



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

*“COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS  
DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES UBICADOS EN ZONAS  
GEOTÉCNICAS DIFERENTES”*

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL - ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

**ING. ENRIQUE SILVA LANG**



TUTOR:  
**M. EN I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ**

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Amado Gustavo Ayala Milian

Secretario: Dr. Oscar López Bátiz

Vocal: M. en I. Octavio García Domínguez

1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Juan José Pérez Gavilán Escalante

2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Darío Rivera Vargas

Lugar donde realizó la tesis:

Secretaría de Posgrado e Investigación, Facultad de Ingeniería, UNAM, Circuito escolar exterior, Cd. Universitaria, Coyoacán, México, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

M. EN I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

---

**FIRMA**

### *Agradecimientos*

*A mis profesores y amigos del posgrado, ya que a pesar de que estudiar el posgrado obedeció al deseo personal por lograr un extra por cuenta propia, concluir con esta etapa se debe en gran medida a su comprensión, consejos y apoyo.*

“COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES  
UBICADOS EN ZONAS GEOTÉCNICAS DIFERENTES”

ÍNDICE

	<i>Página</i>
<b>ÍNDICE</b>	<i>i</i>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<i>iv</i>
<b>CAPÍTULO 1. MONITOREO Y TÉCNICAS DE SUPERVISIÓN DE ESTRUCTURAS EN INGENIERÍA CIVIL</b>	
<b>1.1. IMPORTANCIA DE LA INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS</b>	<i>1</i>
<b>1.2. METODOLOGÍAS PARA LA ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN</b>	<i>3</i>
<b><u>1.2.1. Inspección visual</u></b>	<i>3</i>
<b><u>1.2.2. Inspección detallada</u></b>	<i>5</i>
<b>1.2.2.1. Técnicas aplicadas a elementos</b>	<i>5</i>
<u>A) Pruebas destructivas en elementos</u>	
A.1. Corazones de concreto	
A.2. Pruebas de extracción	
A.3. Prueba a tensión	
A.4. La carbonatación	
A.5. Determinación del contenido de cloruros	
<u>B) Pruebas no destructivas en elementos</u>	
B.1. El esclerómetro	
B.2. Métodos electromagnéticos	
B.3. Radiografía	
B.4. Métodos de radar o acústicos	
B.5. Pruebas con medios penetrantes	
B.6. Prueba con partículas Magnéticas	
<b>1.2.2.2. Pruebas sobre la estructura completa</b>	<i>11</i>
<u>A) Pruebas de carga estática</u>	
<u>B) Pruebas de carga dinámica</u>	
B.1. Pruebas semidestructivas	
Prueba de vibración forzada	
Vibrador de rotación excéntrica de masas	
Vibrador electro-hidráulico	
Masas de impacto	
Tracción lateral	
<u>C) Pruebas de vibración ambiental</u>	

“COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES  
UBICADOS EN ZONAS GEOTÉCNICAS DIFERENTES”

ÍNDICE

	<b>1.2.2.3. Instrumentos de medición</b>	<b>14</b>
	<u>A). Instrumentos típicos para medir parámetros geométricos.</u>	
	A.1. Extensómetro mecánico de alambre y/o cinta.	
	A.2. Potenciómetro	
	A.3. Galgas	
	<u>B). Sistemas avanzados</u>	
	B.1. Medidas geodésicas	
	B.2. Triangulación	
	B.3. GPS	
	B.4. Medidas de desviación láser (Radar de coherencia láser)	
	B.5. Sensores de fibra óptica	
	<b>1.3. MÉTODOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS E IDENTIFICACIÓN DE DAÑO</b>	<b>20</b>
	<u>1.3.1. Métodos basados en cambios de las frecuencias de resonancia</u>	<b>21</b>
	<u>1.3.2. Detección de daño basado en el vector modal residual</u>	<b>22</b>
	<u>1.3.3. Métodos basados en la curvatura de la forma modal</u>	<b>23</b>
	<u>1.3.4. Métodos de actualización de matriz</u>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 2.</b>	<b>ANÁLISIS DE SEÑALES PARA DETERMINAR PROPIEDADES DINÁMICAS EN ESTRUCTURAS</b>	
	<b>2.1. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES</b>	<b>26</b>
	<b>2.2. ANÁLISIS DE SEÑALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA</b>	<b>27</b>
	<b>2.3. OTROS MÉTODOS DE ANÁLISIS</b>	<b>30</b>
	<u>2.3.1. La Transformada de Hilbert</u>	<b>31</b>
	<u>2.3.2. La Transformada Wavelet</u>	<b>33</b>
	<b>2.4. LA INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL</b>	<b>35</b>
	<u>2.4.1. Adquisición de los datos</u>	<b>36</b>
	<u>2.4.2. División de señal y aplicación de ventanas de atenuación (enventanado)</u>	<b>36</b>
	<u>2.4.3. Filtrado.</u>	<b>37</b>
	<b>2.5. INSTRUMENTOS VIRTUALES DESARROLLADOS PARA EL ANÁLISIS DE SEÑALES</b>	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO 3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS</b>	
	<b>3.1. ANTECEDENTES</b>	<b>59</b>
	<b>3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y ESTRUCTURALES</b>	<b>60</b>
	<u>3.2.1. Edificio Exconasupo</u>	<b>60</b>
	<u>3.2.2. Edificio Insurgentes Sur 1931</u>	<b>62</b>

“COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE EDIFICIOS DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES  
UBICADOS EN ZONAS GEOTÉCNICAS DIFERENTES”

ÍNDICE

<u><i>3.2.3. Edificio Reforma 116</i></u>	63
<u><i>3.2.4. Edificio Reforma 51</i></u>	65
<b>CAPÍTULO 4. DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS EDIFICIOS</b>	
<i>4.1 EDIFICIO EXCONASUPO</i>	67
<u><i>4.1.1 Tipo de instrumentación</i></u>	67
<u><i>4.1.2. Datos recabados</i></u>	69
<u><i>4.1.3. Propiedades dinámicas</i></u>	72
<i>4.2. EDIFICIO INSURGENTES SUR 1931</i>	81
<u><i>4.2.1. Tipo de instrumentación</i></u>	81
<u><i>4.2.2. Datos recabados</i></u>	82
<u><i>4.2.3. Propiedades dinámicas</i></u>	83
<i>4.3. EDIFICIO REFORMA 116</i>	91
<u><i>4.3.1. Tipo de instrumentación</i></u>	91
<u><i>4.3.2. Datos recabados</i></u>	92
<u><i>4.3.3. Propiedades dinámicas</i></u>	94
<i>4.4. EDIFICIO REFORMA 51</i>	99
<u><i>4.4.1. Tipo de instrumentación</i></u>	99
<u><i>4.4.2. Datos recabados</i></u>	100
<u><i>4.4.3. Propiedades dinámicas</i></u>	102
<i>4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS</i>	107
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	109
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	112

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, conocer el comportamiento que puede experimentar una estructura a través de la determinación de las propiedades dinámicas, es una actividad que ocupa un amplio campo de investigación. El conocimiento de estos parámetros de forma confiable, juega un papel trascendente en la búsqueda de soluciones racionales para la evaluación del nivel de seguridad que ofrecen a sus usuarios y, de ser necesario, proponer diversas alternativas de reforzamiento de modo que se cumpla con lo establecido en la reglamentación. Para ello lo usual es valerse de una serie de estudios que permiten conocer la “salud” de la estructura, desde el estado de los materiales que conforman sus elementos, hasta la interacción de dichos elementos para conformar un todo.

Teniendo en mente esta situación, el trabajo aquí presentado tiene como objetivos desarrollar una herramienta de cómputo para la determinación de las propiedades dinámicas de edificios (instrumento virtual) y mediante el uso de esta, realizar el estudio y comparación de estos parámetros dinámicos para cuatro estructuras existentes, con características estructurales y geométricas similares pero diferente ubicación dentro de la zonificación geotécnica, que establecen las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del RCDF, lo cual es de interés para evaluar su comportamiento dinámico. Un parámetro importante es el empleo de registros obtenidos de vibración ambiental y de temblores reales.

En el primer capítulo se hace una revisión generalizada del estado del arte en materia de los diversos procedimientos e instrumentos existentes para reunir información, cabiendo aclarar que por tratarse de un área en constante evolución el espacio dedicado a ello tiene carácter informativo, pues resultaría insuficiente de querer tratar a detalle lo expuesto.

A partir del capítulo 2, de igual forma se trata el tema de los elementos que permiten hacer uso de la información recabada enfocándose en lo particular al tema de análisis de señales, adentrándose poco a poco en las bases del análisis de Fourier que concierne a la metodología empleada para las estructuras estudiadas aquí, no sin antes tomar en cuenta las perspectivas hacia las cuales apuntan las más recientes aplicaciones, pero sin embargo, están fundamentadas de algún modo en la teoría de Fourier.

La importancia de este capítulo radica en que dada la gran cantidad de información recabada, resulta conveniente contar con herramientas de cómputo que faciliten el manejo de información y análisis numérico de la misma. Es por ello que, en este trabajo se presenta la formulación, desarrollo en computadora y empleo de los llamados “Instrumentos Virtuales”, que tienen la finalidad de llevar a cabo el preproceso y análisis de señales de aceleración vs. tiempo registradas en estructuras, generalmente edificios, sometidas a vibraciones ambientales y sísmicas, con objeto de obtener sus propiedades dinámicas. Dichos instrumentos fueron desarrollados en ambiente LabVIEW que posee además de cierta facilidad para su utilización, algunas herramientas para el proceso y depuración de señales, entre ellas la implementación numérica de la transformada de Fourier, permitiendo estudiar señales en el dominio de la frecuencia, realizando el cálculo simultáneo de diversas funciones de correlación como la coherencia, fase y cocientes espectrales; mediante las cuales resulta eficiente la identificación de los periodos o frecuencias propias de vibrar de un sistema estructural instrumentado.

Para mostrar la utilidad de estos instrumentos en el campo de la ingeniería estructural, en el capítulo 3, se introduce el estudio de cuatro edificios, mostrando las principales características de cada uno de ellos, siendo de particular interés la existencia de algunas similitudes entre si, como son: materiales de construcción, el número de niveles y tipo de estructuración empleada, sin embargo, a sabiendas de que cada uno cuenta con sus propias particularidades; la principal, su ubicación en distintas zonas geotécnicas según la normativa del Distrito Federal.



Profundizando en el estudio de estos edificios, dentro del capítulo 4, se presenta la distribución de arreglos de los equipos y registros de señales adquiridos, contándose con una basta colección tanto producto de vibración ambiental como forzada. Tras el preproceso, se emplean los instrumentos virtuales para efectuar el análisis numérico de las señales que conducirá a la obtención de las propiedades dinámicas de interés, consiguiéndose la definición del comportamiento particular de una estructura, en específico: las frecuencias de vibrar, formas modales y los amortiguamientos críticos. De modo que con el conocimiento de estos parámetros en un paso subsecuente se elaboren modelos analíticos confiables para caracterizar el comportamiento e identificar el estado en el que se encuentran estos edificios de los cuales resulta de interés particular observar cual es su respuesta ante diferentes sollicitaciones dinámicas y estáticas, dicha metodología es aplicable no solo a edificios, sino a puentes o cualquier estructura capaz de idealizarse como una barra en vibración.

## 1. MONITOREO Y SUPERVISIÓN DE ESTRUCTURAS EN INGENIERÍA CIVIL

### 1.1. IMPORTANCIA DE LA INSPECCIÓN DE ESTRUCTURAS

La población depende de una infraestructura cada vez más extensa y compleja para prosperar o bien mantener las actividades económicas y sociopolíticas que le permitan llevar una calidad de vida adecuada o al menos aceptable, sin embargo, dicha infraestructura no se renueva a la velocidad que esta exige. En el caso particular de la infraestructura civil, son numerosos los puentes, carreteras y edificios ya sea en manos gubernamentales o particulares que, significativamente, han excedido la capacidad de servicio inicialmente concebida, apreciándose los efectos de factores como la corrosión y deformación.

En otros casos, adecuaciones a las necesidades nacientes y el paso del tiempo provocan cambios en las estimaciones y usos para los que dicha infraestructura fue originalmente proyectada, haciéndola caer en el incumplimiento de la normatividad vigente expresada en los reglamentos de construcción, generalmente renovados con la incorporación de criterios de diseño más rigurosos, pero siempre teniendo en mente salvaguardar la seguridad de la estructura y de sus usuarios, traduciéndose en un envejecimiento total de las instalaciones, que exige rehabilitación, remodelación o reemplazo. Como agravante de esta situación, se presenta generalmente la falta de los recursos requeridos para remediar este problema o bien, no están disponibles con la fluidez que se desearía, aunándose la escasa cultura de prevención y mantenimiento que, en torno a las estructuras, se tiene en los países poco desarrollados. Como es de imaginarse, uno de los factores esenciales que llevan a esta situación, es la falta de mantenimiento e inspección, ya que generalmente cuando esta se llega a realizar, es por que existen manifestaciones de una situación anómala que, deriva en problemas que, por la gravedad del daño requieren medidas drásticas y onerosas, cuando, de haberse realizado una detección temprana, la reparación inicial pudiera ser de menor impacto e inclusive ofrecer mejores resultados.

Ante las circunstancias antes mencionadas, habitualmente se recurre a una serie de materiales y metodologías que permiten mejorar o restituir la condición de una estructura, no obstante, la decisión sobre cual aplicar dependerá, en principio, del nivel de rehabilitación o bien de la gravedad del daño. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la condición necesaria para determinar dicho nivel y poner en marcha el proceso de rehabilitación, radica en la inspección de la estructura, la cual entre mas continúa y detallada sea está, podrá ofrecer mejores resultados. En este sentido, los recientes avances, sobre todo en el campo de la electrónica, proporcionan herramientas cada vez más poderosas como la tecnología láser e inalámbrica, por mencionar algunas, cuya aplicación deja entre ver el desarrollo de nuevas técnicas y, de forma inmediata, la evolución de las existentes, con la capacidad de proporcionar gran información de una estructura. Además, la colaboración con el campo de la informática (computación) permite una considerable velocidad en el proceso de análisis para mejorar nuestro entendimiento del comportamiento y estado de la misma, mientras paralelamente se abaten tiempos y por consiguiente costos.

Idealmente los niveles y estrategias óptimas de mantenimiento, se deben plantear y resolver desde una perspectiva de análisis de costos, en el cual se compare la vida útil de la estructura contra el nivel de seguridad conforme transcurre el tiempo, aumentando el nivel de seguridad según se requiera, de forma que se garanticen minimamente las condiciones últimas, *fig.1.1*, buscando reducir razonablemente el costo total de la estructura dado por la expresión 1.1:

$$C_{TC} = C_{MP} + C_{IN} + C_{MC} + C_{FA} \quad (1.1)$$

Donde:

$C_{TC}$	Costo total después de concluida
$C_{MP}$	Costo de mantenimiento preventivo
$C_{INS}$	Costo de inspección y supervisión

$C_{MC}$  Costo por mantenimiento correctivo  
 $C_{FA}$  Costo de la falla

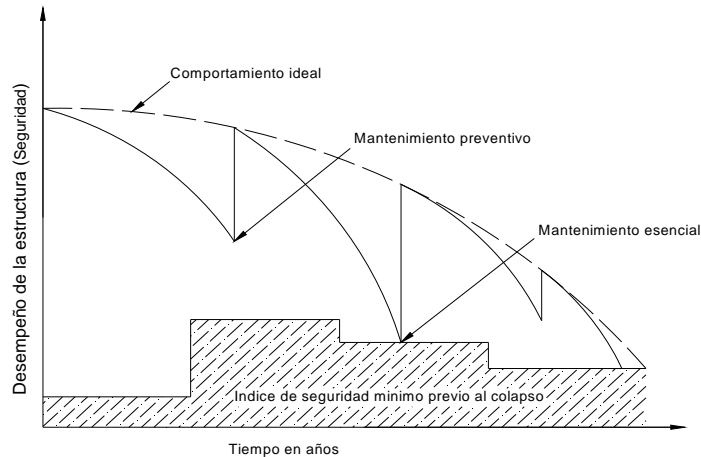


Figura 1.1. Curva de comportamiento de una estructura durante su vida útil (Aktan, Bergmaister y Catbas, 2002)

Como puede observarse, el principal costo en una estructura, aparte del inicial por construcción, es el derivado del mantenimiento requerido para que la estructura tenga un nivel aceptable de funcionamiento, existiendo básicamente dos tipos de mantenimiento, a saber, mantenimiento preventivo y correctivo. El preventivo se realiza cuando el funcionamiento estructural está sobre el índice de la confiabilidad objetivo (no se sobrepasa tal), mientras que se emprenderá el mantenimiento esencial cuando el funcionamiento haya rebasado el límite de seguridad establecido como valor objetivo.

La inspección puede decirse que es un reconocimiento visual no destructivo de todas las partes visibles de la estructura, cuyo propósito es realizar una descripción de la condición general del comportamiento entero de la infraestructura, y revelar daño significativo a su debido tiempo, para poder realizar trabajos de rehabilitación cuando resulte necesario, tomando en consideración los aspectos económicos y seguridad. Para el caso, se busca que el costo agregado por sistemas de inspección, supervisión y mantenimiento perpetuo, protejan la inversión (construcción) y al público usuario.

Existen numerosas técnicas no destructivas cada vez más complejas para probar y evaluar estructuras, inicialmente desarrolladas sobre todo para sistemas de transporte, aeronáutica e industria militar, pero que poco a poco han sido incorporadas a la infraestructura civil, llevando a un elevado desarrollo de tecnologías para detección y caracterización de daños en materiales y estructuras que, combinadas con técnicas de procesamiento de datos actuales, ha dado lugar a un interés significativo en herramientas de diagnóstico para supervisión de integridad estructural y detección de la degradación de éstas. De esta manera, la mayoría de las líneas de trabajo actual están enfocadas al desarrollo de métodos que permitan el paso del modo de supervisión eventual a sistemas de operación continua, diseñando sistemas sensoriales que obtengan información sobre el cómo se está comportando una estructura en servicio, durante la construcción o posteriormente, concibiendo dispositivos de detección, tales como sensores de fibra óptica integrados a la estructura (FOSs), que pueden proporcionar información para la supervisión de la estructura de forma remota y continua, es decir, en tiempo real.

Con el desarrollo de este tipo de sistemas en estructuras nuevas, se ha llegado a acuñar el concepto de estructuras inteligentes, al ofrecer información de ciertos indicadores que sirven como parámetros sobre la condición de la estructura durante eventos aleatorios específicos, que, de ser analizados y deducir el por qué de este comportamiento, permitirán incorporar herramientas coherentes y comprensibles a fin de contribuir en gran medida a mejorar el diseño estructural moderno.

1.2. METODOLOGÍAS PARA LA ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN

1.2.1. La Inspección Visual

A pesar de la posibilidad de elegir de una gama de técnicas modernas, *fig 1.2*, la inspección visual no deja de ser vital sobre todo en el caso de estructuras ya existentes, al ofrecer la primera impresión cualitativa, quizás puramente intuitiva, pero apartir de la cual, se proponen los lineamientos y metodología a seguir, es decir, se establece, con esta inspeccion, el primer juicio sobre el que se basará la investigacion y todas las actividades que conducirán a una correcta evaluación de la información cuantitativa adquirida y, por consiguiente, la elección de una estrategia más adecuada de rehabilitación a seguir.

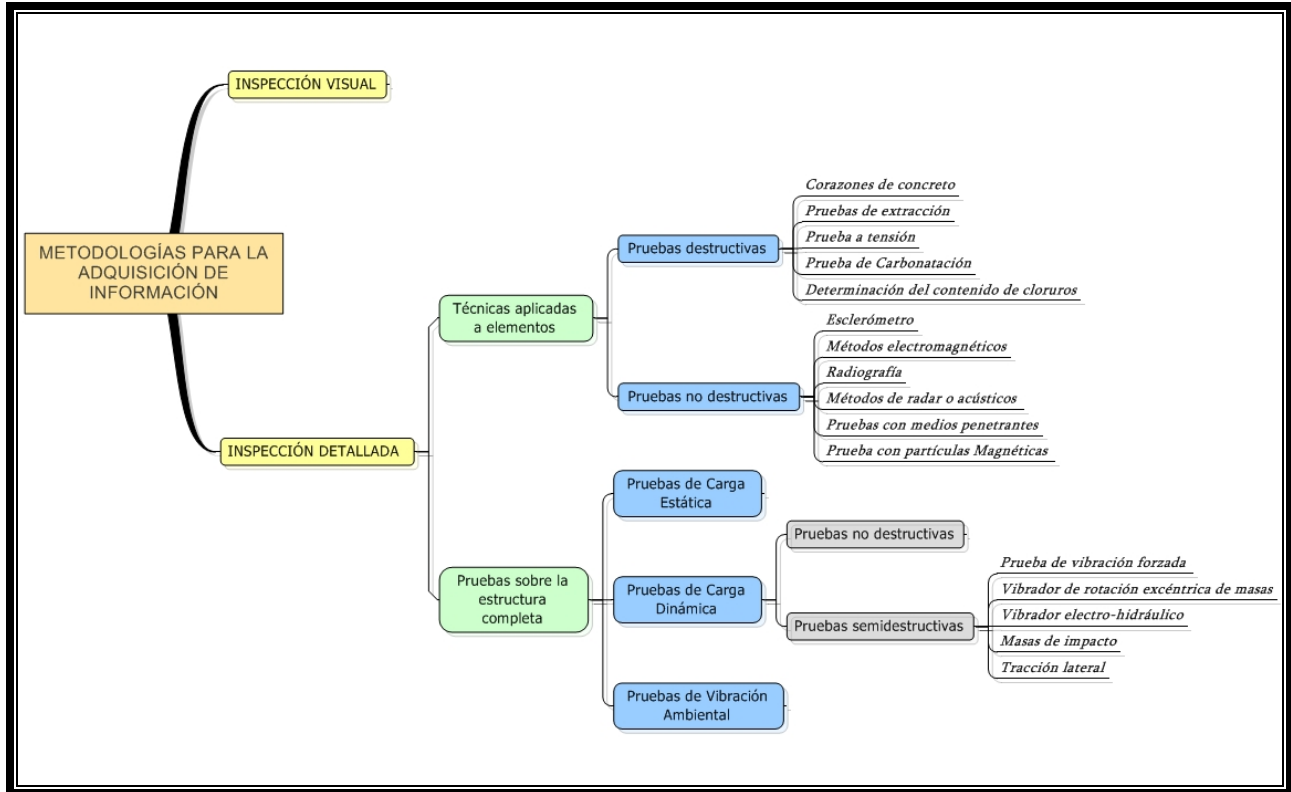


Figura 1.2. Metodologías para la adquisición de información.

