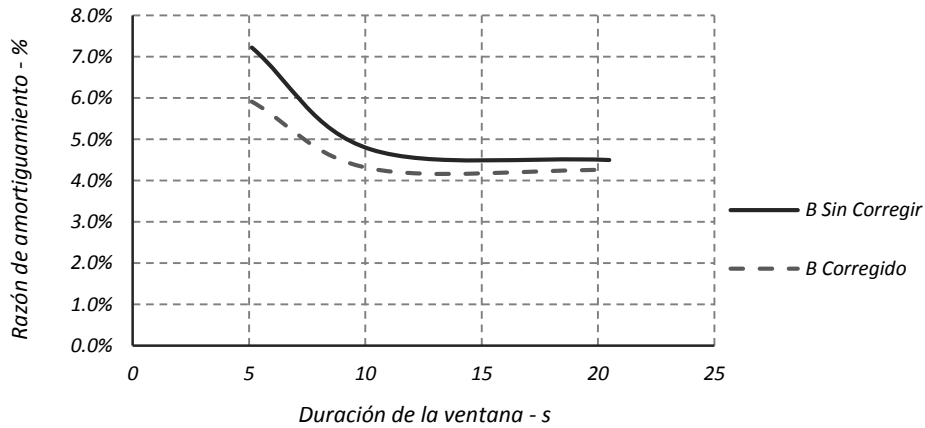


Figura No. 65. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=4.20$ Hz [Dir.T].

En las *Figura No. 64* a *Figura No. 67* se evidencia la tendencia de cambio en los valores de amortiguamiento según el tamaño de los tramos de señal utilizados para el cálculo del ancho de banda. Esta variación se estabiliza con el uso de la regresión propuesta para la corrección del amortiguamiento, obteniendo valores casi constantes en función del número de puntos utilizados para el análisis. De forma aproximada, se puede decir que en promedio, el sistema tiene un amortiguamiento crítico de 1.30% para el primer modo y entre 2.00% y 5.00% para el segundo modo.

Tabla No. 9. Corrección de amortiguamiento [Dir.L].

Duración de Ventana [s]	5	10	20	41	82	164
# Puntos	1024	2048	4096	8192	16384	32768
# Ventanas	512	256	128	64	32	16
f_1	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
f_2	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80
b_1	16.9%	6.9%	3.9%	2.2%	1.3%	1.3%
b_2	4.9%	2.9%	2.1%	1.1%	-	-
$b_{1\text{ cor}}$	10.0%	1.8%	1.6%	1.1%	0.9%	1.3%
$b_{2\text{ cor}}$	2.2%	1.8%	1.8%	1.7%	-	-
N_{c1c1}	5.9	11.8	23.6	47.1	94.2	188.4
N_{c1c2}	19.5	38.9	77.8	155.6	311.3	622.6

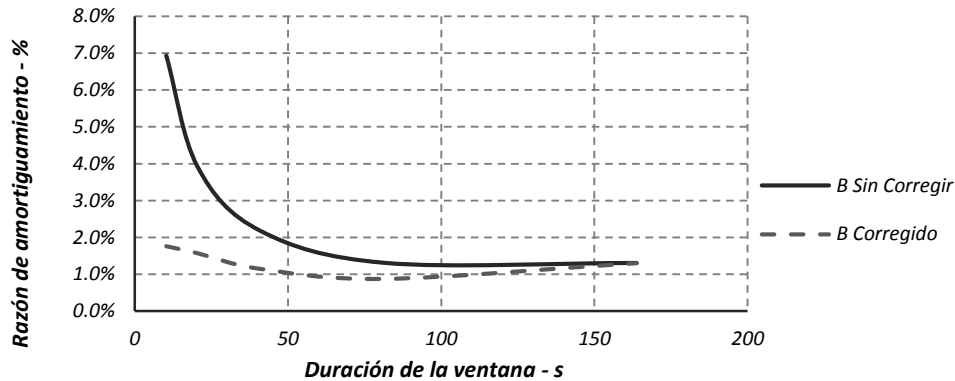


Figura No. 66. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=1.15$ Hz [Dir.L].