Durante la inspección visual se necesita prestar atención especial a factores como:

- Descripción de la estructura, desde la geometría hasta usos y presencia de equipos que, bajo funcionamiento o no, pueden afectar el comportamiento de la estructura.
- Recolección y verificación de toda documentación histórica concerniente al edificio, siendo de mayor importancia aquellos documentos que ofrecen información sobre el diseño estructural original y sus modificaciones, así como reportes de inspecciones previas (de haberse realizado).
- La presencia de grietas, aspecto de los materiales, patrón de formación y posibles causas.
- Deterioro superficial de recubrimientos que pudieran evidenciar un mal comportamiento estructural.
- Identificación de superficies de concreto deterioradas y zonas de exposición del refuerzo, en el caso de estructuras de concreto reforzado.
- Deformaciones claras de la estructura.
- Presencia de humedad, filtraciones de agua, etc.

- Identificación de zonas reparadas o tratadas con algún procedimiento protector, verificando su comportamiento actual.
- En el caso de estructuras instrumentadas, la revisión del correcto funcionamiento de los aparatos de medición.

Es conveniente tener en mente preparar equipo que facilite las operaciones y ampare la seguridad del personal que realiza la inspección; generalmente suele incluirse:

- Herramientas de limpieza: cepillos de alambre, destornilladores, raspadores, etc.
- Herramientas de mano como navaja, piqueta y martillos, para despostillar (desconchar) recubrimientos ya afectados de elementos estructurales.
- Herramientas para mejorar la visualización de grietas y hendiduras como grietometro, binoculares, linterna, lupas, marcadores, tintes penetrantes, espejos, etc.
- Equipo de medición básico: flexómetros, reglas, calibradores y similares.
- Materiales y equipo de registro tales como, bitácoras de campo, cámaras fotográficas, etc.
- Equipos de seguridad incluyendo aparejos, arneses, andamios, escaleras, kit de primeros auxilios, cascos, etc.
- Equipo mixto dependiendo del sitio y características de la estructura a revisar como, repelente de insectos, estacas, señalamientos, banderolas, etc.

Dependiendo del material del que está construida la estructura, se pueden observar condiciones anómalas distintivas, en el caso de estructuras de concreto reforzado, agrietamientos, desconchamiento, delaminación, desgaste o abrasión, daños por colisión y sobrecarga. Con la inspección visual inicial se detectarán estos daños, en el caso de las grietas se registrará la longitud, dirección, grado de distensión y clasificación (según su magnitud como de línea fina, media o completamente fallada y, por su origen en estructurales o no estructurales, por asentamiento, por cortante, etc.) resultando útil contar con un grietometro, que facilite y uniforme la tarea. La presencia de humedad o manchas de moho en su periferia indicará la presencia de filtraciones, obligando a investigar la existencia de delaminación y corrosión del acero de refuerzo debido a la intrusión de cloruros o de sales. Para identificar este efecto en áreas sospechosas, como prueba de primera instancia, es conveniente recurrir al sonido producido por el golpeteo de un martillo; de producirse un sonido hueco (como caja de resonancia) puede indicar la falta de integridad del concreto.

En el caso de miembros de acero, los daños más recurrentes son debidos a corrosión, colisiones, sobrecarga y fisuras (agrietamientos). Las fisuras inician generalmente en zonas de concentración de esfuerzos como conexiones y extremos de terminación de soldaduras; pudiéndose propagar después a través de la sección hasta fracturar el miembro. Cuando la estructura se encuentra pintada, el deterioro en la pintura acompañada por manchas de moho, pueden indicar la existencia de una grieta, conviniendo limpiar e inspeccionar la zona. De presentarse problemas se pueden realizar pruebas adicionales como el uso de tintes penetrantes para identificar y determinar el grado de avería. De igual modo que para el concreto reforzado, tanto para fisuras como daños por corrosión, se deberán identificar y registrar las causas, localización y grado de deterioro, para un análisis posterior.

Como se mencionó, los resultados deben ser descritos detalladamente y calificados, a juicio del examinador, según el nivel de gravedad. Debido a que usualmente la extensión de la estructura puede hacer pesada esta labor, es recomendable preparar previamente formatos de inspección que sirvan para agilizar la tarea de registro durante y después de la inspección. Analizando en su totalidad estas observaciones, se podrá definir la condición de la estructura y, conforme los resultados obtenidos se determinan las medidas pertinentes a tomar.

### 1.2.2. Inspección Detallada

Este nivel de inspección se realiza generalmente como consecuencia del análisis de resultados obtenidos de la inspección visual para definir mejor cualquier deficiencia encontrada, es decir, se realiza de forma suplementaria, implicando en muchas ocasiones la utilización de pruebas indirectas o destructivas pero que, debido al empleo de equipo especial, requieren de más tiempo para ser efectuadas y analizadas. Dentro de estas pruebas están las que tratan cuestiones particulares de la estructura, es decir, se especializan en evaluar cuestiones como propiedades geométricas y el correcto comportamiento de materiales, por lo que, se puede decir que son técnicas aplicadas a elementos. Por otra parte, se encuentran las que tratan a la estructura de forma global en busca de comportamientos anómalos.

#### 1.2.2.1. Técnicas aplicadas a elementos

##### A) Pruebas destructivas en elementos

Quando es necesario identificar parámetros de un orden menos extenso, llegan a utilizarse este tipo de pruebas, las cuales implican la extracción de muestras de material de los elementos estructurales, procurando evitar causar el deterioro en la resistencia de los materiales que los forman y obtener resultados confiables.

##### A.1. Corazones de concreto

Se llega a recurrir a la extracción de corazones (o probetas) del material, para ensayarlos directamente en el laboratorio; este método necesita mucho trabajo y se causa un daño parcial a la estructura, debiendo realizar el resanado de las aberturas producto de la extracción utilizando morteros de alta resistencia (grouts) o bien químicos epoxicos; de los corazones de concreto extraídos, la primera prueba en la que se piensa es la determinación de la resistencia a compresión, *fig.1.3*, debiendo tomar en cuenta que los resultados pueden llegar a depender de la geometría y tamaño del espécimen (relación de aspecto), frecuentándose recurrir al uso de factores de corrección empíricos para corregir el valor de resistencia obtenida.

Otro tipo de ensayos son realizados con la finalidad de determinar características mecánicas como módulos de elasticidad, pruebas al corte y tensión de los corazones de concreto endurecido, inclusive algunas características físicas, tales como la densidad, absorción de agua y petrografía. A nivel químico, los restos derivados de las pruebas pueden aprovecharse, de ser necesario, para determinar la salud y estimar la durabilidad del concreto comúnmente mediante pruebas de carbonatación y contenido de cloruros.



*Figura 1.3. Extracción, preparación y prueba a compresión de un corazón de concreto.*

A.2. Pruebas de extracción

El principio tras esta prueba consiste en la medición de la fuerza requerida para sacar un perno o dispositivo similar del interior del concreto, para posteriormente correlacionarlo con la resistencia a compresión del espécimen. Para esta prueba se distinguen dos categorías básicas: las que implican la colocación del dispositivo, previo al colado del concreto, y las que ofrecen mayor flexibilidad, fijando el dispositivo en una abertura o perforación realizada en el concreto ya fraguado, *fig.1.4*.

La fuerza de tensión máxima registrada por el equipo de carga, permite el empleo de una carta empírica para correlacionar a la fuerza equivalente del concreto. Aunque los resultados se relacionan con la zona superficial, se tiene la ventaja de obtener una medida directa de fuerza a una mayor profundidad de la superficie, a diferencia de las obtenidas por métodos de rebote.

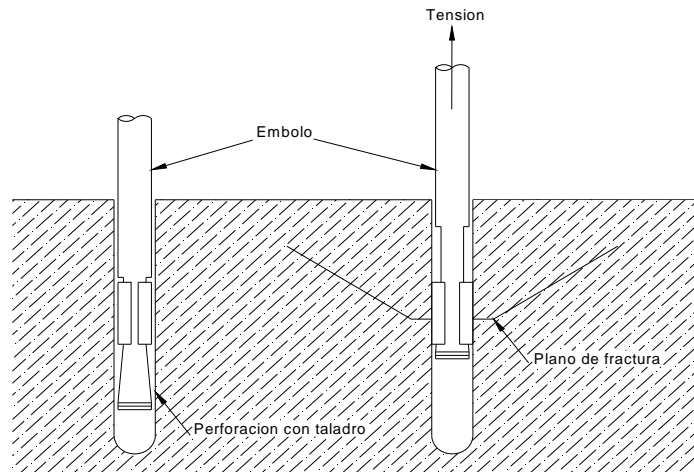


Figura 1.4. Esquema de realización de la prueba de extracción (Aktan, Bergmaister y Catbas, 2002)

A.3. Prueba a tensión

El método desarrollado para medir la resistencia a tensión de los elementos "in situ" es mediante la prueba de tensión directa; para ello, se adhiere un disco circular de acero contra la superficie de concreto a estudiar, para posteriormente cargar a tensión mediante un gato manual apoyado en un anillo de reacción sobre la superficie de prueba, periférica al disco de acero, *fig1.5*.

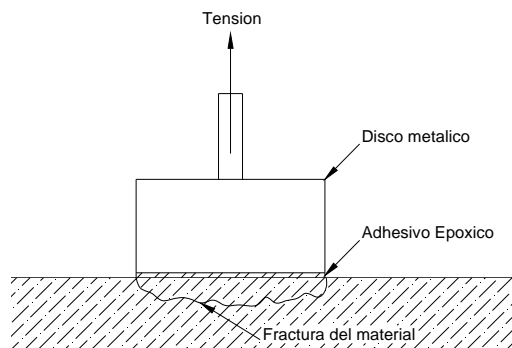


Figura 1.5. Prueba de tensión (Aktan, Bergmaister y Catbas, 2002)

La resistencia nominal a tensión se calculará como el cociente entre la fuerza empleada y el área del disco, empleando una calibración apropiada a las características del concreto. Una particularidad importante de este método es que los cambios pequeños en fuerza son detectados fácilmente. Variables como tipo del agregado

no afectan perceptiblemente la correlación y, en general, las diferencias relativas al curado y compactación del concreto en la superficie de vertido, son pocas así que, las fuerzas derivadas de probar la superficie, se pueden considerar como conservadoras.

#### *A.4. La Carbonatación*

Se determina para evitar que se produzcan daños por corrosión en el acero de refuerzo debidos a la concertación de iones de hidrógeno  $H^+$ , ya que durante la hidratación del cemento se forma hidroxilo de calcio  $Ca(OH)_2$  dando al concreto una concentración de  $pH$  cercana al 12.6, por encima del valor mínimo para la prevención de corrosión el cual debe ser de 12.5, sin embargo, por contacto con el ambiente se produce una reacción entre el dióxido de carbono  $CO_2$  del aire y el  $Ca(OH)_2$  dando por resultado una disminución del valor de  $pH$ , el cual depende de la cantidad de humedad y características de los agregados, por lo que, para evitar la corrosión del refuerzo se debe mantener en equilibrio estos procesos de modo que se cumpla la relación,  $8 < pH < 12.5$ . (Barrera, Pérez y Sandoval, 2003).

Para evaluar la evolución de este fenómeno y establecer la probabilidad de daño, es necesario medir la profundidad en la cual ha disminuido el  $pH$  debajo del nivel crítico, empleándose dos formas para determinar la concentración del  $pH$ . La primera consiste en el empleo de soluciones indicadoras, usualmente fenolftaleína, para empapar una muestra; después de un tiempo la región básica tornará su color a rosa, notándose claramente en la superficie una línea entre la zona de color y la superficie descolorida, lo cual marca la profundidad de carbonatación. El segundo método consiste en tomar muestras de material a distintas profundidades, el cual es pulverizado y mezclado con agua (de concentración neutra) para posteriormente determinar su concentración de  $pH$  por alguno de los métodos comunes (cintas indicadoras, titulación, etc.)

#### *A.5. Determinación del contenido de cloruros*

Se mide para prevenir la corrosión del acero de refuerzo y degradación del concreto, causado por la reacción del contenido salino presente en los agregados o agua utilizados para la elaboración del concreto.

Para determinar el contenido de cloruros, se somete una muestra pulverizada a una solución ácida, posteriormente se analiza cuantitativamente la solución obtenida. Se recurre a la solución ácida para poder disolver los cloruros de las sales resistentes al agua, permitiendo determinar un valor conservador del contenido de cloruros. Este valor permisible no excederá el 0.4% de la masa de cemento, inclusive después de la carbonatación del concreto.

### *B) Pruebas no destructivas en elementos*

#### *B.1. El esclerómetro*

Este aparato resulta útil para determinar la fuerza resistente a compresión en superficies de concreto de una forma rápida y sin el inconveniente de provocar daño a los elementos. Su funcionamiento consiste en un mecanismo por el cual un perno de metal colocado en el extremo se coloca normal a la superficie de concreto, entonces, dentro del dispositivo, cierto peso (martillo) se acelera por un resorte y golpea al perno del metal contra el concreto, produciéndose un efecto cinético debida a la energía de impacto, siendo despedido el perno hacia atrás (rebote). Esta energía es medida registrando la distancia que el peso recorre, en contra del resorte cuando se produce el rebote, proporcionando un índice que, mediante correlación, permite estimar la resistencia del concreto, *fig.1.6*.



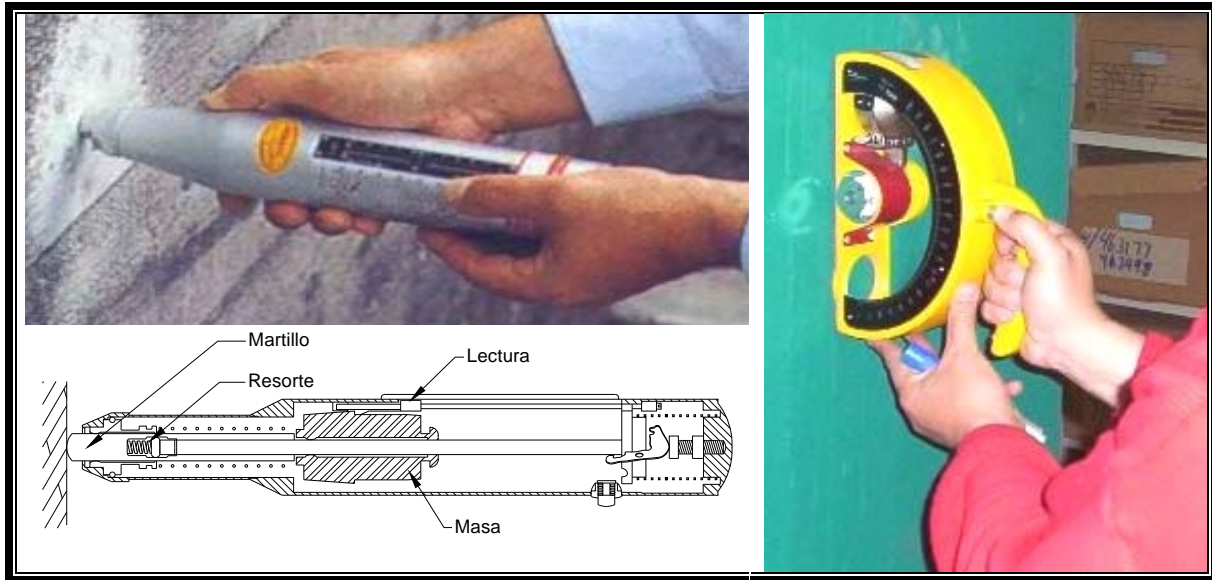


Figura 1.6. Esclerómetros de pistón y de péndulo en uso. (Bungey y Millard, 1996).

En cuanto al estudio del estado del acero de refuerzo varios métodos se han desarrollado, no obstante, se deberá tener en mente la conveniencia de recurrir a algunas pruebas destructivas con la finalidad de complementar o esclarecer resultados. Dentro de lo que es la determinación no destructiva de la localización y diámetro del acero de refuerzo, se pueden identificar tres grupos importantes de equipos basados en campos electromagnéticos, radiación y radar como los que se describen a continuación.

### B.2. Métodos electromagnéticos

En el caso de los equipos electromagnéticos, se ha explotado, predominantemente, el efecto de la inducción magnética, no obstante, dependiendo del nivel de detección los efectos físicos que se pueden emplear son:

- Permanencia magnética. Consiste en medir el poder de atracción entre el refuerzo y un magneto situado sobre la superficie de concreto, solo permite determinar la localización del refuerzo respecto la superficie.
- Inducción electromagnética. Mide la intensidad del flujo magnético al ser afectado por materiales magnéticos, dentro de un campo electromagnético; es eficiente para determinar la posición y diámetros del acero de refuerzo.
- Dispersión del campo magnético. El refuerzo es magnetizado por inducción, entonces, el campo magnético es medido usando una punta de prueba, identificándose el acero de refuerzo como aquellas áreas causantes de una dispersión del campo. Al igual que el de inducción magnética, permite estimar la posición del refuerzo y diámetros del mismo en función de la intensidad del campo.

Las ventajas de los métodos electromagnéticos son:

- Determinación confiable de la localización de las barras sobre los recubrimientos, sin embargo, la determinación de los diámetros de las barras, en casos prácticos, causa problemas.
- Los resultados se obtienen inmediatamente. No hay post proceso de información.
- Son dispositivos rentables. Pese a esto, deben considerarse las limitaciones, ya que, el trabajo de estos equipos, es confiable solamente para recubrimientos estrechos de concreto.
- Para armados de refuerzo denso, los resultados del método pueden ser insuficientes ya que, las barras situadas en la vecindad de alguna barra se llegan a detectar como una sola barra.

Para la mayoría de los casos prácticos, sin embargo, los métodos electromagnéticos y dispositivos comerciales correspondientes, son las herramientas más eficaces, permitiendo una exploración sencilla en la superficie del concreto, *fig1.7*, contando a últimas fechas con elementos que permiten determinar y observar con exactitud el armado de un elemento.



Figura 1.7. Instrumentos electromagnéticos, básico y de última generación. (Aktan, Bergmaister y Catbas, 2002)

### B.3. Radiografía

Al exponer un elemento a una fuente de radiación (rayos gamma), una porción de esta pasara la muestra, otra será absorbida y otra parte será dispersada en otras direcciones. La porción absorbida dependerá del grueso y densidad de la muestra, así como el número atómico de los materiales expuestos. Debido a la diferencia grande en densidad entre concreto y el acero, este efecto se puede utilizar para detectar el acero de refuerzo, situando a un costado del miembro a examinar, la fuente radiactiva y una película fotosensible en el lado opuesto; la proyección del refuerzo se manifestará gráficamente creando una imagen en la película, permitiendo una interpretación y documentación sencilla. Además, si el recubrimiento y diámetro de la barra son desconocidos, la doble exposición es una forma de determinarlos. El espesor máximo del elemento en el que se pretenda realizar la prueba es aproximadamente, 25 cm y, en caso de emplear radiación gamma, podrá incrementarse a unos 50 cm. No obstante, en elementos de mayor espesor, se puede recurrir a la realización de alguna perforación por la cual introducir una sonda que sirva como fuente radiactiva. Además, en el caso de estructuras de acero se logran detectar grietas en miembros o vacíos en la soldadura, ya que menos radiación es absorbida por el acero y más radiación pasa los defectos manifestándose en la película como líneas oscuras o áreas sombreadas contrastantes con los alrededores del material. La desventaja de este método, son los altos costos debidos a la especialización requerida para seleccionar los ángulos de exposición adecuados, interpretar los resultados registrados en las películas y manejo de los materiales radiactivos, debiendo tomar medidas pertinentes de protección, por lo cual, solo se recomienda cuando la importancia del elemento o densidad del armado imposibilita el uso de alguna otra técnica.

### B.4. Métodos de radar o acústicos

El efecto utilizado para detectar el acero de refuerzo por medio de esta técnica, se basa en el principio de alteración de las ondas electromagnéticas en la vecindad de materiales que tienen diversas características eléctricas, así, al transmitir pulsos de la energía en una superficie, éstas ondas se reflejan en los límites significativos de materiales disímiles. Las ondas reflejadas son capturadas por el sistema y exhibidas en un diagrama de amplitud de reflexión contra tiempo de llegada.

La ventaja respecto a los métodos electromagnéticos es su mayor profundidad de inspección (cerca de los 50 cm), sin embargo, dependiendo de las características del equipo, puede presentar deficiencias de insensibilidad al refuerzo situado en la cercanía de la superficie sobre la que se emiten las ondas, no obstante, en el caso de

elementos preesforzados esta peculiaridad resulta ventajosa para examinar cables sin la intromisión del acero superficial. Por otro lado, existen sistemas a los que se les ha incorporado antenas y sensores de ultra banda ancha, en combinación con el uso de tecnología para la reconstrucción y proyección de imágenes en alta resolución, proporcionando la capacidad de localizar y caracterizar rápidamente defectos de construcción como oquedades y daños debidos al uso o inducidos por la edad, siendo empleado sobretodo en superficies como losas, cubiertas de puentes y pavimentos. Dentro de estos pueden observarse:

- Sistemas de radar penetrante en tierra, útil para monitorear pavimentos por medio de ultrasonido, montados en un vehículo de inspección sin obstaculizar el funcionamiento de la vía de comunicación. Consta de, por lo menos, una antena de radar con una unidad de la adquisición de datos para identificar cambios significativos dentro del pavimento y el tiempo medido de recorrido se relaciona con el grueso de la capa. Además de la determinación del grueso de las capas superficiales, se obtienen valores dieléctricos de interés para establecer la presencia de vacíos ocasionados por aire y humedad en el pavimento.
- Pulso de eco ultrasónico. Mide la diferencia de tiempo entre el envío de un impulso y la recepción del eco producido, para determinar la distancia a la cual se presenta alguna discontinuidad, ya que la reflexión del pulso ocurrirá en los límites que separan los materiales con diversas densidades y características elásticas, por lo cual, es muy útil en la inspección de piezas de acero. En el caso de concreto reforzado, no es conveniente debido a la naturaleza heterogénea del mismo, *fig.1.8.*

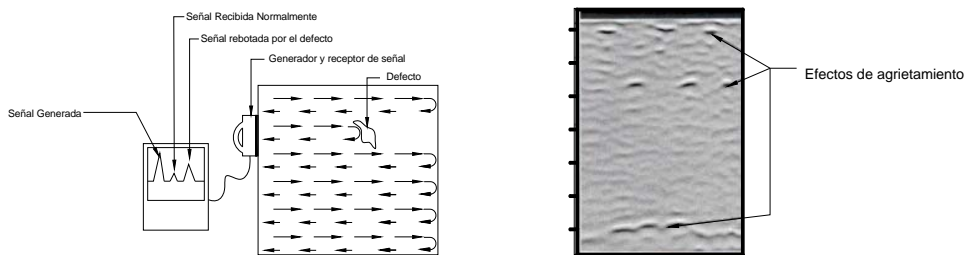


Figura 1.8. Prueba de eco ultrasónico (Bergmaister 2002).

En el concreto reforzado la prueba adecuada es la del eco de impacto, la cual emplea un impacto mecánico de corta duración, por ejemplo un martillo para generar ondas de baja frecuencia (2 a 20 kilociclos) que son reflejadas por los defectos y superficies externas, dando lugar a diferentes modos de la vibración que se pueden identificar por la frecuencia y utilizar para determinar la geometría y localización de una estructura defectuosa.

Para lograr esto, se toma un registro de dislocación contra tiempo y luego se transforma al dominio de la frecuencia para facilitar el análisis de la señal. Así la presencia y naturaleza de cualquier defecto se puede determinar analizando la forma del espectro y frecuencia. Por ejemplo cuando una onda incide en un material disímil al medio, una porción de la onda incidente se reflejará, con una amplitud dependiente del ángulo de incidencia. El valor de frecuencia de amplitud máxima en el espectro se puede utilizar para determinar la profundidad de la interfaz de reflejo, si se calcula el coeficiente de reflexión (el cual puede ser negativo o positivo dependiendo de los valores de impedancia acústica de los dos materiales). Es posible distinguir entre la reflexión de una interfaz de concreto-aire y de una interfaz de concreto-acero, ya que en el primer caso el coeficiente de reflexión es negativo.

Los usos típicos de la prueba de eco impacto incluyen:

- Determinación del grosor de losas.
- Detección de delaminaciones, grietas y vacíos.
- Localización de concreto no consolidado.

- Localización de vacíos en conductos para tendones.
- Localización de vacíos en el subsuelo debajo de las losas de cimentación.
- Identificación de vacíos en colados y mampostería de bloques huecos rellenos con concreto.

#### *B.5. Pruebas con medios penetrantes*

Su uso principal es para la identificación de defectos en materiales no porosos, principalmente grietas y oquedades de empalmes soldados o bien la fatiga con agrietamiento en miembros a tensión.

El procedimiento de empleo consiste en empapar con una sustancia penetrante la superficie del elemento a inspeccionar, previa disolución de un tinte visible o fluorescente en el mismo. El penetrante es absorbido dentro de los defectos superficiales por acción capilar, después de un período de espera, requerido para asegurar la penetración en las grietas más estrechas, se limpia el exceso de líquido de la superficie. Posteriormente se rocía un polvo blanco sobre la pieza llamado revelador, el cual resalta el defecto al entrar en contacto con los residuos del tinte. Entonces, por inspección visual, bajo luz blanca o ultravioleta, son identificadas las marcas visibles o fluorescentes del tinte, definiendo la localización, forma y causa del defecto.

#### *B.6. Prueba con partículas Magnéticas*

Esta es una técnica para la identificación de grietas, que requiere la magnetización local o completa del elemento en la superficie a examinar y puede ser aplicada solamente a piezas ferromagnéticas. Cuando una grieta está presente en la superficie, cierto flujo magnético se escapará hacia fuera, bordeando la grieta, pudiendo ser visible dicho flujo al diseminar partículas magnéticas, de preferencia pigmentadas, presentándose como una textura en relieve alrededor de la grieta.

### **1.2.2.2. Pruebas sobre la estructura completa**

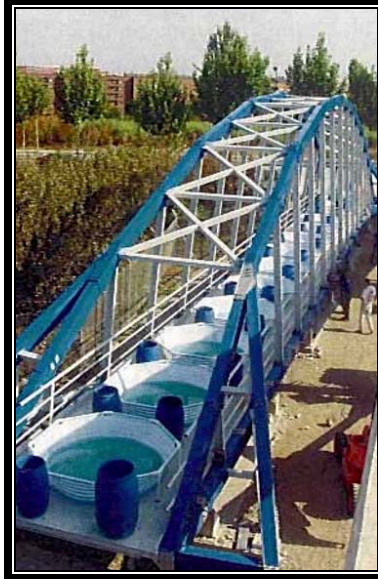
#### *A) Pruebas de Carga Estática*

Una de las maneras de comprobar la confiabilidad de estructuras ante el colapso producto del deterioro, es mediante la realización de pruebas de carga estática, las cuales, realizadas de forma correcta, pueden llegar a demostrar inmediatamente si la resistencia de un sistema estructural es mayor que la carga de prueba o lo contrario; mientras que, con modelos analíticos se determina el nivel de carga que puede soportar en términos conservadores. Por ejemplo, la capacidad de carga real de la estructura es, a menudo, más alta que la capacidad predicha, esto se atribuye, en parte, a efectos del trabajo conjunto de la estructura como sistema, lo que da origen a una redistribución de carga. Una prueba de carga de diagnóstico es recomendable en los casos siguientes: si tras un análisis estructural previo se establece un grado insatisfactorio de carga; o bien cuando el análisis es difícil de realizar debido a la carencia de documentación y es perceptible el deterioro de la estructura; también, pero en menor medida, para verificar o refinar modelos estructurales analíticos o predictivos.

Este tipo de pruebas esencialmente están diseñadas para investigar la respuesta estructural bajo cargas a corto plazo, por consiguiente, la instrumentación necesita la suficiente sensibilidad para responder y registrar los cambios; debe también tenerse en mente y sopesar la existencia del riesgo de dañar la estructura y, en caso extremo, que esta no sobreviva a la prueba, por lo cual puede no siempre ser recomendable.

Las pruebas típicas pueden ser realizadas para obtener parámetros relacionados con el comportamiento a torsión, flexión, falla ante carga axial y combinaciones de carga. Una buena prueba de carga implicará la observación de sus reacciones durante el proceso, aumentando la carga gradualmente y efectuando paulatinamente ciclos de carga y descarga progresivos hasta alcanzar la carga última de prueba  $F_u$ , haciendo de

esta una operación costosa sobre todo por la inversión de tiempo y transporte de los medios a utilizar para la prueba, *fig.1.9*. A este respecto, la carga se puede aplicar usando materiales de construcción, o incluso agua, la cual en el caso de falla repentina, puede ser dispersada fácilmente, reduciendo los daños, pesos de arrabio. En el caso de puentes, es común utilizar vehículos cargados como peso muerto o bien por medios mecánicos (instalación de gatos hidráulicos-marcos de reacción).



*Figura 1.9. Prueba de carga estática sobre un puente (Aktan, Bergmaister y Catbas, 2002).*

### B) Pruebas de Carga Dinámica

Cuando el daño estructural es pequeño o está en el interior del sistema, su detección no se puede realizar con una simple inspección visual. Se requerirá utilizar herramientas no destructivas o equipos más sofisticados que alcancen a distinguir la singularidad. Estas pruebas se basan en el hecho de que la ocurrencia de daño o de la pérdida de integridad en un sistema estructural, produce cambios en las características dinámicas de la estructura. Por ejemplo, en el caso de concreto reforzado es común la degradación de rigidez debido a agrietamientos. Dependiendo del detalle con el que se realice el estudio se podrá obtener información sobre la posición y severidad del daño ocurrido.

Un procedimiento común en las pruebas dinámicas, consiste en someterlas artificialmente a una excitación de gran magnitud o bien, recabar información originada por una acción sísmica, para posteriormente determinar las frecuencias naturales de vibrar propias de la estructura, asociadas a las formas modales de vibración y su amortiguamiento. Así los parámetros modales (frecuencias naturales, formas modales y valores de amortiguamiento) y parámetros del sistema (rigidez, masa, etc.) pueden ser deducidos. Una vez identificados estos parámetros se pueden utilizar para caracterizar su comportamiento dinámico (lo que se ha dado por llamar la firma estructural) y supervisar el correcto funcionamiento de la estructura.

Las pruebas de vibración pueden ser efectuadas de forma continua o intermitente. En un sistema del control continuo, típicamente se instalan solo algunos sensores en las zonas clave de la estructura, mientras que en la supervisión intermitente la cantidad de sensores a utilizar obedecerá al nivel de detalle propuesto para el estudio.

Desafortunadamente, no solo la salud de la estructura afecta su comportamiento dinámico, también la excitación aplicada, cambios de temperatura extremos, posición y magnitud de las masas llegan a ser factores importantes que pueden disminuir el potencial de detección de daño sísmico.

Para recabar información fehaciente de la estructura, en ocasiones se debe recurrir a ensayos que, dependiendo del control y cuidado que se tenga al efectuarse pueden llegar a repercutir en el comportamiento de esta, catalogándose en pruebas destructivas, no destructivas y semidestructivas.

#### *A.1. Pruebas semidestructivas*

- Prueba de vibración forzada

Las pruebas de vibración forzada incorporan al método, la inducción artificial de vibraciones donde la amplitud y frecuencia de la excitación aplicada están bajo control, por el uso de sistemas diseñados explícitamente con este propósito, presentando la ventaja de suprimir los efectos de ruido extraño sobre la respuesta estructural.

Los medios físicos mediante los que se inducen las excitaciones artificiales comúnmente usadas son conocidos como vibradores, excitadores o cocteleras, los cuales pueden o no estar en contacto directo con la estructura y según su principio de operación pueden ser masas de impacto, vibradores por rotación excéntrica de masas y vibradores de fuerzas electro-hidráulicas, entre otras.

- Vibrador de rotación excéntrica de masas

Este tipo de aparatos generan la fuerza vibratoria mediante un eje con una masa, la cual se hace rotar y durante dicha rotación hace que la masa se desplace. El vibrador puede funcionar en diversas frecuencias cambiando la velocidad rotatoria del eje y dependiendo del número de masas con las que cuente, se pueden generar fuerzas en más de una dirección.

- Vibrador electro-hidráulico

Estos pueden generar fuerzas más altas que cualquier otro tipo. La fuerza se genera por el movimiento de un líquido a alta presión. Consiste generalmente en un sistema hidráulico, que conduce una masa de fluido. El peso de la masa se puede variar para modificar la magnitud de la fuerza a obtener. Los vibradores proporcionan movimientos relativamente altos de vibración y permiten la excitación exacta en diversas frecuencias a flexión o torsión. También tienen la ventaja de poder aplicar una carga estática y formas de onda complejas a la estructura de prueba. Sin embargo, el movimiento asequible reduce con el aumento de frecuencia.

- Masas de impacto

El sistema consiste en agregar un impulso a la estructura mediante una masa de impacto, la gama de frecuencias registradas tras el impacto variará dependiendo de las características del martillo empleado. Por lo general, el espectro obtenido del impulso será de banda ancha y corta duración. La anchura de la función determina el contenido de la frecuencia mientras que la altura y la forma, controlan el nivel de energía del espectro.

- Tracción lateral.

Este tipo de estudios se hacen mediante pruebas de tracción lateral, donde, la excitación se produce lanzando la estructura de una posición estáticamente deformada inicial, la cual es obtenida por medio de cables, arietes hidráulicos o por empuje de motores. La respuesta de la estructura a esta forma de excitación es dominada fuertemente por las formas modales de deformación semejantes a la configuración deformada de prueba. Aunque esta prueba es probablemente el método más simple y eficaz, se utiliza rara vez, debido a su dificultad para ponerla en práctica.

Las pruebas por vibración forzada son menos realizadas en comparación con las pruebas de vibración ambiental, sobre todo por la dificultad para construir los sistemas con la capacidad de generar las fuerzas requeridas en el rango de frecuencias de interés. Además al auxiliarse de pruebas de impacto existe un alto potencial de inducir daño en la estructura durante la prueba, asimismo considerando el costo por mano de obra adicional para adecuar la instalación en la estructura puede resultar poco rentable.

### *C) Pruebas de vibración ambiental*

Los métodos de prueba dinámicas sin ningún tipo de control en la excitación inducida y de baja magnitud, se clasifican como pruebas de vibración ambiental. La popularidad de este método radica en la factibilidad de medir la respuesta de la estructura mientras se encuentra sometida a cargas de servicio. Las cargas pueden ser de cualquier tipo: viento, ondas, tráfico vehicular o peatonal, etc. Así, la fuente representa una excitación real típica, a la cual se encuentra sujeta la estructura durante el transcurso de su vida.

Sin embargo, puesto que las características de la excitación son, en su mayoría desconocidas, las fuerzas inducidas serán de un orden aleatorio por lo que la respuesta en la estructura sujeta a tales efectos, contendrá todos sus modos normales. (Ayala, García, Castelán, 2001)

El procedimiento típico que se sigue para desarrollar la prueba de la vibración ambiental es similar al requerido para las pruebas de vibración dinámica, con la singularidad de no requerir maquinaria especial para excitar la estructura ya que esta se da por agentes presentes en la misma y su vecindad. En ocasiones es de gran utilidad realizar un modelo computacional de la estructura, con el cual se puede determinar los sitios más convenientes para efectuar la medición (donde se colocarán los acelerómetros) de acuerdo a los resultados del modelo y disposición geométrica de la estructura. No obstante si no se cuenta con este tipo de resultados preliminares se procurará tomar puntos centrales en planta (centros de masa) y zonas en las que se aprecian mayores desplazamientos, por ejemplo esquinas, las cuales son buenas referencias para la toma de registros, sin embargo, hay que recordar que finalmente el arreglo dependerá de lo que se busca inspeccionar y características del sistema estructural.

Entre las desventajas de las pruebas de vibración ambiental, en la mayoría de los casos se encuentra que el espectro de excitación se concentra dentro de una pequeña gama de frecuencias, con la presencia de gran cantidad de ruido, haciendo que el espectro se limite a una banda estrecha de frecuencias por lo que sólo un rango limitado de la dinámica de la estructura puede ser identificado y supervisado.

Aunque pueden ser obtenidos datos confiables de las frecuencias características y sus correspondientes formas modales, la estimación de valores de amortiguamiento es propensa a errores debido al proceso de excitación y postproceso de la señal. Además, el procedimiento de análisis necesario para extraer los parámetros modales hace que se dificulte o sea escasa la identificación de algunos modos. Por tanto, los resultados por excitación de bajo nivel son poco apropiados para predecir la reacción dinámica de una acción de alto nivel como debida a sismos. Por lo cual para alcanzar mejores resultados, es necesario utilizar técnicas con una fuente de excitación de energía más alta.

### **1.2.2.3. Instrumentos de medición**

Al realizar estas pruebas se recurre a diversos equipos e instrumentos a fin de recabar datos censando los cambios que pudieran tener lugar durante o bien posterior a estas. Buscando que esta información tenga un alto índice de confiabilidad y sirva para la detección de daños (o bien monitorear los cambios que tengan lugar), se debe de tener en mente la implementación de instrumentos con excelente sensibilidad y funcionamiento a largo plazo.

Muchos de los sensores disponibles en el mercado trabajan convirtiendo un fenómeno físico en una señal, por lo general, de carácter eléctrico por lo que se conocen como transductores. Tras un proceso posterior, ya sea implícito en el instrumento o con la interacción de otros, permite la extracción de la información requerida; por ejemplo, sensores de fibra óptica, sensores de medición dieléctricos, materiales piezoeléctricos y galgas de tensión.

Los sensores pequeños y de bajo requerimiento eléctrico son los transductores ideales para este tipo de acercamiento. Si un número muy grande de estos sensores es instalado en diversos puntos, será posible extrapolar la información sobre el comportamiento de la estructura entera partiendo de estas medidas locales.

*A). Instrumentos típicos para medir parámetros geométricos*

*A.1. Extensómetro mecánico de alambre y/o cinta*

Se utiliza para detectar cambios de la estructura monitoreando la distancia entre dos puntos permanentes, situados entre zonas de interés de la estructura, como pueden ser grietas o juntas. Mide los cambios de distancia entre los puntos inspeccionados por medio de la cinta o alambre que lo compone procurando colocar el instrumento a tensión constante y calibrarlo cuidadosamente antes y después cada campaña de medición, debiendo realizar correcciones por temperatura y buena calidad de instalación del instrumento para mayor exactitud.

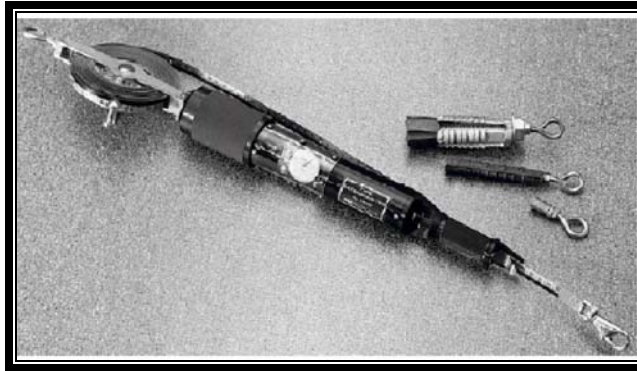


Figura 1.10. Extensómetro mecánico de alambre (Aktan, Bergmaister y Catbas, 2002).

Como puede observarse en la *fig.1.10*, se trata de un sistema mecánico, sin embargo se pueden emplear sistemas digitales de lectura como son los potenciómetros, transformadores diferenciales de variación lineal o sensores de fibra óptica.

*A.2. Potenciómetro*

Es un dispositivo similar al extensómetro que en lugar de una cinta se vale de la ley de Ohm para determinar los cambios de distancia, es decir, relaciona linealmente el cambio de longitud con la diferencia de voltaje presente en los extremos de una resistencia móvil, por lo cual, aparte de medir distancias lineales se han diseñado algunos para realizar mediciones angulares y determinar dislocaciones por rotación. Entre sus ventajas están el ser relativamente baratos y no requerir ningún condicionamiento de señal especial, se pueden construir de acuerdo al uso que se requiera, incluso sin guardar una relación lineal entre desplazamiento y voltaje, sin embargo, presenta limitantes debidas al sistema de deslizamiento, el cual es sometido a desgaste y puede tener una vida útil limitada aunque aun así es de algunos millones de ciclos. Además, la salida tiende a ser eléctricamente ruidosa puesto que el punto de contacto entre resbalador-resistor presenta cierta fricción y ésta puede afectar la salida de información.





Figura 1.11. Potenciómetros lineal y angular (Aftab y Farhad 2004)

### A.3. Galgas

Las tensiones ya sea a largo o corto plazo son causadas generalmente por cambios en cargas muertas o vivas, ciclos diarios de viento, ciclos y cambios bruscos de temperatura, fricción y contracción de materiales. Para medir estas tensiones se pueden usar galgas de fibra óptica, mecánicas y eléctricas. Sin embargo, este tipo de sensores son utilizados en la supervisión del comportamiento local de los materiales, más que el comportamiento global de la estructura. Por lo tanto, se colocan en los puntos críticos de la estructura donde se espera pudieran ocurrir tensiones similares o cercanas a la resistencia del material.

Todas las galgas se diseñan para convertir el movimiento mecánico a una señal electrónica empleando, para ello, propiedades de capacitancia, inductancia o resistencia, por ejemplo, si un alambre se somete a esfuerzos, se hace ligeramente más largo y se reduce su área transversal, esto cambia su resistencia eléctrica en proporción al nivel de esfuerzos presente. Idealmente cambiaría la resistencia solo por deformaciones de la superficie a la cual se une el sensor, sin embargo, en la práctica, la temperatura, características del material y el pegamento que adhiere la galga a la superficie, llegan a afectar los resultados, debiendo corregirse mediante el coeficiente de expansión termal de las galgas y del material en contacto, sobre todo si se pretende medir tensiones a largo plazo.

Las galgas pueden ser del tipo mecánico o bien eléctricas, en el caso de las de funcionamiento mecánico, la mayoría de ellas compara la distancia entre dos puntos por medio de una barra de longitud invariable, sin embargo, para su utilización se requiere de arduos trabajos de preparación de la superficie y presenta dificultades para utilizarlo en sistemas de adquisición de datos automatizados, por lo que solo se recomienda usarlos como respaldo de otros instrumentos colocados a largo plazo.

Las galgas eléctricas son las de mayor uso por el extenso conocimiento que existe para su utilización y manejo en comparación con las anteriores; consiste en un alambre resistor, generalmente en forma de hoja metálica, adherida a una película elástica. Cuando una carga se aplica a la superficie, el cambio que resulta en la longitud superficial se comunica al resistor y la tensión correspondiente se mide en términos de la resistencia eléctrica, la cual varía linealmente con la tensión. El diafragma metálico y el agente adhesivo trabajan juntos transmitiendo la tensión, mientras que el pegamento actúa como aislante eléctrico entre la hoja y la superficie, *fig.1.12.*



Figura 1.12. Galga extensométrica. (Aftab y Farhad 2004)

Dado que las diferencias resistivas que tienen lugar son de magnitudes pequeñas y difíciles de medir directamente, en ocasiones, es necesario formar circuitos afín de amplificar la señal eléctrica (voltaje), entre los

mas conocidos esta el puente Wheatstone, que, en su forma mas simple, consta de cuatro resistencias (agrupadas en 2 pares conectadas en serie) como se muestra en la *fig.1.13*.

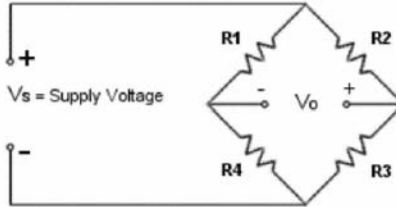


Figura 1.13. Formación puente Wheatstone (Aftab y Farhad 2004).

El voltaje de salida se mide en los extremos internos del circuito; empleando la ley de Ohm teniéndose la *ec. 1.2*.

$$V_o = V_s \frac{R_3 R_1 + R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)} \quad (1.2)$$

De no existir deformación, el circuito se encontrará en equilibrio, es decir, voltaje de entrada igual al de salida, en caso contrario, existirá una notable diferencia entre las magnitudes.

Una galga interesante es la galga de alambre vibratorio, su teoría de funcionamiento es básicamente la misma que la que hay detrás de un instrumento musical de cuerda, donde un fino alambre de acero inoxidable se estira entre dos puntos de contacto, el cual al ser pulsado vibra en determinada frecuencia dependiendo de la longitud, masa, y tensión del alambre. Conociendo estas características, un cambio en la frecuencia se puede asociar directamente a un cambio en la tensión por la *ec. 1.3*.

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (1.3)$$

donde:

- $f$  Frecuencia
- $L$  Longitud del alambre
- $m$  Masa del alambre por unidad de longitud
- $F$  Tensión del alambre

La tensión estará dada por:

$$F = \varepsilon_w EA \quad (1.4)$$

donde:

- $\varepsilon_w$  Deformación de alambre
- $E$  Módulo de Young del alambre
- $A$  Área representativa del alambre

Finalmente la deformación en función de la frecuencia estará dada por:

$$\varepsilon_w = \frac{4mL^2 f^2}{EA} \quad (1.5)$$

En la práctica, las medidas son hechas excitando el alambre con un pulso electromagnético, la vibración se registra y convierte a un pulso eléctrico, posteriormente la frecuencia o período de vibración es determinada para el pulso de respuesta contando el número de pulsos dentro de un intervalo de tiempo específico. Cuando se determina la frecuencia, el valor es ajustado y multiplicado por el factor de la galga para obtener una medida en términos de la micro-deformación. Como la medición se basa en la frecuencia del pulso y no de su magnitud, la longitud del cable utilizado no llega a afectar las medidas, sin embargo dado que la respuesta es relativamente lenta (del orden de 1 seg.) no es conveniente utilizarlo en pruebas de carácter dinámico, donde se requiere conocer la respuesta a altas frecuencias.