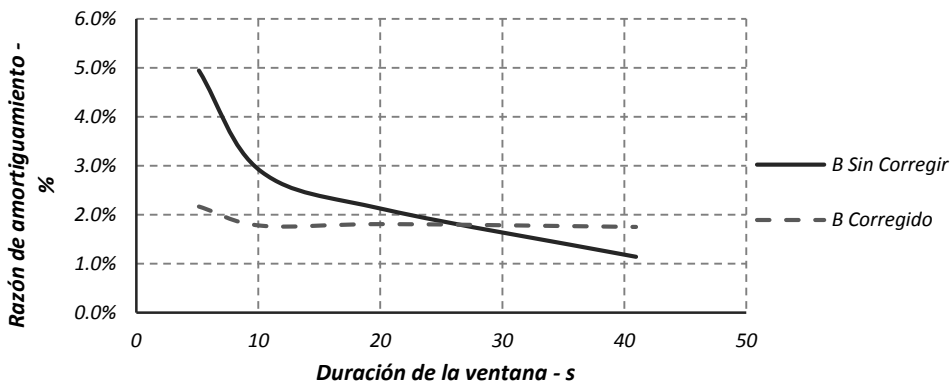


Figura No. 67. Corrección del amortiguamiento crítico para $f=3.80$ Hz [Dir.L].

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron las propiedades dinámicas del edificio de ingenierías de la universidad EAFIT instrumentado con una red integrada de acelerómetros de tipo triaxial, empleando la metodología de identificación de sistemas a partir del análisis espectral de señales. El análisis se realizó para señales provenientes tanto de vibraciones ambientales como de movimientos producto de eventos sísmicos de baja magnitud.

Durante el proceso de instrumentación se hicieron mediciones del ruido cultural producto de las condiciones de uso de la estructura, las actividades humanas en las zonas aledañas, los parámetros ambientales, etc; de las cuales se encontraron los valores máximos presentados en la *Figura No. 14*, con un valor promedio de 1.30 Gal. También se calcularon y corrigieron los desfases en las señales debidos a inclinaciones de los acelerómetros o cambios en la temperatura del lugar que varían con respecto a la temperatura del país en el cual se calibraron los equipos. La *Figura No. 13* muestra la variación de los desfases, de los cuales se obtuvo un valor máximo de 1.50 Gal en cubierta y 0.50 Gal en la base. Estos valores hacen evidente la dificultad para lograr registrar e identificar eventos sísmicos de baja magnitud, ya que con un nivel de ruido ambiental tan alto, no es posible observar dentro de la señal el arribo de las ondas sísmicas en caso de un movimiento fuerte.

Para la identificación preliminar de las frecuencias del sistema se analizaron los espectros de potencia de las señales obtenidas de las pruebas de vibración ambiental con la configuración instrumental No. 1. Los espectros destacan las frecuencias 1.50 Hz, 1.80 Hz, 4.20 Hz, 5.10 Hz y 6.00 Hz en la dirección transversal (Dir. X) y las frecuencias 1.15 Hz, 1.80 Hz, 3.80 Hz, 5.10 Hz y 6.70 Hz en la dirección longitudinal (Dir. Y). Un primer indicio de su veracidad se da al comparar los espectros de diferentes pruebas en el tiempo: las frecuencias en cuestión se reflejan constantes en pruebas independientes, lo que indica que son frecuencias asociadas a la estructura estudiada; de no ser así, desaparecerían según la ausencia de su fuente dinámica.

La instrumentación de la estructura orientada al monitoreo se realizó a partir de la instalación de la red de acelerómetros digitales en los puntos estratégicos de mayores movimientos que fueran representativos del comportamiento de todo el edificio. Con el fin de registrar eventos sísmicos importantes se estableció un umbral de disparo de 0.5 Gal para los sensores en la base y 1.0 Gal para sensores en niveles superiores. De este monitoreo se obtuvo el registro de un evento sísmico de magnitud $M_L = 3.90$ y profundidad 148 km localizado cerca de los Santos (Santander) a unos 280 km de Medellín, aproximadamente.

Al analizar las señales obtenidas de dicho registro, se encontró consistencia de las posibles frecuencias de la estructura en los espectros de potencia con respecto a las que se identificaron con los espectros de las señales obtenidas de las pruebas de vibración ambiental. Sin embargo, se validaron nuevamente con otras funciones espectrales como el cociente espectral y se encontró coherencia entre los picos de frecuencia de esta función y los valores que se venían analizando como posibles modos dinámicos del sistema, aprobando así la hipótesis de uso de los cocientes espectrales para movimientos producidos por eventos sísmicos, en los que las vibraciones en la estructura se deben a una perturbación de carácter fuerte en su base, por lo que es adecuado extraer del espectro de potencia en la cubierta [Sensores 06 y 07 (CB)] las frecuencias del espectro en la base [Sensores 01, 02 y 03 (S1)] mediante la relación entre ellos.