### B). Sistemas avanzados

#### *B.1. Medidas Geodésicas*

Las medidas geodésicas se utilizan para determinar las configuraciones geométricas de una estructura, sirven para supervisar las variaciones geométricas debido a acciones estructurales permanentes y a largo plazo tales como cargas muertas y muertas sobrepuestas. La examinación geodésica no puede detectar la respuesta inmediata de las estructuras a acciones estructurales transitorias y variables tales como cargas vivas primarias.

#### *B.2. Triangulación*

Medir movimientos en estructuras grandes se puede hacer con exactitud, en dos dimensiones, usando técnicas de triangulación. Sitios inaccesibles se pueden establecer siempre y cuando se cuente con una buena base y se obtengan ángulos favorables de intersección. En la supervisión del movimiento de estructuras, diversos puntos de referencia deben seleccionarse buscando que tengan cierta estabilidad, generalmente dentro las cercanías de la estructura, Debido a que todos los movimientos de la estructura serán relacionados con uno o más de ellos, éstos puntos serán llamados puntos de control, siendo importante colocarlos en posiciones geológicamente estables, asegurando que no presenten movimientos.

#### *B.3. GPS*

Para obtener una posición usando GPS existen diversos métodos, la elección de uno, depende de la exactitud requerida por el usuario y tipo de receptor disponible. En términos generales, las técnicas se pueden catalogar en tres clases básicas:

- Navegación autónoma usando un solo receptor independiente. Utilizado por naves en alta mar y militares. La exactitud de la posición es aproximadamente de 100 m para los usuarios civiles y cerca de 20 m para los militares.
- Colocación diferenciada corregida. Conocido comúnmente como DGPS, da una exactitud entre 0.5-5 m. Usado para la navegación marina costera y ubicación de soldados enrolados en el ejército.
- Posición diferenciada de fase. Da una exactitud de 0.5-20 mm. Utilizado en muchas tareas relacionadas con la supervisión y control de maquinaria delicada.

Todas las posiciones del GPS se basan en medir la distancia de satélites al receptor del GPS respecto a la tierra. La distancia a cada satélite se puede determinar por el receptor del GPS. La idea básica es la de la resección, que utilizan muchos topógrafos en su trabajo diario. Si se conoce la distancia a tres puntos respecto a su propia posición, se puede determinar su propia posición concerniente a esos tres puntos. Con un satélite se sabe que la posición del receptor debe estar en un cierto punto en la superficie de una esfera imaginaria, que tiene su origen en el satélite. Intersecando tres esferas imaginarias la posición del receptor puede ser determinada. El problema con el GPS consiste en conocer las pseudo gamas y el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor. Así hay cuatro incógnitas a determinarse; coordenadas (X, Y, Z) y tiempo de recorrido de la señal. La observación a cuatro satélites produce cuatro ecuaciones, que pueden ser solucionadas, permitiendo a estas incógnitas ser determinadas.

Hay varias fuentes del error que degradan la posición del GPS, estas fuentes del error son:

1. Retraso Ionosférico y atmosférico
2. Errores del satélite y reloj de receptor
3. Multidireccionalidad de la señal
4. Dilución de la precisión
5. Disponibilidad Selectiva

#### *B.4. Medidas de desviación láser (Radar de coherencia láser)*

Con el advenimiento de equipo láser, se ha facilitado y mejorado las tareas de inspección principalmente aplicada a puentes, estos son una adaptación de un sistema desarrollado para la NASA. Este puede medir desviaciones en centenares de puntos individuales en algunos minutos, proporcionando medidas tridimensionales bajo variedad de condiciones de carga. También mide vibraciones y tiene el potencial de facilitar el uso del análisis modal utilizando las medidas de las vibraciones de un puente con respecto a frecuencia, amplitud, forma, y amortiguamiento con el fin de determinar las características estructurales importantes de la estructura y detectar daño. Como herramienta puede medir de 2 a 30 m, con exactitud del orden de milímetros y no requiere blancos especiales o preparación superficial.

Un mayor número de mediciones se puede realizar con el sistema láser respecto a sistemas convencionales, sin alterar el tráfico. El sistema manda un rayo láser concentrado a un punto en la estructura a ser medido; del reflejo se recobra una porción de luz, produciéndose la mezcla de la señal original y de rebote en una sola (señal heterodina) de frecuencia intermedia característica, aumentando la fuerza y estabilidad de la señal. La detección de esta señal se realiza empleando la coherencia, entre la señal mezclada y la señal de referencia inicial, extrayendo las frecuencias dependientes de esta de forma que actúa como un radar de alta sensibilidad. Aunado a esto, se mide el cociente entre la intensidad de la señal y el contenido de ruido para comprobar la calidad de la medición.

Aparte de medir la desviación, un uso potencial para esta tecnología es la medición de la dinámica de construcciones grandes como puentes, torres, edificios, mástiles y el movimiento de objetos móviles.

#### *B.5. Sensores de fibra óptica*

La detección basada en fibra óptica es una herramienta con grandes posibilidades de implementación en la supervisión por la gran variedad y definición de parámetros capaces de ser registrados, tales como tensión, temperatura, fuerza, índices ópticos y parámetros químicos; debido a que el material es un medio idóneo por su sensibilidad a perturbaciones geométricas y ópticas, cambiando en función de la naturaleza y magnitud de la perturbación.

Como se mencionó la fibra óptica, responde a las influencias externas cambiando la luminiscencia inducida en ella, es decir actúa como transductor convirtiendo los parámetros físicos que interese medir a una correspondiente modificación de la óptica en la fibra, en cualquiera de las características cuantitativas de la luz, amplitud, fase, frecuencia y polarización. La utilidad de los sensores de fibra óptica por lo tanto dependerá de la magnitud de este cambio y de la capacidad de medirlo confiablemente.

En comparación con la instrumentación electrónica convencional presenta varias ventajas entre las que están:

- Inmunidad a interferencia electromagnética y a efectos de origen nuclear
- Poca susceptibilidad a problemas de naturaleza eléctrica como la puesta a tierra del equipo y la acción de relámpagos.
- Seguro y conveniente para el uso en ambientes altamente explosivos
- Tolerancia a altas temperaturas y ambientes corrosivos

- Ancho de banda amplia para la adquisición y registro de datos.
- Conveniente para usarse en ambientes húmedos.
- Flexibilidad
- Compacto y ligero

Un sensor de fibra óptica en general consistirá en una fuente de luz, una fibra de detección y transmisión, fotodetector, demodulador y componentes electrónicos requeridos para interpretar y procesar la información recabada del sensor óptico, así como para exhibirla, además, dependiendo del nivel de detalle requerido se tiene la posibilidad de multiplexar varios de estos elementos es decir, conectar un elevado número de sensores en serie a lo largo de una sola línea de fibra óptica. No obstante, dependiendo la forma utilizada para modular la luz, se pueden clasificar en sensores de intensidad, fase, frecuencia o polarización, *fig.1.14*, por mencionar algunos se encuentran:

Sensores Ópticos De la Fibra Interferométrica  
 Sensores de Fibra Óptica Moduladores de Intensidad  
 Sensores del Micropliegues  
 Sensores de Rejilla de fibra óptica ( tipo Bragg)

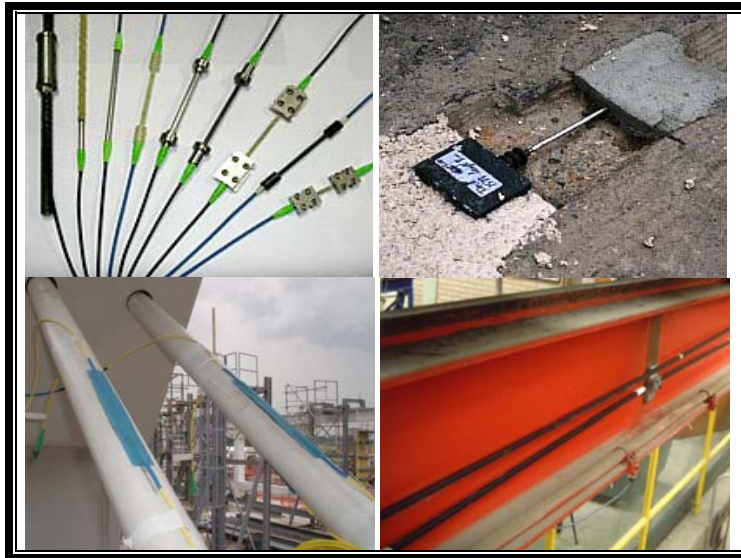


Figura 1.14. Sensores de fibra optica y algunos de los usos en ingeniería civil. (Aftab y Farhad 2004)

### 1.3. MÉTODOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS E IDENTIFICACIÓN DE DAÑO

Se han ideado varios métodos para caracterizar la información recabada y aplicarla al conocimiento de la estructura, entre estos los de mayor utilidad están los basados en vibraciones ya que permiten extraer los parámetros modales de la estructura. Estos básicamente trabajan bajo la suposición de que el sistema es excitado por ruido gaussiano blanco. Quizá el más ampliamente usado en el gremio de la ingeniería civil es el conocido como método de selección de picos. En este, el registro medido en el dominio del tiempo es convertido al dominio de las frecuencias para determinar sus respectivos espectros empleando la transformada discreta de Fourier, las frecuencias características se establecen simplemente como los picos de los espectros y las formas modales pueden ser determinadas midiendo o comparando los cocientes espectrales entre todas las salidas y un sensor de referencia. La ventaja principal del método es su velocidad, las desventajas son la selección subjetiva de frecuencias características, la carencia de estimaciones de amortiguamiento exactas y la determinación no sistemática de formas modales. (Doebling, Farrar y Prime, 1996).

Los algoritmos de detección de daño empleados en conjunción consisten en la detección de cambios en la forma de vibrar de la estructura. Los más comúnmente utilizados son:

- Métodos basados en función del cambio de las frecuencias de resonancia
- Detección de daño basados en el vector modal residual
- Métodos basados en cambios de curvatura de la forma modal
- Métodos de actualización de matriz

A continuación se explica de manera somera en que consisten estas metodologías.

### 1.3.1. Métodos basados en cambios de las frecuencias de resonancia

La reducción de las frecuencias de resonancia indicarán que el daño ha tenido lugar, sin embargo en la práctica, solo permitirá determinar el daño correspondiente a un solo nivel. Cawley y Adams (1979) demostraron que la determinación de la proporción de los cambios entre dos frecuencias cualesquiera, es posible determinar la ubicación y la gravedad del daño, para una aplicación práctica de este concepto que considere los valores característicos dados por la ecuación:

$$K\phi_i = \lambda_i M\phi_i \quad (1.6)$$

donde

$K$	Matriz de rigidez
$\phi_i$	i-esima forma modal
$\lambda_i$	i-esimo valor característico asociado
$M$	Matriz de masas.

De ocurrir daño, pueden cambiar las matrices de rigidez y masa, alterando las frecuencias así como formas modales, debiendo reescribirse la ecuación como:

$$(K + \delta K)(\phi_i + \delta\phi_i) = (\lambda_i + \delta\lambda_i)(M + \delta M)(\phi_i + \delta\phi_i) \quad (1.7)$$

Suponiendo que el daño no altera la matriz de masas,  $\delta K$  y  $\delta M$  es pequeña, y olvidando los términos de orden superior, tenemos:

$$(K\phi_i - \lambda_i M\phi_i) + (K - \lambda_i M)\delta\phi_i + \delta K\phi_i - \delta\lambda_i M\phi_i = 0 \quad (1.8)$$

De la ec.1.8, el primer juego de paréntesis es cero por la ec 1.6, premultiplicando 1.8 por  $\phi_i^T$  y se observa,  $\phi_i^T (K - \lambda_i M)$  que es la transpuesta de la ec 1.6, por lo cual también es cero, teniéndose:

$$\delta\lambda_i = \frac{\phi_i^T \delta K \phi_i}{\phi_i^T M \phi_i} \quad (1.9)$$

Ahora, si son conocidos los valores característicos y formas modales de la estructura (sin daño), cuando llega a ocurrir, bastará con determinar la diferencia entre los valores característicos de la estructura con y sin daño, designando a  $\delta\lambda_i$  para representar la diferencia entre el i-esimo valor característico de la estructura dañada y

su correspondiente sin daño. Ahora seleccionando un posible sitio de daño, la reducción de rigidez de sus elementos estará dada por el índice de alteración  $\alpha$ , como:

$$\delta K = (\alpha - 1)K \quad (1.10)$$

Insertando el valor de  $\delta K$  en la ec 1.10 en 1.9 se puede determinar  $\delta\lambda_i$  y de forma similar  $\delta\lambda_j$  pero en términos de un parámetro desconocido. La proporción  $\delta\lambda_i/\delta\lambda_j$  es sin embargo, independiente y totalmente determinada. Si el sitio de daño seleccionado es realmente el sitio de daño, la proporción  $\delta\gamma_i/\delta\gamma_j$  debe ser igual o cercana a la relación  $\delta\lambda_i/\delta\lambda_j$ .

Poniendo en práctica este procedimiento se observa la limitación del método, puesto que una gran reducción en la rigidez de un elemento causa sólo pequeños cambios en las frecuencias. En algunas pruebas la pérdida del 50% de rigidez solo causa 7% de reducción en frecuencias fundamentales y para casos en que se pierde el 15% en rigidez solo se detecta 1.3% en la reducción de frecuencia, lo cual puede ser ocultado por ruido en las mediciones y efectos ambientales, *Farrar (1996)*, además, solo se puede identificar el daño correctamente cuando esta concentrado en un sitio, cuando la estructura es simétrica, existe ambigüedad en la identificación del sitio.

### 1.3.2. Detección de daño basado en el vector Modal residual.

Este método se basa en la medición de las frecuencias y formas modales de la estructura dañada. La ecuación de la estructura dañada puede ser escrita como:

$$(K + \delta K)\phi d_i - \lambda d_i M \phi d_i = 0 \quad (1.11)$$

donde:

$\phi d_i$     i-esima forma de la estructura dañada  
 $\lambda d_i$     Valor característico asociado

Asumiendo, además, que el daño no provoca cambios a la matriz de masas, donde a excepción de  $\delta K$  los elementos son conocidos o bien pueden determinarse a través de pruebas modales.

$$K\phi d_i - \lambda d_i M \phi d_i = R_i = -\delta K \phi d_i \quad (1.12)$$

Evaluando la parte izquierda de la ecuación se obtiene el vector  $R_i$  para el iésimo modo. La matriz  $\delta K$  puede contener términos diferentes de cero únicamente en aquellos grados de libertad correspondientes a donde están conectados elementos dañados. De igual forma para los términos diferentes de cero en  $R_i$ .

Conociendo los grados de libertad afectados y la relación de conectividad entre los elementos conectados en ese grado de libertad, se puede determinar la localización del daño. Cuando más de un modo es determinado, una suma absoluta de los residuos modales puede usarse para determinar la ubicación del daño. Al usar la suma absoluta la forma modal debe normalizarse apropiadamente con el propósito de que los elementos individuales de diferentes formas modales tengan la misma magnitud e importancia.

Teniendo identificados los elementos dañados es posible expresar  $\delta K$ , como la suma ponderada de las rigideses de los elementos dañados, los factores de ponderación son las incógnitas en el problema para determinar la severidad de daño, en el caso de que se altere la rigidez de un elemento  $j$  se expresará en términos de  $\alpha_j K_j$  como:

$$\delta K = \sum K_j (\alpha_j - 1) \quad (1.13)$$

Donde la sumatoria es efectuada para todos los elementos dañados, definiendo  $\beta_j = 1 - \alpha_j$  se puede expresar como:

$$(\sum \beta_j K_j) \phi d_i = -R_i \quad (1.14)$$

Cuando más de un modo es determinado, la siguiente expresión puede usarse en lugar de la ecuación anterior, como:

$$\sum |(\sum \beta_j K_j) \phi d_i| = \sum |R_j| \quad (1.15)$$

Estas ecuaciones pueden resolverse obteniendo los factores  $\beta_j$ . En general, se obtendrá más de un valor para cada factor  $\beta_j$ . Los diferentes valores pueden ser promediados para obtener una mejor estimación.

En casos prácticos las formas modales pueden ser muy similares por lo que las diferencias pueden ser cero, o muy pequeñas, por lo que debe incluirse un número suficiente de modos a fin de localizar los elementos dañados que se encuentren en la cercanía de algunos de los nodos. Otra limitante es que el método requiere disponer de un modelo de elemento finito de la estructura, en donde, las formas modales de la estructura con y sin daño puedan representarse previa calibración contra los daños medidos.

### **1.3.3. Método basado en la curvatura de la forma modal**

Este método puede ser útil para detectar la ubicación de daños en una estructura que se deforma principalmente en flexión. Como la curvatura es inversamente proporcional a la rigidez flexión como se demuestra en la ecuación:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (1.16)$$

Donde, la primera parte de la ecuación anterior, representa la curvatura a una distancia  $x$ . Como los daños reducen la rigidez de flexión, la curvatura aumentará en la cercanía del daño, por lo que comparando las curvaturas pre y post daño podrán ubicarse dichos efectos.

La curvatura de la forma modal puede obtenerse de las componentes de los desplazamientos medidos para la forma modal de interés, como:

$$\frac{(\phi_i)^{k+1} - 2(\phi_i)^k + (\phi_i)^{k-1}}{h^2} \quad (1.17)$$

donde:



$k - 1, k, k + 1$	Denota los puntos en que se midieron los desplazamientos.
$h = x_{k+1} - x_k = x_k - x_{k-1}$	Distancia entre los puntos.
$(\phi_i)^k$	Desplazamiento modal en el punto k para el i-esimo modo.

El método de la curvatura de la forma modal, es útil para determinar la ubicación del daño pero no puede proporcionar una estimación de su gravedad. Además, la utilidad del método está limitada a estructuras cuya modelación puede simplificarse al grado de representarse como vigas (en el caso de puentes, *fig.1.15*) o péndulos invertidos (edificios).

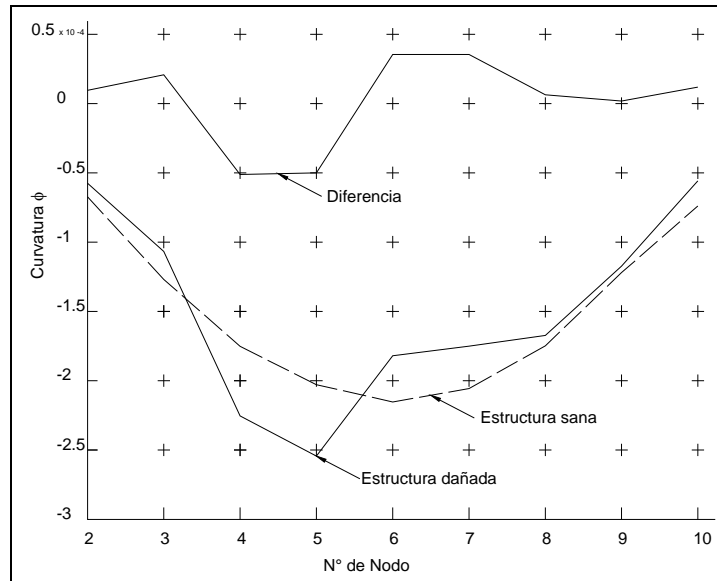


Figura. 1.15. Ejemplo de aplicación del método en un puente compuesto de 10 secciones (Grattan y Meggitt 1999).

### 1.3.4. Métodos de actualización de matrices

Estos métodos están basados en la determinación de perturbaciones en las matrices de propiedades, tales como la rigidez  $K$ . Identificando la perturbación se puede determinar tanto la ubicación y gravedad del daño. En general, el número de parámetros desconocidos es significativamente mayor que el número de frecuencias y formas modales medidas. El problema es, por lo tanto, indeterminado y tiene una infinidad de soluciones. Para obtener una solución única debe reducirse al mínimo las incógnitas mediante una función objetivo, sujeta a algunas restricciones. Diferentes funciones objetivo pueden ser utilizadas: norma de la solución estimada, rango de perturbación de  $\delta K$ , norma del vector modal residual  $R_i$ , entre otros. Entre las restricciones pueden incluir satisfacción de una ecuación de valores característicos y preservación de las propiedades de densidad y conectividad de las matrices, motivo por el que existe un gran número de métodos.

Asumiendo que se mantienen intactas las masas se tendrá la ecuación:

$$\delta \lambda_i = \phi_i^T \delta K \phi_i \tag{1.18}$$

Dada la sensibilidad de los valores característicos al cambiar la matriz de rigidez esta puede expresarse:

$$\delta K = \sum_{j=1}^n (\beta_j k_j) \tag{1.19}$$

donde

- $n$       Número de elementos.  
 $k_j$      Rigidez de j-esimo elemento.

Sustituyendo se tiene:

$$\delta\lambda = -\sum_{j=1}^n \phi_j^T K_j \phi_j \beta_j \quad (1.20)$$

O bien:

$$D\beta = -\delta\lambda \quad (1.21)$$

Si la matriz  $D$  es cuadrada la ecuación puede ser resuelta para  $\beta$ , dando:

$$\beta = -D^{-1}\delta\lambda \quad (1.22)$$

Realizando álgebra de matrices se tiene que:

$$\beta = -D(DD^T)^{-1}\delta\lambda \quad (1.23)$$

Como se supone que la estructura está dañada se debe plantear una restricción adicional para los cambios de rigidez  $0 \leq \beta \leq 1$ . La cual limita los valores para que sean razonables.

El problema ahora se convierte en un problema de optimización no lineal donde la función objetivo es definida por la ecuación anterior, con valores limitados por la desigualdad.

Últimamente, se han desarrollado una serie de técnicas también en el dominio de las frecuencias que llevan por nombre, identificación estocástica de subespacios, tienen la ventaja de ocuparse con cierta facilidad de los problemas de contaminación por ruido y formas modales complejas. No obstante, se reportan problemas asociados a la solución de sistemas no lineales, como convergencia no garantizada, alta sensibilidad respecto a los valores iniciales y por consiguiente carga de cómputo desmesurada.

Es importante hacer notar que a la fecha existe en desarrollo otros métodos en su mayoría aun experimentales, basados en los mismos principios básicos, pero que implementado el uso de técnicas probabilísticas refinan los resultados, prometiendo estimar con precisión la ocurrencia, ubicación y nivel de daño. Así mismo, se complementan con algoritmos que miden cambios en la flexibilidad y rigidez de la estructura de interés, empleando para el análisis un esquema lógico basado en redes neuronales.