Para la determinación de las formas modales del sistema fue necesario complementar la información obtenida de las pruebas No. 1, 2, 3, 5 y 6, dada la poca claridad en las formas de los modos superiores. Para ello se recurre a la prueba No.4, en la que se disponen los equipos de medición según la configuración No.2, la cual propone la

colocación de todos los acelerómetros en una misma línea vertical, con el fin de medir la mayor cantidad de niveles del edificio. Como resultado de ello, se encuentran las mismas frecuencias que se vienen analizando tal como se esperaba, y ahora es posible identificar con claridad las formas modales asociadas a las frecuencias del segundo modo siguiendo la metodología estudiada, en la cual se construyen las formas modales empleando además de las amplitudes de cada señal, el ángulo de fase relativo entre cada punto instrumentado. Finalmente se consigue graficar las formas asociadas al primer modo [1.15 Hz (Dir. L); 1.50 Hz (Dir. T); y 1.80 Hz (Dir. V)], y segundo modo [3.80 Hz (Dir. L); 4.20 Hz (Dir. T); y 5.10 Hz (Dir. V)].

Complementando el análisis de la información contenida en los resultados de la prueba No.4, se estiman las funciones de coherencia para varias parejas de señales en cada dirección. De esta manera se descubren valores de coherencia cercanos a 1.0 en las frecuencias de interés, además de un pico de frecuencia destacado en 6.70 Hz correspondiente a un tercer modo en dirección longitudinal, que es validado con determinación de su forma modal, la cual es coherente con el comportamiento esperado. Se encuentra también que para los modos de torsión, la coherencia debe estimarse entre señales de puntos distanciados en altura, entre los cuales se diferencie notablemente su movimiento; si se evalúa el comportamiento entre dos niveles contiguos en un modo de torsión, la coherencia no se reflejará de forma tan clara como con un nivel más lejano, ya que ambos puntos parecerán vibrar de forma muy similar.

Finalmente se puede decir con respecto a la identificación de los modos superiores del sistema, que el alto nivel de ruido en la estructura acompañado de las bajas amplitudes del espectro de potencia en estas frecuencias dificulta su visualización, por lo que se recomienda acudir a todas las herramientas posibles de análisis espectral que relacionen señales de las que ya se comprenda un poco su comportamiento, como fue en este caso estimar la función de coherencia entre un nivel bajo y otro superior, cuya relación debería mostrar una dependencia alta en caso de responder a una frecuencia del sistema.

Al comparar los valores de frecuencias encontrados a partir del análisis espectral de señales con respecto a las frecuencias del modelo analítico se evidencia variaciones que pueden obedecer a la magnitud de las amplitudes de vibración ambiental. Los movimientos se consideran tan pequeños que las propiedades de los materiales en los elementos estructurales se encuentran siempre en el rango de comportamiento elástico; mientras que en el modelo teórico se considera que el módulo elástico del concreto depende de la relación empírica existente con la resistencia a la compresión de los especímenes ensayados durante la construcción; elementos que se llevaron hasta la condición de falla, cuando ya abandonaban el comportamiento netamente elástico. Esta posible dependencia de las frecuencias de vibración con las amplitudes del movimiento se ha evidenciado también en otros estudios (*Muriá V., 2007*).

REFERENCIAS

- AIS, A. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - Decreto 926 del*. Bogotá, D.C.
- AIS, A. C. (1997). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismoresistente - Ley 400*. Bogotá D.C.
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (1993). *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis* (2nd ed. ed.). New York, United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Boroschek K., R., & Hernández P., F. (2010). Corrección de sobrestimación del amortiguamiento en el método del ancho de banda del espectro de potencia. *10 Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.
- Clough, R. W., & Peinzen, J. (2003). *Dynamics of Structures* (Third Edition ed.). Berkeley, CA: Computers & Structures, Inc.
- CSI, C. a. (2005). *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley, CA.
- CSI, C. a. (s.f.). *Extended 3D Analysis of Building Systems ETABS*. Berkeley, CA.
- De Silva, C. W. (2007). *Vibration, Fundamentals and Practice* (2th ed.). Taylor & Francis Group.
- Henao A., D. (2013). *Identificación de las Propiedades Dinámicas de una Estructura Sometida a Vibración Ambiental empleando Análisis Espectral*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Muriá V., D. (2007). *Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados*. Mexico, D.F.: Academia de Ingeniería A.C.
- Newland, D. E. (1993). *Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis* (Third Edition ed.). England: Pearson Education.
- Osorio M., R. (2008). *Estudio de Suelos - Edificio Escuela de Ingeniería Universidad EAFIT*. Medellín.
- Restrepo, D., & Jaramillo, J. D. (2008). Identificación de propiedades dinámicas de estructuras considerando efectos de interacción suelo-estructura (caso de estudio). *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 8(2), 135-150.
- Rochel A., R. (2007). *Hormigón Reforzado*. Medellín: Universidad EAFIT.
- SGC, S. (28 de Octubre de 2013). *RED SISMOLÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA - CONSULTAS DE SISMICIDAD*. Recuperado el Octubre de 2013
- Sísmica, A. C. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, D.C.
- Welch, P. (Junio de 1967). The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A method based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, AU-15(2), 70-73.