## 2. ANÁLISIS DE SEÑALES PARA DETERMINAR PROPIEDADES DINÁMICAS EN ESTRUCTURAS

### 2.1. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Para abordar el tema resulta de importancia conocer el tipo de datos que se están recabando e identificar sus características, las cuales se encuentran estrechamente ligadas al trabajo de los sensores y sus principios de funcionamiento. Se puede decir que una señal es cualquier perturbación en un medio, capaz de ser perceptible, como un movimiento mecánico o vibración, emisión de luz, sonido u otro tipo de energía, aunque hoy día se asocia más al fenómeno eléctrico por su tratamiento y aplicaciones cotidianas. Las señales se clasifican en cinco tipos, señales on/off, tren de pulsos, señales DC, variables en el dominio temporal y variables en el dominio de las frecuencias, estas últimas son las que permiten realizar una exploración del comportamiento dinámico de la estructura, partiendo para ello de señales que originalmente fueron medidas en el dominio del tiempo, de las cuales solo con un análisis matemático permitirán obtener las características de interés. (Manuel, Biel y Prat, 2006)

Los dispositivos utilizados para captar estas señales consisten de instrumentos de registro de alta sensibilidad, los cuales reconocen directamente los movimientos vibratorios en una o varias direcciones ortogonales principales del punto de medición seleccionado. En el aparato los movimientos se transforman internamente en señales eléctricas (transductor) que en función de los niveles de voltaje detectados, son escalados de forma directamente proporcional a la señal de entrada (proceso que se conoce como condicionamiento de la señal) para su posterior almacenamiento en dispositivos de memoria de estado sólido, que permiten su recuperación hacia algún equipo de cómputo personal.

Adicionalmente, otros procesos de carácter electrónico que llegan a realizarse dentro del instrumento son, preamplificación, filtrado y amplificación de señal; los primeros para aumentar la intensidad de señal obtenida del sensor, ya que generalmente en el caso de vibraciones ambientales es débil; los filtros se utilizan para eliminar las señales producidas por fuentes de ruido ajenas que pueden dificultar la identificación de los parámetros de interés, y los terceros para aumentar la magnitud de la señal a niveles apropiados para su registro y procesamiento.

El procesamiento de la señal se define por lo general como la resolución de determinados algoritmos para obtener la información contenida intrínsecamente en esta, a fin de visualizar y/o determinar características que permitan definir parámetros propios de la fuente generadora, en este caso edificaciones civiles, los cuales en particular para nuestro campo de estudios pueden dejar de manifiesto la existencia de comportamientos anómalos o simplemente verificar el cumplimiento de hipótesis formuladas durante el proceso de diseño de estas.

Este proceso comienza después de realizada la campaña de monitoreo, con la extracción de las señales de la memoria física de los aparatos de medición, que generalmente se encuentra almacenada en forma digital, accediendo a través de conexiones, alámbricas vía puerto serial de la computadora o inalámbricas vía internet, valiéndose a su vez de algún software. Para el desarrollo de este trabajo el proceso de adquisición se realizó mediante el programa AllView (AllView, 1998), el cual controla el funcionamiento interno de los equipos, sin embargo, su empleo está limitado al cálculo de velocidad, desplazamiento y espectros de Fourier y de potencia para cada canal de forma independiente. Este programa permite transformar y guardar las señales registradas en formato ASCII, con lo cual es posible realizar un respaldo transferible a herramientas de cómputo más poderosas para realizar un análisis refinado a posteriori.

Cada registro posee tres componentes, cada uno de los cuales puede alcanzar extensas longitudes dependiendo del tiempo censado, por ejemplo, para 5 minutos de medición registra alrededor de 30,000 muestras, datos cuyo análisis representa una inversión considerable de tiempo, que de no ser por la ayuda de las computadoras resultarían prácticamente imposibles de analizar. Puesto que se requiere verificar la calidad de los registros sísmicos y aplicar diversos algoritmos encaminados a identificar las características de cada estructura.

Para fines del análisis y obtención de formas modales existe una variedad de métodos a emplear, tratándose algunos más adelante, sin embargo en general requieren de la sincronización las señales previa reducción de ruido y corrección de línea base, de modo que, de las señales involucradas sea posible la obtención de espectros a partir de los cuales por comparación y auxiliándose en operaciones secundarias entre estos, se identifiquen los elementos de interés, buscando una elevada pertinencia ante un mismo evento dígame vibraciones ambientales o sísmicas.

## 2.2. ANÁLISIS DE SEÑALES EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El proceso en esencia descompone o expande una señal en términos de funciones seno y cósenos de diferentes frecuencias cuya suma corresponde a la señal original, es decir, es capaz de distinguir las diferentes componentes de frecuencia de la señal y sus respectivas amplitudes, *fig.2.1*.

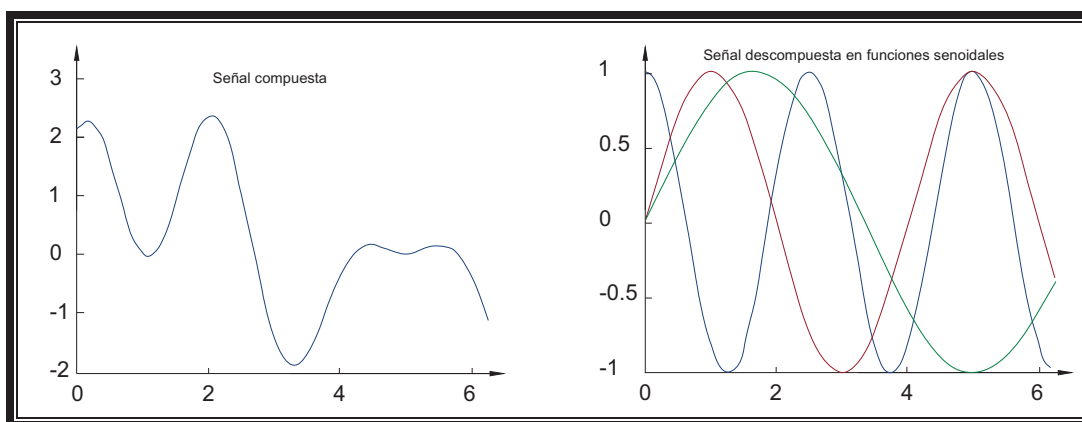


Figura 2.1. Descomposición de una señal en sus componentes senoiales (Martínez y Castro 2002).

Así, una función dada puede expresarse como:

$$f(x) = c_1\phi_1(x) + c_2\phi_2(x) + \dots + c_k\phi_k(x) \quad (2.1)$$

Donde

$\phi_i$       Corresponde a funciones seno y coseno de distinta frecuencia.

$c_i$       Coeficientes que afectan la amplitud de la función.

Tomando la forma de la conocida serie de Fourier

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_n \cos kx + b_n \text{sen} kx) \quad (2.2)$$

Usando la identidad de Euler  $e^{ikx} = \cos kx + i \text{sen} kx$ , esta serie se puede reescribir como una combinación de funciones exponenciales complejas, que al extender para todos los valores de  $x$ , da lugar a lo que se conoce como la transformada de Fourier, *ec. 2.3*, que tiene la particularidad de permitir el manejo de las señales en el dominio de la frecuencia y visualizar sus componentes de una forma clara.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi f t} df \quad F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(s)e^{-j2\pi f s} ds \quad (2.3)$$

En mediciones de sistemas estructurales, la señal  $x(t)$  se obtiene a través de un convertidor analógico-digital, por lo que la representación de la transformada de Fourier se realiza en un periodo de tiempo finito en forma discreta. Si se considera una frecuencia de muestreo  $f_s$ , con un número de muestras  $n$  en tiempo y frecuencia, la resolución  $\Delta f = f_s/n$  y el intervalo  $\Delta t = 1/f_s$ . La transformada discreta, entonces, se puede expresar a través de las relaciones:

$$F_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi i k / n} \Delta t \quad x_i = \sum_{k=0}^{n-1} F_k e^{j2\pi i k / n} \Delta f \quad (2.4)$$

Al multiplicar la ec. 2.4, por  $\Delta f$ ,  $F_k$ , entonces, representa una amplitud de densidad espectral. Esta amplitud es la forma final de lo que se conoce como transformada discreta de Fourier, DFT, de la forma:

$$F_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi i k / n} \quad x_i = \sum_{k=0}^{n-1} F_k e^{j2\pi i k / n} \quad (2.5)$$

La implantación directa de las ecuaciones requiere aproximadamente  $n^2$  operaciones complejas. Sin embargo, cuando el tamaño de la secuencia es  $n = 2^m$ , para  $m = 1, 2, 3, \dots$ , entonces el cómputo de la DFT puede mejorar en aproximadamente  $n \log_2(n)$  operaciones. En procesamiento digital se conoce a este caso particular como la transformada rápida de Fourier o FFT. La señal se muestrea de tal manera que produce una cantidad específica de números binarios que representan el segmento de la función de entrada. Estos números se transforman a través de la FFT en valores complejos en el dominio de frecuencias. Para cada punto de frecuencia  $A(f)$  se calcula con el promedio de las amplitudes  $A_i$  de acuerdo con la ec. 2.6.

$$A(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2(f)} \quad (2.6)$$

Tras el proceso matemático se obtienen básicamente dos elementos de importancia; el primero, espectro o contenido de frecuencias de la señal y el segundo el ancho de banda como medida cuantitativa del rango de frecuencias donde se concentra la potencia o energía de una señal. (Ayala, García y Castelán, 2001)

Tal proceso es repetido para cada segmento de señal en que se dividió la original, obteniendo sus respectivos coeficientes de Fourier, no obstante, se observaran diversas frecuencias pico entre cada segmento, que agrupándolas permitirán conocer las diferentes bandas de frecuencia características y que solo tras un promediado se puede llegar a establecer alguna como frecuencia importante, fig.2.2.

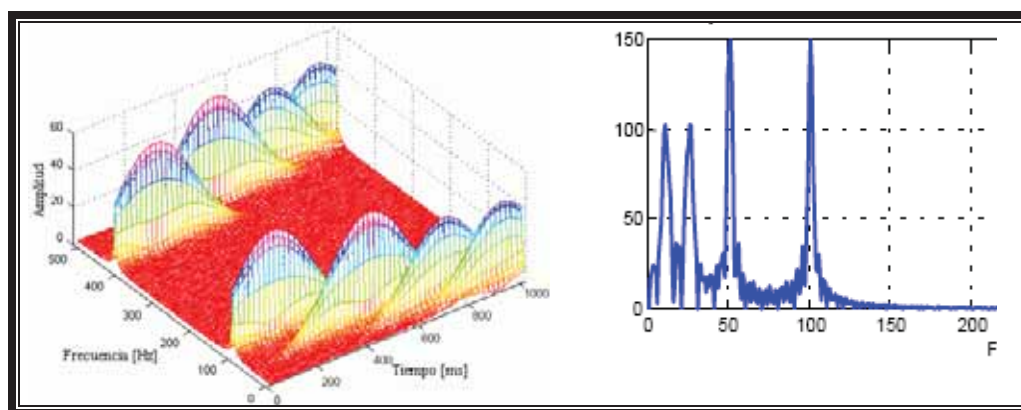


Figura 2.2. Vista del proceso de ventaneo para una señal dada (Martínez y Castro 2002).

No obstante la existencia de ruido en la señal puede provocar la aparición de múltiples picos dentro del espectro, de modo que para mejorar la definición de las frecuencias relevantes se determina el espectro de potencia, en términos simples es un indicador de la cantidad de energía que se libera en una determinada frecuencia, para la señal de interés se calcula utilizando la *ec. 2.7*.

$$S(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 \quad (2.7)$$

donde:

$X(f)$  Es la transformada de Fourier de la señal  $x(t)$ .  
 $X^*(f)$  Es el conjugado complejo de  $X(f)$ .

Hasta este punto la señal es procesada de forma independiente; para determinar las relaciones dinámicas entre señales de entrada y salida se utilizan cuatro herramientas adicionales: el espectro cruzado, función de coherencia, función de transferencia y determinación de fases.

### ***Espectro Cruzado***

Al igual que en el espectro de potencia, esta permite identificar las frecuencias con un alto índice de importancia y que a su vez se encuentran presentes en ambas señales, ello en función de la cantidad de energía presente entre ellas, para su cálculo se emplea la convolución entre las transformadas de Fourier de las señales involucradas, *ec.2.8*.

$$S_{XY}(f) = X^*(f)Y(f) \quad (2.8)$$

### ***Función de Coherencia***

El valor de la función representa la fracción de la salida del sistema que se relaciona directamente con la entrada. En otras palabras, es una función de correlación cruzada en el dominio de las frecuencias. La función de coherencia  $\gamma^2(f)$  se obtiene al aplicar la *ec.2.9*, por sus características es adimensional y desarrolla valores próximos a 0 cuando no existe relación entre las señales comparadas y por el contrario, 1 para frecuencias afines entre si.

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{YX}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad (2.9)$$

### ***Cocientes Espectrales***

Sirve para determinar el nivel de ganancia en energía que existe entre la señal de salida y entrada al sistema estructural, siendo posible relacionar la amplitud de la señal de entrada con la de salida, dicho cociente se calcula como lo indica la *ec. 2.10*.

$$|H(f)|^2 = \frac{S_{XY}(f)}{S_{XX}(f)} \quad (2.10)$$

donde:

$S_{XX}(f)$  Indica la transformada de Fourier de la señal X en el punto de entrada X.  
 $S_{XY}(f)$  Es la transformada de Fourier de la señal X en el punto de salida Y.

### ***Fase***

Para fines ingenieriles, el espectro de fase sirve para determinar la dirección del movimiento de un punto de medición respecto a la de otro, para su obtención se determina la forma polar a partir de las componentes complejas calculadas del cociente espectral. Los valores cercanos a  $0^\circ$  en una frecuencia dada, indican movimiento simultáneo en un mismo sentido (en fase), mientras valores en torno a  $180^\circ$  representan movimiento en sentido opuesto.

Dentro de los inconvenientes de implementar la transformada de Fourier como sistema de análisis están, que al emplear un método numérico (transformada discreta de Fourier) en ocasiones suele producir un efecto de "aliasing" o solapamiento, desapareciendo frecuencias, enmascarándolas o sustituyéndolas por otras, dicho efecto es más marcado cuanto mayor es el espacio entre muestras, (digitalización de la señal de entrada muestreo) y cuanto mayor es el número de puntos de la ventana de muestreo, observándose la pérdida de información, pudiendo ser en ocasiones esas frecuencias perdidas, las responsables de un acoplamiento por resonancia y por lo tanto, causantes de daños de los cuales habitualmente no se encuentra explicación cuando se trata de asociar a un análisis de Fourier normal. Aunado a esto se presentan algunos errores en el método, por el inconveniente de tratar un fenómeno transitorio y no lineal, como señal estacionaria, *fig.2.3*.

En algunos casos la transformada de Fourier no es capaz de revelar procesos de fallo, es decir, a pesar de observarse vibraciones, fatigas y fallos, al analizarse empleando la transformada de Fourier no consigue determinar un patrón claro del fenómeno.

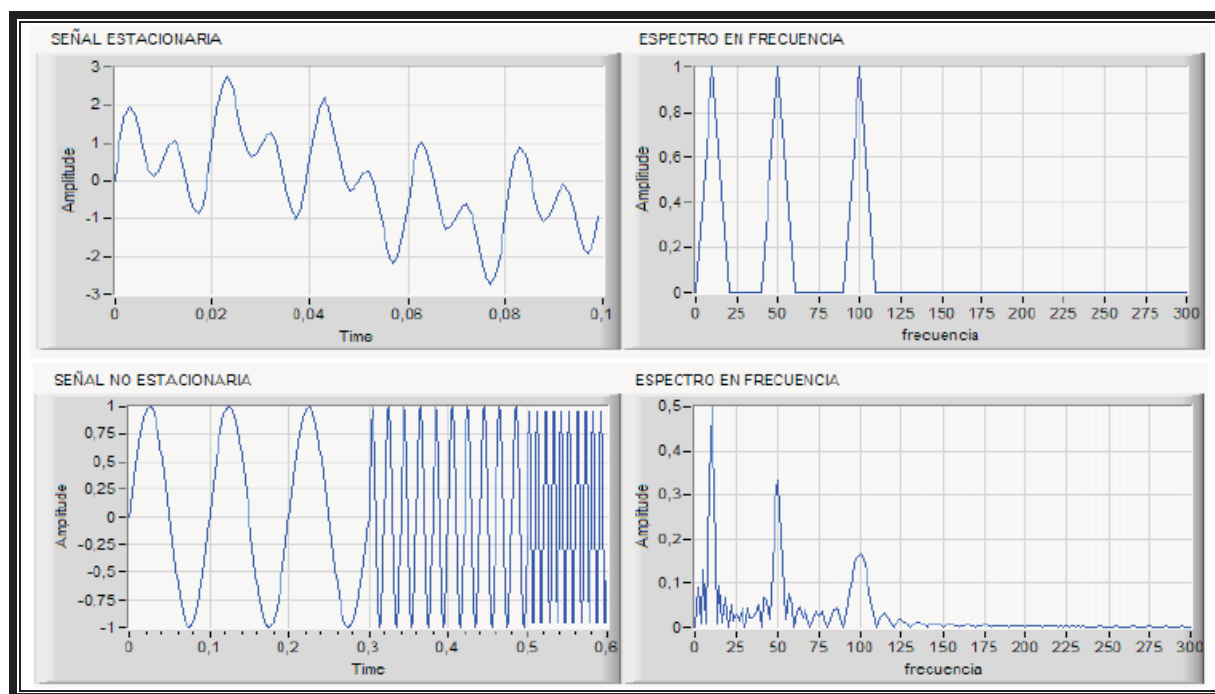


Figura 2.3. Señales, estacionaria y no estacionaria, con sus respectivos espectros de Fourier (Romero 2006).

### 2.3. OTROS MÉTODOS DE ANÁLISIS

Además del análisis basado en transformada de Fourier, se han desarrollado algunas técnicas que buscan corregir las limitaciones de rendimiento derivadas de la compensación entre el tiempo y la frecuencia, asociadas a la resolución del algoritmo, en el cual, el ancho de la ventana se mantiene fijo durante el análisis para la totalidad de la señal, calculando con la misma resolución tanto frecuencias bajas como frecuencias altas. Para ello una combinación entre tiempo y frecuencia, resulta la representación más adecuada de estas señales por su naturaleza no estacionaria, proporcionando información extra acerca de cómo el contenido

espectral de la señal evoluciona con el tiempo. Este tipo de análisis es posible realizarlo en cualquier señal empleando una técnica alternativa llamada análisis multiresolución, la cual analiza la señal para diferentes frecuencias con diferentes resoluciones, evitando la rigidez del ancho de ventana como la ocurrida cuando se emplea transformada de Fourier.

Los métodos más notables que emplean este planteamiento son la transformada de Hilbert y la transformada Wavelet, sin embargo, cabe aclarar que estas por si solas no desplazan a la Transformada de Fourier (TF), sino complementan dicha herramienta.

### 2.3.1. La Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert. Matemáticamente se obtiene de la convolución de la señal de estudio  $x(t)$  y una función impulso  $h(t) = \frac{1}{\pi t}$ , de modo que se puede expresar como:

$$\hat{y}(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{x(\tau)}{(t-\tau)} d\tau \quad (2.11)$$

Las ventajas de ésta respecto a la tradicional transformada de Fourier son:

- Puede tratar series cortas y no necesariamente periódicas.
- El proceso o señal no tiene que ser lineal
- La señal no tiene que ser estacionaria

El proceso más referido es el de descomposición, desarrollado por Huam siendo denominado a este método transformada de Hilbert-Huam, para su uso se deben cumplir las siguientes hipótesis o condiciones.

- La señal debe tener al menos dos puntos extremos, es decir un máximo y un mínimo.
- El tiempo de referencia es el definido por el que transcurre entre estos dos.
- La señal sólo posee puntos de inflexión, se puede diferenciar las veces que haga falta para tener los citados máximos y mínimos.

El desarrollo del método consiste en:

Identificación de los extremos máximos y mínimos

- Posteriormente se unen los máximos por una curva definida por ecuación cúbica o de tercer grado y lo mismo para los mínimos, de forma que la señal se envuelve entre dos funciones llamadas máxima y mínima.
- A partir de estas funciones se halla la serie o función media denominada  $m_1$ .
- Se genera entonces la serie  $h_1$  como la diferencia entre la señal original y la media.

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (2.12)$$

- Tomando ahora la serie  $h_1$  se repite el proceso de forma iterativa tomando la forma:

$$h_{1k(t)} = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (2.13)$$

Continuando hasta que se cumpla  $SD \leq 0.3$ ; donde SD esta dado por:



$$SD = \sum_{t=0}^T \left[ \frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (2.14)$$

- Alcanzado el valor límite de SD se identifica la última serie  $h_{1k}(t)$  como  $c_1(t)$  y con ésta se obtiene la nueva serie  $r_1(t)$  de la forma:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (2.15)$$

- A la serie  $r_1(t)$  se le aplica nuevamente todo el proceso hasta que al final se obtiene la serie  $c_2(t)$  quedando una nueva serie de la forma:

$$r_2(t) = r_1(t) - c_2(t) \quad (2.16)$$

- Repitiendo el proceso hasta que la función  $c_i(t)$  sea una función monótona, *fig.2.4.*

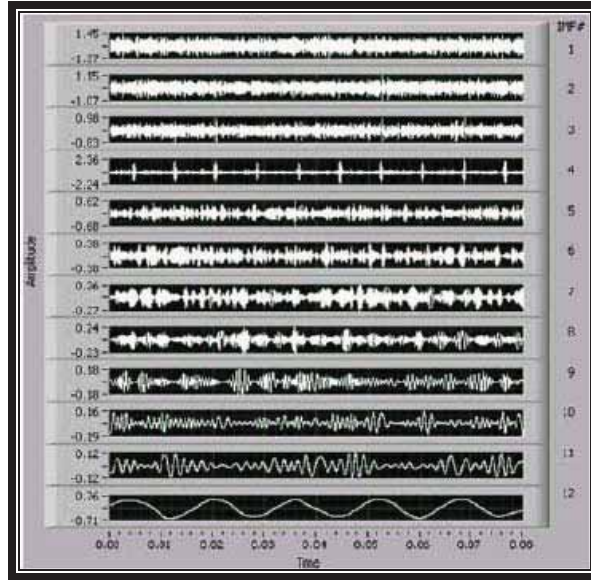


Figura 2.4. Proceso de descomposición de una señal hasta convertirla en una señal monótona (National Instruments 2006).

- Una vez descompuesta la señal en sus funciones ortogonales, se realiza la transformada de Hilbert de cada una de las series unitarias, determinando para cada una de ellas la amplitud y frecuencia instantáneas. Para posteriormente reconstruir la función en base a los resultados, como:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int w_j(t) dt} \quad (2.17)$$

De esta última expresión se observa una forma similar a la obtenida por transformada de Fourier, diferenciándose en que, amplitud y frecuencia dependen del tiempo, siendo representables en espacio 3D, denominado espectro de Hilbert, del cual se puede definir la variación de la frecuencia respecto el tiempo, no

obstante se puede obtener una representación similar al espectro de Fourier conocido como espectro marginal de Hilbert definido como:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (2.18)$$

Este mostrará la energía total para cada valor de frecuencia, también es útil para el cálculo del daño a equipos y estructuras. (Gavilán, 2007)

Otros parámetros de utilidad que se determinar son:

- Coeficiente de estacionalidad, muestra si el proceso es o no estacionario; en caso de serlo será constante e igual a cero, en aquellas frecuencias que por el contrario no lo sean gráficamente se observaran picos en las frecuencias donde reside la no estacionalidad.

$$DS(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T \left( 1 - \frac{H(\omega, t)}{n(\omega)} \right) \quad (2.19)$$

donde

$$n(\omega) = \frac{1}{T} h(\omega) \quad (2.20)$$

- El parámetro de energía instantánea, muestra la energía presente en cada instante permitiendo observar como se va efectuando la degradación de la señal.

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (2.21)$$

### 3.3.2. La Transformada Wavelet

La transformada Wavelet (de ondículas u ondeletas) representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada wavelet madre). Haciendo posible una buena representación de una señal tanto en el dominio del tiempo como en el de las frecuencias de forma simultánea, con lo que se puede determinar el intervalo de tiempo en el cual aparecen determinadas componentes espectrales, útiles ante fenómenos transitorios. Ofrece además buena resolución temporal y baja resolución frecuencial en eventos de altas frecuencias; y por el contrario, ofrece buena resolución frecuencial a costa de baja resolución temporal en eventos de bajas frecuencias. Este comportamiento es de utilidad cuando la señal a analizar tiene componentes de alta frecuencia de corta duración, y componentes de baja frecuencia de larga duración, como es el caso. (Martínez y Castro, 2002).

La metodología seguida para el análisis por medio de Wavelet's es similar al seguido cuando se utiliza la transformada rápida de Fourier, en el sentido de que la señal original se procesa (en el dominio del tiempo) a través de filtros paso bajo y paso alto que eliminan ciertas componentes, en este caso a su vez dividen la señal original en alta y baja frecuencia, la diferencia radica en el análisis multiresolución con ventanas variables, es decir, el análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas angostas y el análisis de las frecuencias de menor rango se hace utilizando ventanas anchas, permitiendo analizar señales en múltiples bandas de frecuencia. El procedimiento de filtrado se repite para las señales resultantes del proceso inicial, separando en porciones de alta o baja frecuencia. Este procedimiento es repetido varias veces, como resultado

se obtiene una serie de coeficientes que representan la descomposición de la señal original en el grupo de señales que están contenidas dentro de la misma pero en sus diferentes bandas de frecuencia, *fig.2.5*.

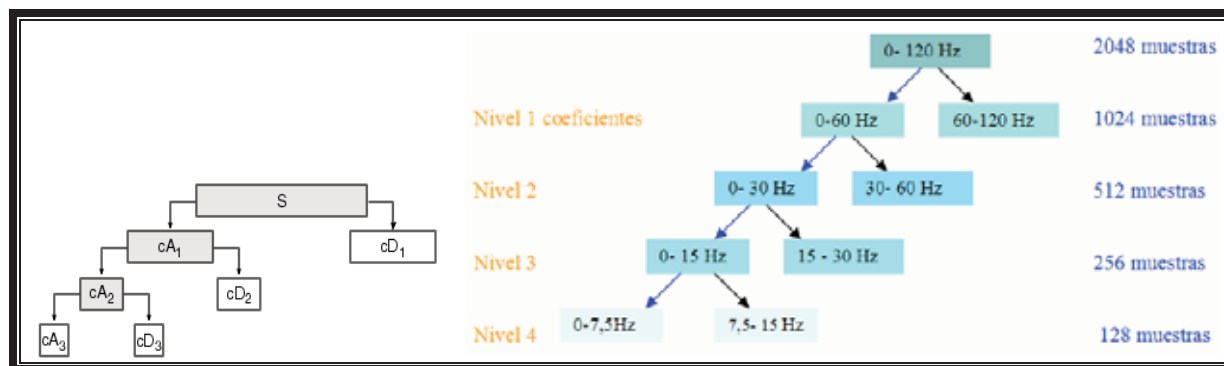


Figura 2.5. Estructura de filtrado y ejemplo empleado en las wavelet. (Romero 2006).

Dichos coeficientes se obtienen como producto de la correlación entre la señal original y una función patrón de características especiales y diferente a las funciones seno-coseno empleadas en análisis de Fourier, conocida como Wavelet madre, *fig.2.6*, a partir de la cual, empleando un proceso de escalado se encarga de realizar un inventariado; por cada desplazamiento de esta ventana es calculada una serie de coeficientes Wavelet. A medida que cambia la escala a escalas mayores, la Wavelet madre se estrecha con lo que se mejora la resolución temporal y se pierde resolución en la frecuencia; cuando por el contrario se disminuye la escala, la Wavelet madre se ensancha, perdiendo resolución en el tiempo, pero ganando en la frecuencia. Así, modificando el tamaño de la Wavelet madre y desplazándola por el eje temporal, se generan celdas con una magnitud de coeficientes que varían dependiendo de las características de esta onda en relación con la señal a analizar. (Chau y Liang 2004).

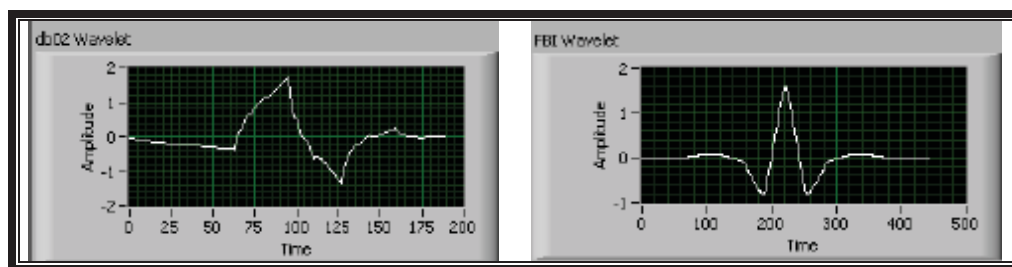


Figura 2.6. Ejemplos de wavelet madre empleadas (National Instruments 2006).

Generalmente la transformada Wavelet en su forma continua es representada como:

$$WT_{u,a} = (f, \psi_{u,a}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{u,a}(t) dt \quad (2.22)$$

donde:

$$\psi_{u,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-u}{a}\right) \quad (2.23)$$

Se conoce como Wavelet madre y se ve afectada por los parámetros  $u$  y  $a$ , llamados parámetros de traslación y de escala respectivamente, durante un análisis, la traslación definirá el tamaño y localización de la ventana, mientras la escala, establecerá la definición de las frecuencias a detectar, escalas pequeñas corresponden a altas frecuencias y escalas mayores a bajas frecuencias.

Matemáticamente lo que hace, es calcular el producto interno entre la función que define la señal y la que define a la Wavelet madre, sin embargo al igual que en el caso de la transformada de Fourier, para el caso de señales discretas, esta se transforma en una sumatoria de la forma:

$$C(j,k) = \sum f(n)\psi_{j,k}(n) \quad (2.24)$$

donde su respectiva wavelet madre es:

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{-\frac{j}{2}}\psi(2^{-j}n - k) \quad (2.25)$$

La cual, sigue la metodología descrita inicialmente para la determinación de frecuencias.

#### **2.4. LA INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL**

Como puede advertirse por el tipo de información recabada de una instrumentación se cuenta con un gran número de datos, por lo que se desarrolló el instrumento virtual, el cual emplea una metodología propuesta con el fin de optimizar los procesos que se han venido empleando.

Un instrumento cualquiera es considerado por lo general como un aparato o herramienta a través del cual se puede observar, medir y operar algún fenómeno de interés. Dicha descripción esta asociada al empleo de paneles llenos de elementos mecánicos o circuitos eléctricos en los que de forma tangible se lleva a cabo un proceso físico que sirve para obtener un resultado determinado y que por su complejidad o robustez puede resultar costoso su empleo, sin embargo, con los adelantos tecnológicos se han desarrollado los llamados instrumentos virtuales, estos no son otra cosa que programas o módulos de software que intentan simular cada uno de los aspectos funcionales de instrumentos reales, apoyándose en hardware y elementos externos para realizar una serie de instrucciones desde un ambiente gráfico administrado en pantalla como si se tratara de un instrumento físico, con la principal diferencia de su alta adaptabilidad a modificaciones en el proceso externo, adecuándose a diversas necesidades de la industria e investigación, ya que por la diversidad de fenómenos que se presentan para su estudio prácticamente cada investigador o ingeniero requeriría de su propio instrumento preparado conforme al objetivo que pretende alcanzar. (*Mánuel y Del Río, 2005*).

Para la elaboración de estos Instrumentos virtuales, se puede valer de casi cualquier aplicación de programación que soporte interfases visuales, en este caso en particular se empleo el programa LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), que a diferencia de programas como Fortran, Basic, C, Pascal, etc., se trata de software de alto desempeño que no utiliza líneas de código tipo texto para crear sus aplicaciones, emplea un lenguaje de programación gráfica denominado lenguaje G, el cual a través de diagramas de bloques suministra una solución gráfica a un problema de programación, con librerías o subrutinas preprogramadas, propiamente dirigidas a la instrumentación cubriendo los pasos de adquisición de datos, análisis, monitoreo, registro e inclusive (cuando se cuenta con el hardware y equipo necesario) el control del proceso físico.

La principal ventaja de su empleo, es la simplificación de la tarea de programación debido a que como se mencionó es realizada casi en su totalidad de forma gráfica, cada programa o VI contiene tres partes principales:

- El panel frontal, que es la interfase que permitirá al usuario final la interacción hombre-máquina (interfas de usuario), la cual, simula el panel de un instrumento físico. Este permite la entrada de datos a través de la manipulación de controles los cuales son representados por casillas, perillas y botones. La salida de datos puede ser visualizada a través de indicadores los cuales se muestran en pantalla mediante valores numéricos, gráficas y medidores donde se insertan elementos de control e indicadores (como leds, selectores, etc.).

- El diagrama de bloques, es la parte medular del programa, propiamente donde se establece el código fuente o programación del instrumento, en esta ventana los elementos del panel frontal se exhiben como variables de entrada o salida con representación numérico digital o gráfica, a los cuales se les debe conectar (empleando cables ficticios) a iconos llamados bloques funcionales, formando una estructura que funciona a modo de un diagrama de flujo o circuito electrónico.

Cada nodo del diagrama de bloque se ejecuta solo cuando todos los datos de entrada están disponibles, una vez completa su ejecución, suministra datos a sus terminales de salida, y estos al siguiente nodo en la trayectoria del flujo de datos.

- El bloque o icono funcional, contiene las instrucciones que se desea realizar al ejecutar el programa. Estos abarcan necesidades que van desde la apertura de archivos, creación de estructuras, procesos matemáticos aritméticos, matriciales y booleanos, esta la generación de reportes e interconexión y control de hardware, *fig 2.7.*

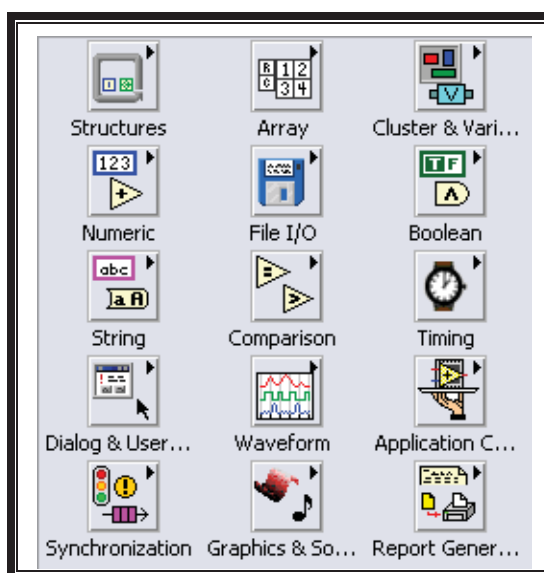


Figura 2.7. Grupos de bloques funcionales comúnmente utilizados. (Nacional Instruments 2006).

El instrumento basa su operación en el análisis de Fourier y el mecanismo de funcionamiento consta de los siguientes pasos:

#### **2.4.1. Adquisición de los datos**

Para ello se cuenta con dos opciones, apertura de archivos ya pregrabados como es el caso o bien captar la información en tiempo real (lo cual demanda contar con hardware y controladores adecuados para habilitar los módulos de adquisición de datos DAQ), dicho archivo de datos consta de un registro en formato ASCII, donde por cada renglón se establece la magnitud de aceleración censada por el instrumento, bajo los parámetros preestablecidos en este.

#### **2.4.2. División de señal y aplicación de ventanas de atenuación (enventanado)**

Debido a que se trabaja con una señal muestreada, la señal puede tener diferentes características respecto a la señal continua por pérdida de información durante el proceso que se puede ver como truncamiento de la señal, manifestándose en el espectro obtenido por la transformada de Fourier, efecto conocido como fuga espectral. Para disminuir este efecto se recurre al enventanado, proceso que consiste en la obtención del

producto de una fracción de la señal muestreada por una función denominada ventana la cual no contiene discontinuidades y presentan lóbulos secundarios en el dominio frecuencial de amplitud proporcional al ancho efectivo de la ventana, esto da como resultado una nueva señal a procesarse, sin el efecto de truncamiento. Además tiene por objeto encuadrar la señal dentro de un instante de tiempo en el cual, el fragmento de señal se puede considerar como estacionaria, es decir, el contenido de frecuencias no cambia en el tiempo y que por ende no se necesita saber en que instante de tiempo existen sus componentes frecuenciales, ya que estarán presente en cualquier instante. Dicho ancho se selecciona tomando en cuenta que cuanto más ancha sea la ventana se obtendrá buena resolución en el dominio de la frecuencia y pobre resolución en el dominio del tiempo, dado que esta ventana es de longitud finita y solo se aplica a una parte de la señal, ésta se va recorriendo hasta que la señal es cubierta en su totalidad. El programa (LabVIEW) permite el uso de las ventanas Hanning, Hamming, Blackman-Harris, Exact Blackman, Blackman, Flat\_Top, Blackman-Harris de 4 y 7 términos, Low Sidelobe, por el rango de frecuencias de interés resulta más apropiado el uso de la ventana Hanning. (Mànuel, Biel y Prat, 2006)

### ***2.4.3. Filtrado.***

Debido a que la medición de señales contiene todo el espectro de frecuencias que le es posible capturar al sensor, resulta necesario definir solo ciertos aspectos deseados de la señal, para ello se emplean filtros a fin de extraer sólo la señal de interés. Los filtros permiten extraer componentes específicos de la señal medida. Por decirlo de otro modo actúan como selectores de frecuencias separando o bien eliminando aquellas que no son de utilidad (ruido).

Idealmente se obtendrán las frecuencias deseadas sin distorsión y eliminar el resto de componentes del espectro; para conseguirlo, un filtro tiene dos bandas características que reciben el nombre de banda de paso o rango de frecuencias objetivo y banda de rechazo o atenuada correspondiente al conjunto de frecuencias que serán eliminadas.

## ***2.5. INSTRUMENTOS VIRTUALES DESARROLLADOS PARA EL ANÁLISIS DE SEÑALES.***

Para los fines de esta tesis, se desarrollaron tres instrumentos virtuales con el programa LabVIEW, los cuales permiten realizar el análisis de señales e interpretación de resultados con objeto de determinar las propiedades dinámicas de los edificios. Es de interés mencionar que estos instrumentos pueden ser de aplicación general a cualquier sistema estructural.

### **Instrumento virtual para el análisis de señales en el dominio del tiempo (IVADT)**

Este instrumento permite observar las características de un registro de *aceleración vs tiempo* en el dominio del tiempo para las tres componentes ortogonales, *fig. 2.8*, haciendo uso de de las siguientes opciones:

- ☞ Graficación del registro de *aceleración vs tiempo*.
- ☞ Evaluación y corrección de línea base.
- ☞ Cálculo y graficación del historial de velocidades.
- ☞ Cálculo y graficación del historial de desplazamientos.
- ☞ Determinación de desplazamientos máximos.
- ☞ Preproceso de los archivos de registro en formato ASCII para generación de archivos independientes en este mismo formato, correspondientes a c/u de las tres direcciones ortogonales.
- ☞ Extracción y grabación de segmentos de un mismo canal, para un análisis posterior.
- ☞ Grabación independiente de las componentes del registro, ya corregidas o seccionadas

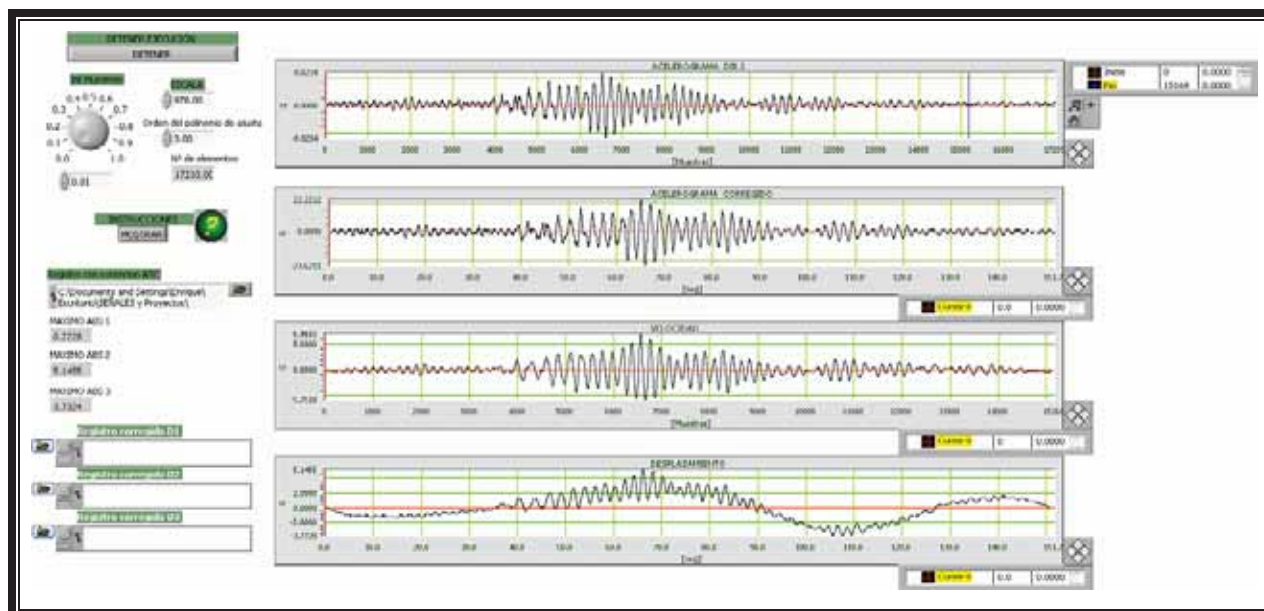


Figura 2.8. Panel principal del instrumento IVADT

A continuación se hace una descripción de los controles que posee el instrumento virtual.

#### Apertura de la ruta del registro de entrada.

Permite definir la ruta del registro de entrada de aceleración vs tiempo en formato ASCII, el cual debe contener la información correspondiente a las tres componentes ortogonales de la señal. Para ello, se puede escribir directamente la ruta del registro o bien, usar el icono “carpetas” para abrir el explorador y seleccionar el archivo correcto, *fig.2.9*.

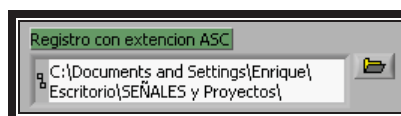


Figura 2.9. Ruta del registro de entrada.

Cabe mencionar que para los instrumentos de medición utilizados (acelerómetros GSR), el software interno o sistema operativo de los mismos (programa AV) permite generar, a partir de las señales registradas en formato binario (\*.GRS), archivos en formato ASCII. Estos archivos mantienen el mismo nombre con extensión \*.ASC y, previo a los datos de aceleración, contienen 23 líneas de encabezados con información general del evento, *fig.2.10*.

```

*****
Filename. . . . . : RES22100.ASC
Continuous File No. . . . : 3276
No. of Samples. . . . . : 17210
Pre-Event Time [s]. . . . : 30
Post-Event Time [s]. . . . : 20
Sampling Rate [SPS]. . . . : 100
Duration [s]. . . . . : 172.10
Peaks(Absolute Values):
- Channel 1 (vert ) . . . . : +4.0026e-02   0
- Channel 2 (long ) . . . . : +2.2437e-02   0
- Channel 3 (trans) . . . . : +1.9531e-02   0
- Channel 4 (U.Sum) . . . . : +0.0000e+00   0
System Test? . . . . . : NO
Periodic Test? . . . . . : NO
Day File Number . . . . . : 0
Event Start Time . . . . . : 2000/09/09 11:43:29
Unit S/N. . . . . : 310
Location . . . . . : azotea esc
Comment . . . . . : azotea parte interior escalera
AU Version . . . . . : 30216
Firmware Version. . . . . : 53
*****
Chan 1 Data (vert [ 0])
*****
0.00077
.....
-0.00077

*****
Chan 2 Data (long [ 0])
*****
0.00077
.....
0.001953

*****
Chan 3 Data (trans [ 0])
*****
0.00077
.....
0.00077

*****
Chan 4 Data (U.Sum [ 0])
*****
0.00077
.....
0.00077

```

Figura 2.10. Formato de una archivo de registro ASC. (ALLView, 1995).

### Factor de escala.

Establece la escala de unidades en las que se desea trabajar o bien aumentar la amplitud del registro original. Esto dependerá a su vez de las características del sensor con el que se registran las señales, el cual generalmente es en fracciones de gravedad o en gals.

% G. Aceleración de la gravedad estándar en la Tierra. Dicho valor está definido estándar como  $9.81 \text{ m/s}^2$ , sin embargo dependiendo del fabricante del sensor, llega a emplearse  $9.78 \text{ m/s}^2$  que corresponde al caso de gravedad en el ecuador a nivel del mar.

*Gal o galileo.* Es la unidad de aceleración en el sistema cegesimal. Se define como aquella aceleración igual a un centímetro por segundo al cuadrado [ $1 \text{ cm/s}^2$ ], equivale en el SI a [ $0.01 \text{ m/s}^2$ ].

1 G	$9.78 - 9.81 \text{ m/s}^2$
1 G	$978 - 981 \text{ cm/s}^2$
1 G	$385.04 - 386.22 \text{ in/s}^2$
1 G	$978 - 981 \text{ Gal}$



**Intervalo de muestreo.**

Intervalo de tiempo transcurrido entre la obtención de cada muestra, se establece en función del muestreo establecido originalmente en el acelerómetro con el que se obtuvo el registro.

**Orden del polinomio de ajuste.**

Tipo de ajuste que se desea emplear para mejorar la calidad de la línea base, la elección del tipo, corresponderá al grado de desvío producido en el registro, puede ser de:

1<sup>er</sup> grado, ajuste a una línea recta de la forma  $y = mx + b$

2<sup>o</sup> grado o superior, ajuste a un polinomio de la forma  $y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a$

**Botón de ejecución.**

Inicia la ejecución del instrumento, una vez iniciado, entra en un ciclo continuo donde se permite variar los parámetros contenidos en el resto de los controles, ello para observar el cambio producido y decidirse por resultados razonables, *fig. 2.11*.

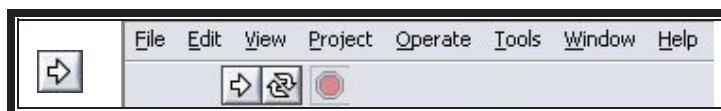


Figura 2.11. Icono y ubicación del mismo para dar inicio a la ejecución de la aplicación.

**Botón detener.**

Detiene la ejecución del instrumento, no obstante los resultados gráficos permanecerán presentes para su uso. Se puede accionar pulsando en el cuerpo principal el botón detener o bien el botón stop (en rojo) bajo la barra de menús, *fig. 2.12*.

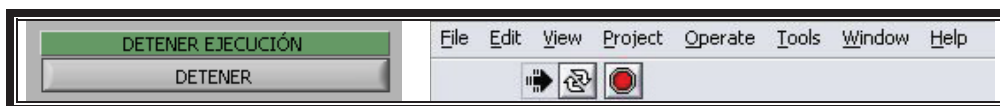


Figura 2.12. Botones para detener la ejecución

**Ruta de registros de salida.**

La etiqueta establece la ruta del registro de salida para cada canal, para ello se puede escribir directamente la ruta o bien abrir el explorador para seleccionar la dirección más adecuada. Así mismo, se puede renombrar el archivo y extensión de forma que sea manejable por el usuario, de forma predeterminada \*.d1, \*.d2, \*.d3, para la dirección correspondiente.

Para evitar la generación de archivos por accidente, o bien, si solo se requiere alguno de los canales, se debe habilitar el botón a un costado del icono "carpetas" para cada una de las direcciones de interés, *fig. 2.13*. Al final del proceso se genera un archivo con la extensión establecida por el usuario en la etiqueta en formato ASCII, con los datos de aceleración en una columna a ocho espacios de punto flotante.

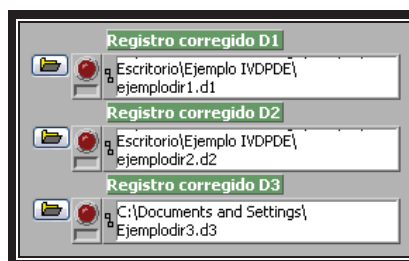


Figura 2.13. Etiquetas para guardar los canales ya corregidos de un registro

### Selección del segmento del registro

Una de las funciones principales de este programa para preproceso de la señal cuando esta presenta un nivel importante de ruido o un corrimiento en su línea base producto de algunos problemas en la calibración del sensor para el grabado de muestras, lo cual se manifiesta en una discontinuidad abrupta o marcada como se observa en la *fig.2.14*. Para resolver este problema, el instrumento es capaz de separar y extraer segmentos del registro acotados entre dos secciones, las cuales se pueden delimitar gráficamente por los cursores rojo (inicio) y azul (final), o bien, por el contador en el extremo derecho de la grafica, por ejemplo, para este caso la discontinuidad se presenta en la muestra numero 2740.

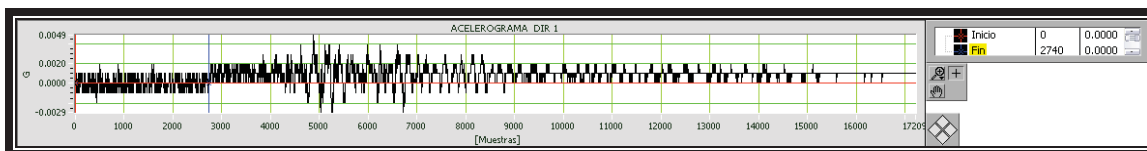


Figura 2.14. Registro en dirección 1 con discontinuidad

Para desplazar el cursor se puede hacer directamente sobre la gráfica utilizando las herramientas de la paleta, las cuales se describen a continuación:

- Icono lupa.** Abre una selección de cuatro tipos de ampliaciones y dos reducciones, *fig.2.15.a*, lo cual permite una mayor definición de la zona en la que se encuentra la discontinuidad, *fig.2.15.b*. Para obtener una ampliación de la señal basta con dibujar con el ratón una región según el requerimiento de aumento, pudiendo combinarse su uso, sin embargo, es necesario que el instrumento no este en modo de ejecución continúa.

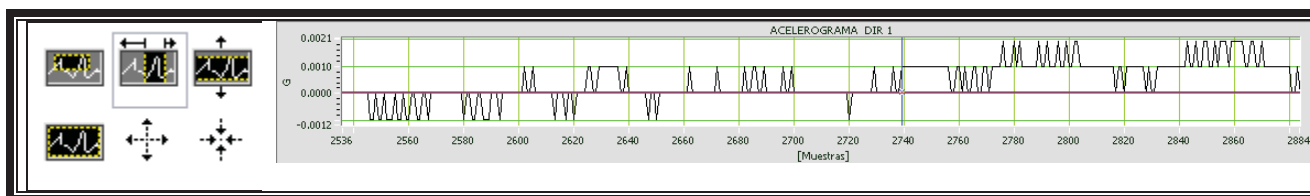


Figura 2.15. a) Opciones de ampliación. b) Ampliación horizontal y vertical en la vecindad de la discontinuidad.

- Icono mano.** Permite desplazar la gráfica de la señal y acomodarla en la posición que el usuario considere más adecuada para su manejo.
- Icono cursor.** Este control permite que el usuario pueda desplazar el cursor (rojo o azul) seleccionándolo directamente de la gráfica con el puntero del ratón, el cual cambia a una forma de cruz indicando que esta listo para desplazarse tanto en dirección X como Y. A diferencia del *icono lupa*, se puede emplear en el modo de ejecución continúa y observar los resultados obtenidos de forma inmediata.

Alternativamente al empleo de los controles antes descritos, se puede introducir directamente en el contador, los valores del número de muestras en el que se pretende cortar la gráfica, *fig.2.16.a*. Otra opción consiste en el empleo del control de navegación del cursor, dando tantos clics como sean necesarios en la dirección requerida, *fig.2.16.b*. No obstante, previamente se debe seleccionar el cursor a desplazar dando clic sobre el icono correspondiente ( **Inicio**, **Fin**); en ese instante los títulos se marcarán en amarillo cuando estén activos (si ambos lo están, se desplazarán simultáneamente manteniendo la misma distancia entre si).

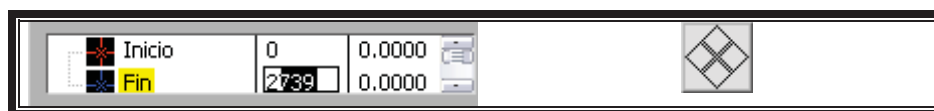


Figura 2.16. a) Contador numérico de posición de los cursores b) Control de navegación del cursor

Como resultado de la manipulación del registro se extraen fracciones de este, en las que la línea base es corregida con mayor facilidad y se obtiene una mejor calidad en la señal, *fig. 2.17. a y b.*

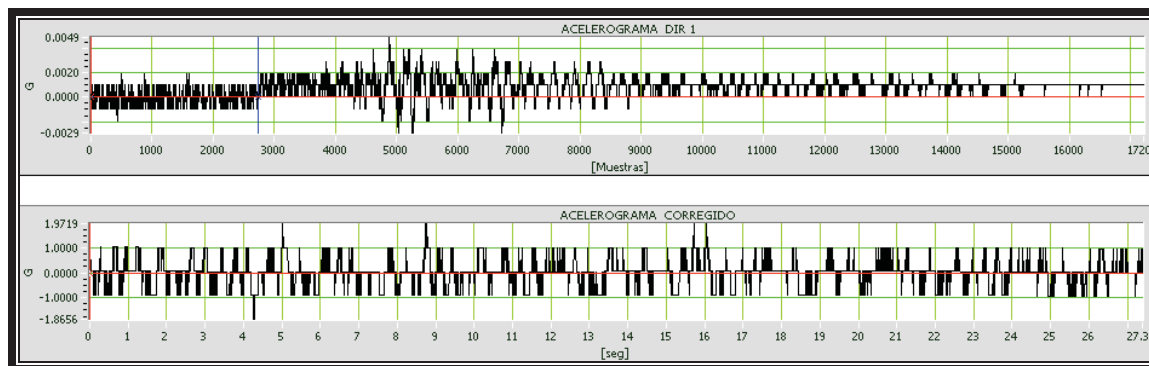


Figura 2.17. a) Señal original y fracción extraída a la izquierda del punto de discontinuidad

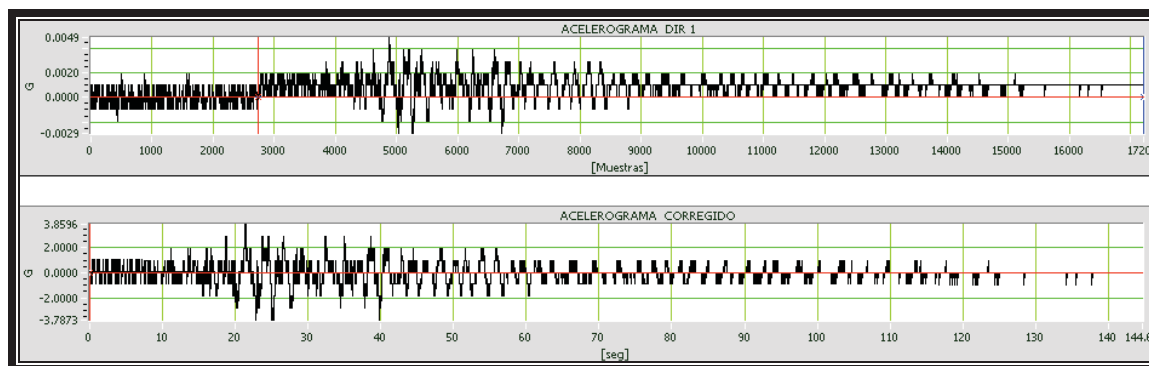


Figura 2.17. b) Señal original y fracción extraída a la derecha del punto de discontinuidad

Los fragmentos de señal extraídos deben ser guardados empleando el control de “Ruta de registros de salida”, procurando que el nombre contenga una referencia al segmento que corresponde. Para recobrar la longitud del registro, *fig.2.18*, se requiere unir los segmentos en el orden que fueron tomados mediante un editor de textos o similar.

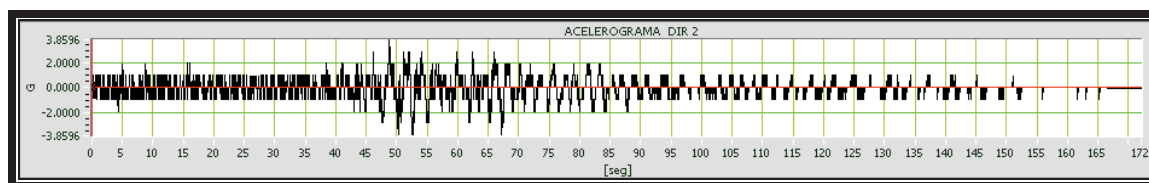


Figura 2.18. Señal corregida sin discontinuidad.

## PANELES VISUALES

Para evitar el uso de un área extensa de pantalla para la presentación de resultados, el instrumento se encuentra ordenado a manera de carpetas en tres apartados dentro de los cuales se presenta cada una de las direcciones de análisis y los resultados del proceso al que son sometidas, para cambiar entre uno y otro apartado se debe hacer clic sobre el encabezado-pestaña de interés.

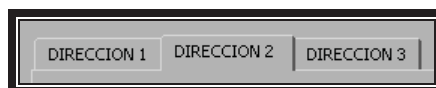


Figura 2.19. Pestañas para la selección de direcciones de interés.

Dentro se muestra en orden descendente:

- Gráfica del canal de registro originalmente capturado por el sensor.
- Gráfica del canal de registro afectado por los ajustes efectuados como son escala, ajuste de línea base y corte de la señal.
- Historial de velocidades
- Historial de desplazamientos

## PROGRAMACIÓN INTERNA DEL INSTRUMENTO

La instrucción realizada en el diagrama de bloques, *fig.2.20*, se compone esencialmente de tres elementos procesos:

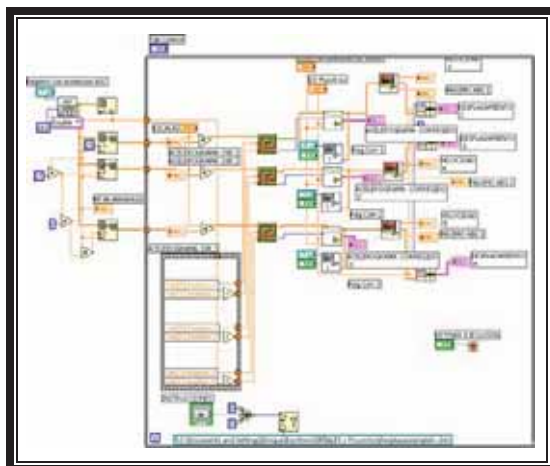
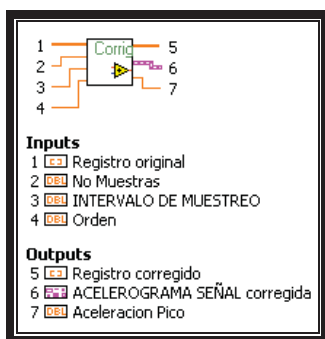


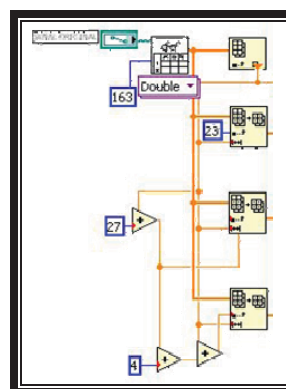
Figura 2.20. Diagrama correspondiente al instrumento IVAS.

1) Apertura de archivo.

El archivo es abierto eliminando los primeros 163 elementos, transformando los restantes en un arreglo de 1 columna del cual, posteriormente son extraídos los segmentos de señal correspondientes a cada uno de las tres direcciones de interés, *fig.2.21*.



a) Icono y conexiones para corrección de línea base

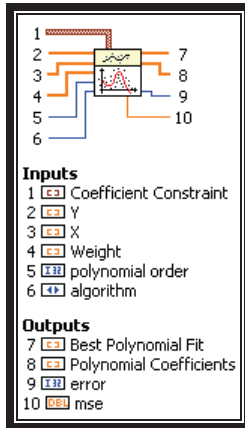


b) Apertura y selección de canales

Figura 2.21. Apertura y corte de archivos por canal o dirección.

2) Corrección de línea base y determinación de máximos

En función de la dispersión de los datos en torno a la línea base, en cada dirección es calculada una curva de ajuste empleando mínimos cuadrados, *fig.2.21.a*, de modo que se reduzca dicha dispersión. Así mismo tras la corrección se estiman los valores máximos del nuevo arreglo, los cuales corresponderán a las aceleraciones máximas registradas durante el evento, *fig.2.21.b*.



Ajuste de una serie de valores a un polinomio de n-esimo grado, mediante la reducción del error medio cuadrado dado por la ecuación:

$$f_i = \sum_{j=0}^m (a_j x_i^j)$$

Donde:

- $f$  Secuencia de salida para la mejor aproximación
- $x$  Secuencia de valores en la ordenada
- $a$  Coeficientes del polinomio respectivo
- $m$  Orden del polinomio empleado

Figura 2.21.a. Aplicación para el ajuste de valores en torno a la línea base por medio de mínimos cuadrados.

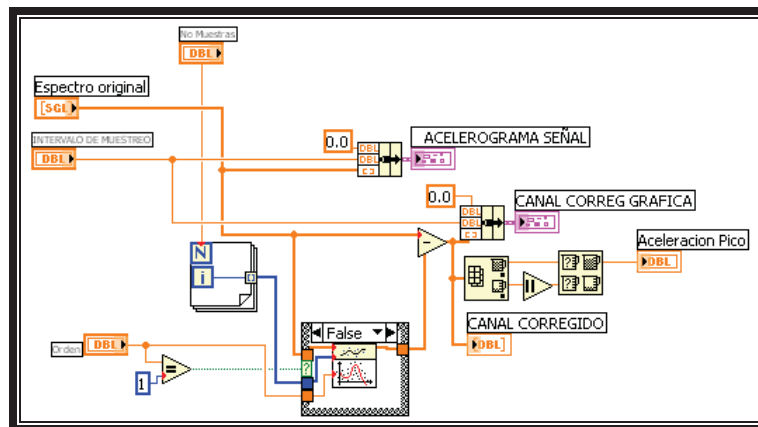
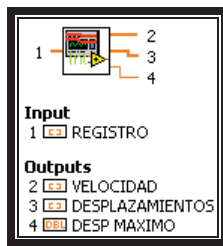


Figura 2.21.b. Procedimiento para realizar la corrección de línea base

3) Calculo del historial de velocidades y desplazamientos

A partir del registro de aceleraciones (canal analizado), se emplean integraciones sucesivas para calcular velocidades y desplazamientos, por último se toman los valores máximos absolutos del conjunto de valores obtenidos, *fig.2.22*.

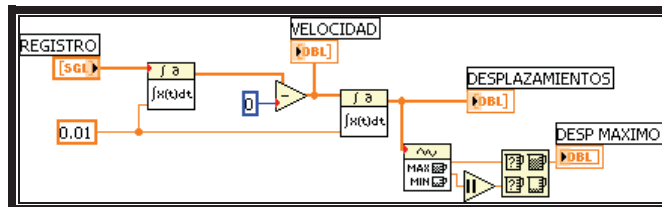
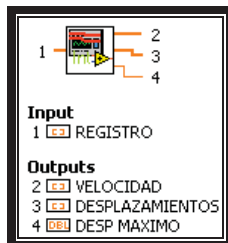
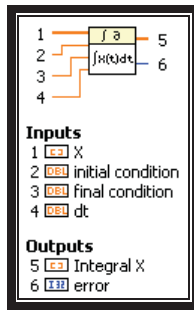


Figura 2.22.a. Elementos para el cálculo del historial de velocidades y desplazamientos.



Integración de una serie de valores empleando la expresión:

$$\int f(t)dt = \frac{1}{6} \sum_{j=0}^i (x_{j-1} + 4x_j + x_{j+1}) dt \quad (2.26)$$

para  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$

donde:

$n$  Numero de elementos en la serie  $X$  que define  $f(t)$ .

$dt$  Intervalo de tiempo entre elementos.

Figura 2.22.b. Elementos para el cálculo del historial de velocidades y desplazamientos.

### Instrumento virtual para el acondicionamiento de las señales (IVAS)

Este instrumento permite identificar algunas de las características del registro de aceleración vs tiempo en tres componentes ortogonales y realizar algunas tareas básicas, previo a su análisis, tales como:

- ☞ Graficación de aceleración vs tiempo.
- ☞ Evaluación y corrección de línea base
- ☞ Identificación de aceleración máxima registrada
- ☞ Calculo del espectro de Fourier, para cada canal
- ☞ Calculo del espectro de potencia, para cada canal
- ☞ Obtención de una envolvente de frecuencias máximas registradas.

En caso de que la calidad de la señal sea satisfactoria, el instrumento permite la grabación independiente de cada una de las tres componentes del registro de aceleración vs tiempo. Lo anterior es de utilidad para un análisis más detallado de las señales.

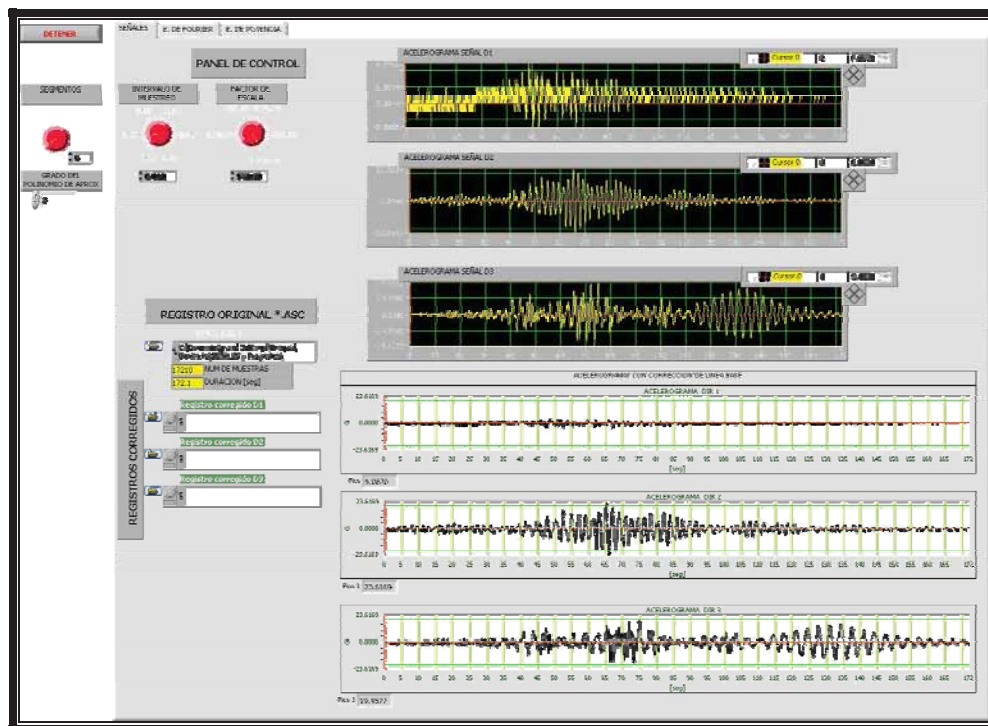


Figura 2.23. Panel principal del instrumento.

Dicho instrumento comparte la mayoría de los controles para la operación y tratamiento descritos en el apartado anterior, por lo que, solo se describe a detalle los controles que presentan alguna variación importante.

### Ruta del registro de entrada.

Define la ruta del registro de entrada de aceleración vs. tiempo en formato ASCII, conforme se explico en el apartado dedicado para el instrumento anterior.

### Factor de escala.

Establece la escala de unidades en las que se desea trabajar o bien aumentar la amplitud del registro original.

### Intervalo de muestreo.

Intervalo de tiempo transcurrido entre la obtención de cada muestra, se establece en función del muestreo empleado en el dispositivo de registro.

### Grado del polinomio de aproximación.

Tipo de ajuste que se desea emplear para mejorar la calidad de la línea base

### Segmentos.

Número de segmentos en los que se divide la señal (enventanado), para realizar el promediado de frecuencias durante la obtención de los espectros de Fourier y potencia. Este valor se puede establecer visualmente en función de la calidad de suavizado del espectro, razón por la que se encuentra fuera de la sección principal, por ejemplo en la *fig. 2.24. a y b*, se muestra dicho efecto para una misma señal.

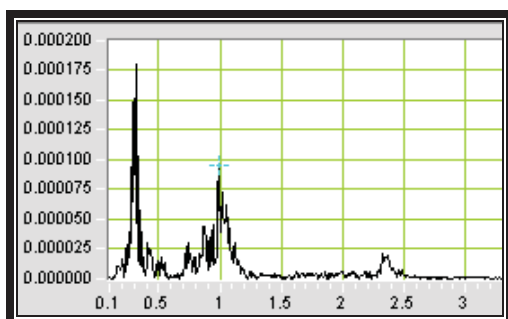


Figura 2.24.a) Espectro de Fourier, señal sin dividir.

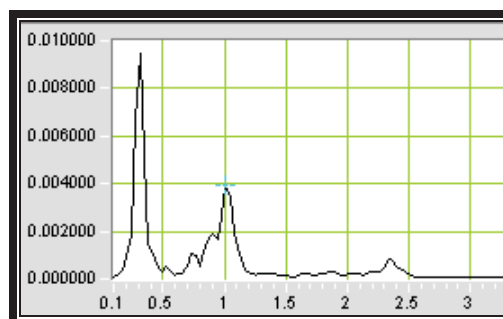


Figura 2.24.b) Espectro de Fourier, señal dividida en 6 segmentos.

### Ruta de registros de salida.

Marca la ruta del registro de salida para cada canal o dirección.

### Botón de ejecución.

Inicia la operación del instrumento dentro de un ciclo continuo, permitiendo variar los parámetros contenidos en el resto de los controles.

### Botón detener.

Detiene la ejecución del instrumento, manteniendo los resultados presentes para su uso.

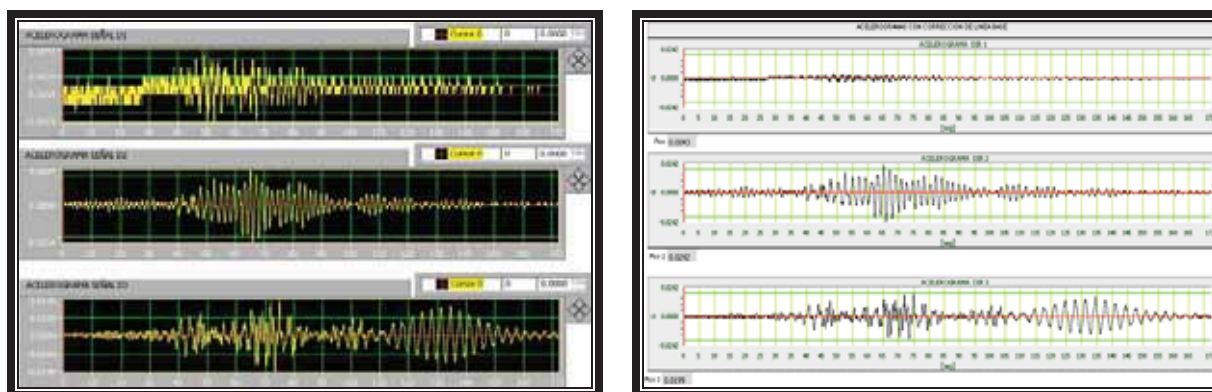
PANELES VISUALES

El instrumento se encuentra agrupado en:

- SECCIÓN SEÑALES. Contiene parte de los controles y muestra los registros de aceleraciones tal como fueron obtenidos por el acelerómetro (en amarillo), en la parte inferior a estos se encuentran los mismos registros, pero afectados por la compensación de línea base, a una misma escala. Además en el recuadro inferior se muestra el pico de aceleración máximo para cada registro, *fig.2.25*.

Cabe hacer notar, que la compensación es posible siempre y cuando no sea brusca como en el caso del registro en dirección 1 mostrada en la *fig.2.25*, para recuperar dicho registro se requiere emplear el IVADT.

- E. DE FOURIER. Muestra los espectros de Fourier correspondientes a cada dirección de registro, mas una envolvente general de frecuencias, *fig.2.26.a*, de especial utilidad cuando es necesario establecer el orden de las frecuencias dominantes y su comparativa entre ellas.

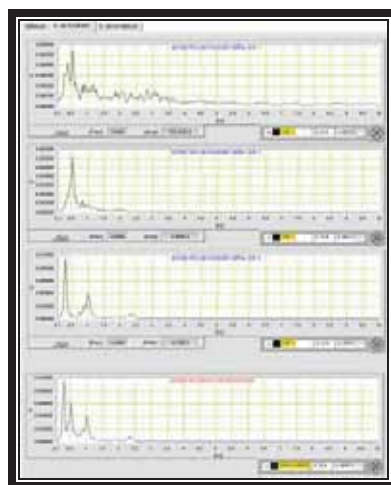


*a) Registros inalterados, en auto escala*

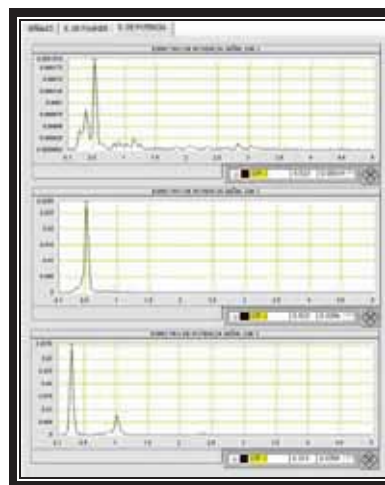
*b) Registros corregidos, a una misma escala*

*Figura 2.25. Registros de aceleraciones*

- E. DE POTENCIA. Muestra los espectros de Potencia correspondientes a cada dirección de registro, *fig.2.26.b*, calculados como el producto de la transformada de Fourier de la señal por si misma entre el número de muestras en la señal al cuadrado. Mientras el instrumento este en ejecución, el desplazamiento del cursor en las graficas de espectros estará subordinado al desplazamiento del cursor en el espectro de potencia para la dirección 2.



*Figura 2.26.a) E. de Fourier*



*Figura 2.26.b) E. de Potencia*



PROGRAMACIÓN INTERNA DEL INSTRUMENTO

La instrucción realizada en el diagrama de bloques, *fig.2.27*, se compone esencialmente de tres bloques, similares al IVADT:

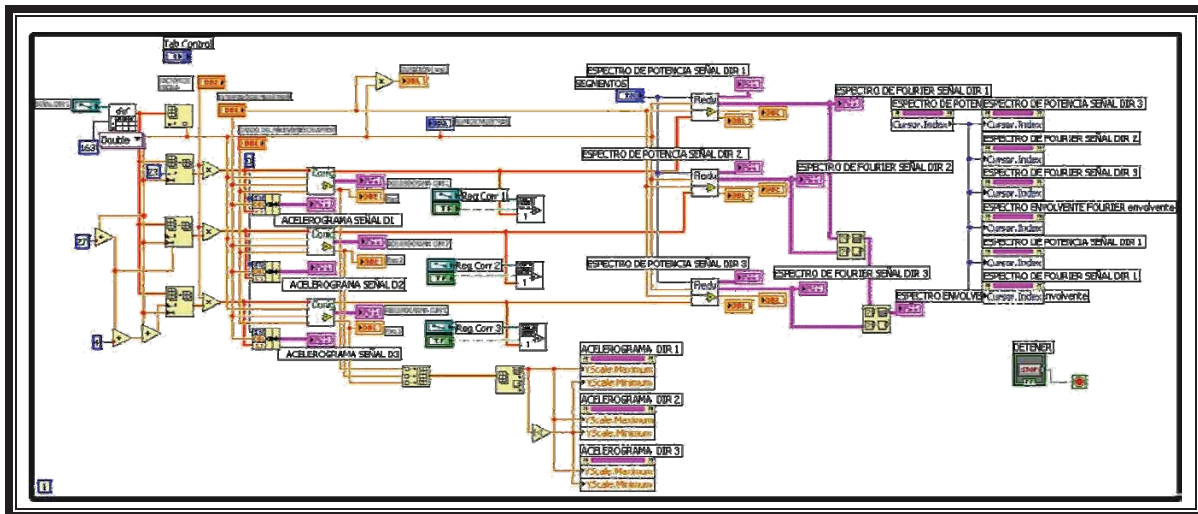


Figura 2.27. Diagrama correspondiente al instrumento IVAS.

- 1) Apertura de archivo.
- 2) Corrección de línea base
- 3) Obtención de espectros

El proceso interno de cómputo se basa en la versión programada por *Castelán (2001)*, *fig.2.28.a*, sin embargo, se reagruparon y agregaron elementos de modo que fuera posible realizar el corte del registro para versiones posteriores, además, se agregó el cálculo de amplitud máxima.

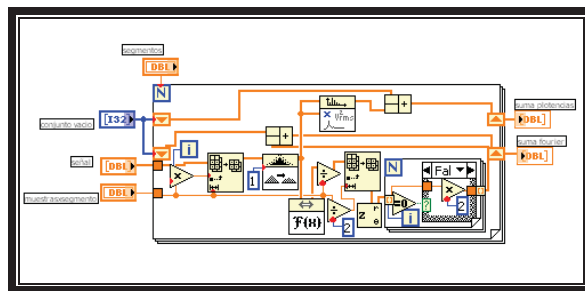
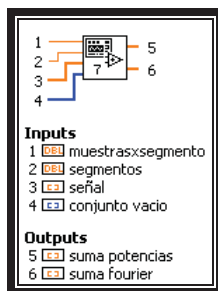


Figura 2.28.a. subrutina para el cálculo de espectros.

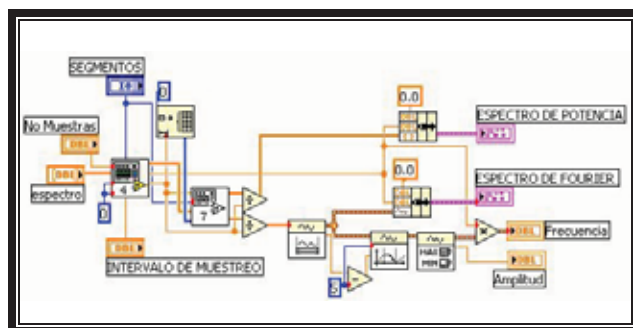
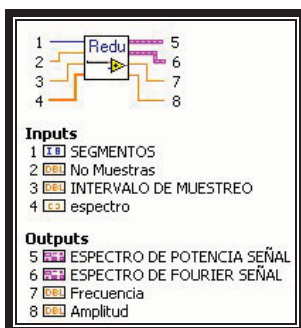


Figura 2.28.b. Contenido de subrutina para la obtención de espectros y amplitudes máximas.

## Instrumento virtual para la determinación de propiedades dinámicas de edificios (IVDPDE)

El instrumento está encaminado a lograr la determinación de propiedades dinámicas de edificios mediante la comparación de registros recabados en dos puntos de medición, en sus respectivas componentes previo ajuste de las señales en los instrumentos descritos con anterioridad, entre sus principales ventajas se encuentra la manipulación simultánea de las 3 componentes del par de registros que lo componen, exploración en tiempo efectivo variando parámetros que pueden enmascarar los resultados, así como, ajuste y mejora en la definición de los resultados obtenidos.

Este instrumento consta de dos regiones principales, la región de control de la información correspondiente al grupo de elementos a la izquierda de la *fig.2.29*, y la sección de despliegue de resultados para cada dirección contenida en la carpeta derecha mostrada en la misma figura.

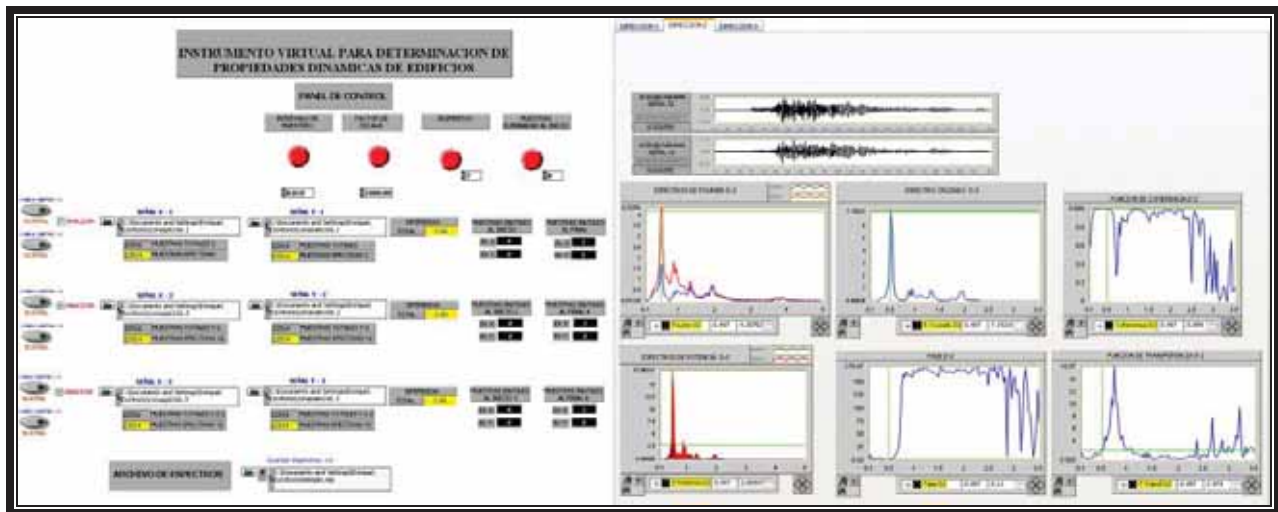


Figura 2.29. Panel del instrumento virtual para la determinación de propiedades dinámicas de edificios.

Realizando una descripción de forma breve de los controles excepto para aquellos no tratados en los instrumentos anteriores se tiene:

### ☞ Perillas

#### **Intervalo de muestreo.**

Tiempo transcurrido entre la adquisición de una y otra muestra en fracciones de segundo, este valor depende del valor especificado en el sensor con el que se adquirieron los datos.

#### **Factor de escala.**

Factor para la amplificación de valores del registro.

#### **Segmentos.**

Numero de segmentos o ventanas de muestreo en los que se divide la señal (en caso de no resultar un entero el resto de valores en el registro se complementa con ceros).

#### **Número de muestras eliminadas.**

Define el número de muestras a eliminar para casos en que los registros comparados sean de diferente longitud. Las muestras son tomadas del registro de mayor duración pudiendo explorarse valor por valor en el modo de ejecución continua, de modo que se empaten las señales en un valor confiable de coherencia a juicio del usuario.

☞ *Etiquetas*

**Señal (-) - #.**

Sirve para determinar de forma escrita la ruta y nombre de acceso de los registros, en caso de ser desconocida se puede abrir el explorador por medio del icono de carpeta en el costado izquierdo de la misma para seleccionar directamente el archivo.

**Guardar espectros.**

Realiza un respaldo numérico de los ocho espectros y graficas obtenidas de la comparativa entre los registros, en formato ASCII editable desde Microsoft Excel.

☞ *Botones y casillas de verificación*

**Analizar.**

Comprueba si el usuario desea realizar el análisis del par de registros en la dirección indicada, ya que, dependiendo el problema en ocasiones no es de interés estudiarlo.

**Cambiar sentido.**

Invierte los signos en el registro original, esto para corregir direcciones, cuando por alguna razón la colocación del sensor se realizó en orientaciones contrarias al sensor de comparación o referencia.

En el caso de la sección de resultados esta se encuentra separada a modo de carpeta en tres ficheros, cada uno correspondiente a las tres direcciones principales generalmente colectadas en los registros, dentro de cada fichero se visualizan una serie de graficas, cuyo objeto es identificar visualmente la evolución del fenómeno :

**Acelerograma.**

Muestra de manera superficial el registro de las señales analizadas en el dominio del tiempo, para asegurarse de la calidad del mismo (la señal de entrada X, señal de respuesta Y)

**Espectros de Fourier.**

Muestra el espectro de Fourier para ambas señales simultáneamente, de modo que se pueden comparar las frecuencias representativas al mismo tiempo (x – azul, espectro para la señal de entrada, y- rojo, para la señal de salida).

**Espectros de Potencia.**

Muestra el espectro de potencia de ambas señales con una mayor definición de las frecuencias relevantes.

**Espectro Cruzado.**

Permite evaluar las frecuencias con una mayor participación en el fenómeno, por decirlo de algún modo es una envolvente de las frecuencias encontradas en ambas señales.

En el modo de ejecución continua, los controles de navegación en esta grafica dirigen el movimiento de cursores en el resto de las graficas.

**Graficación de Fase.**

Permite identificar la dirección del movimiento relativo entre ambas señales, descrito en un rango de 0 a 180, 0 para el movimiento en un mismo sentido y 180 para movimiento opuesto entre los puntos de análisis para una frecuencia dada.

**Gráfica de Función de Coherencia.**

Permite tener un índice de la concordancia entre las señales analizadas, cercano a la unidad cuando existe un fuerte nexo entre estas o cercanas a cero cuando no hay relación entre si.

### Gráfica de Cocientes Espectrales.

Establece el índice de energía que esta siendo transmitida por la señal de entrada y se ve reflejada en la señal de respuesta.

### PROGRAMACIÓN INTERNA DEL INSTRUMENTO

El algoritmo interno fue desarrollado originalmente por Castelán (2001), sin embargo, este solo consideraba el análisis de dos registros en una de sus direcciones haciendo del estudio de una señal un proceso pausado, no obstante dadas las capacidades de LabVIEW, se implementaron algunos procesos.

Los pasos de los que consta son:

#### Apertura de archivos y escalado de señal

Realiza la apertura del archivo estipulado en la etiqueta SEÑAL cuyo contenido es leído línea por línea, conforme se realiza la lectura, los valores son acomodados en un arreglo de valores de 6 dígitos punto flotante, identificándose durante el proceso, el tamaño o número de muestras que componen el registro y afectando estos valores por el factor de escala elegido por el usuario.

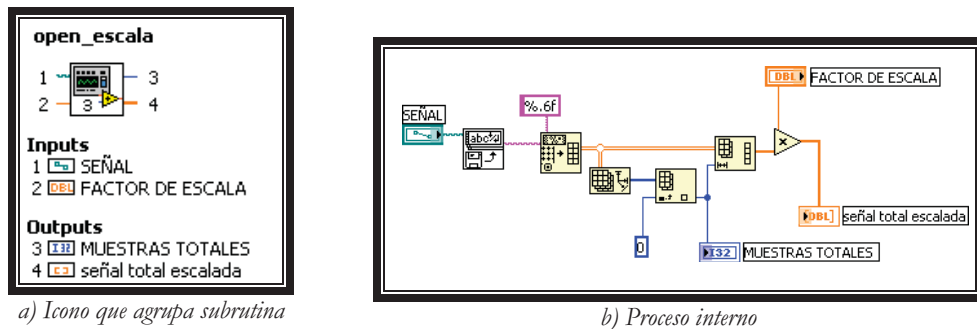


Figura 2.30. Subrutina para la apertura y arreglo de registros

#### Cálculo de muestras efectivas

Conocido el número total de muestras contenido entre los registros comparados, se determina la diferencia de valores, para tomar un valor mínimo como el número de muestras efectivas y empleando lógica booleana se establece el archivo del cual se eliminarán las muestras.

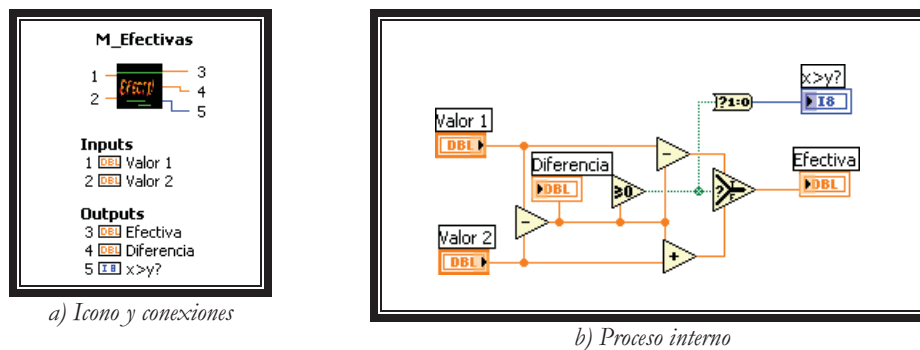
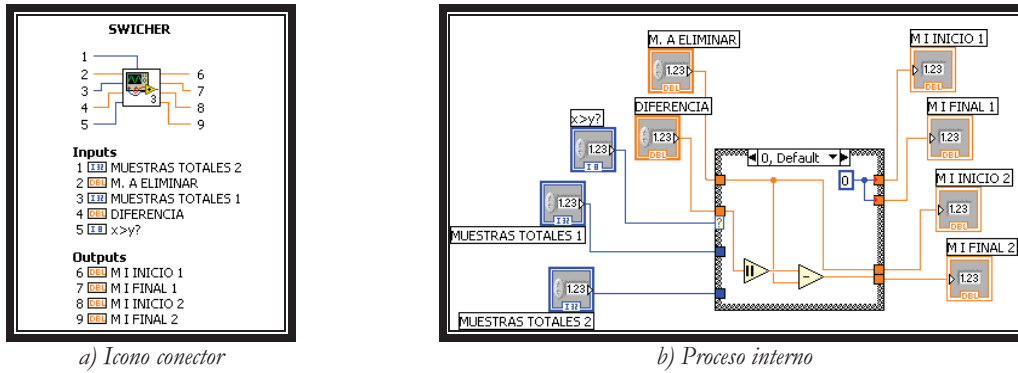


Figura 2.31. Subrutina para determinación de muestras efectivas

#### Swicher

La instrucción se encarga de conmutar el orden en el cual serán sustraídas las muestras consideradas como inútiles, incluyendo durante el proceso las muestras que el usuario defina manualmente.



a) Icono conector

b) Proceso interno

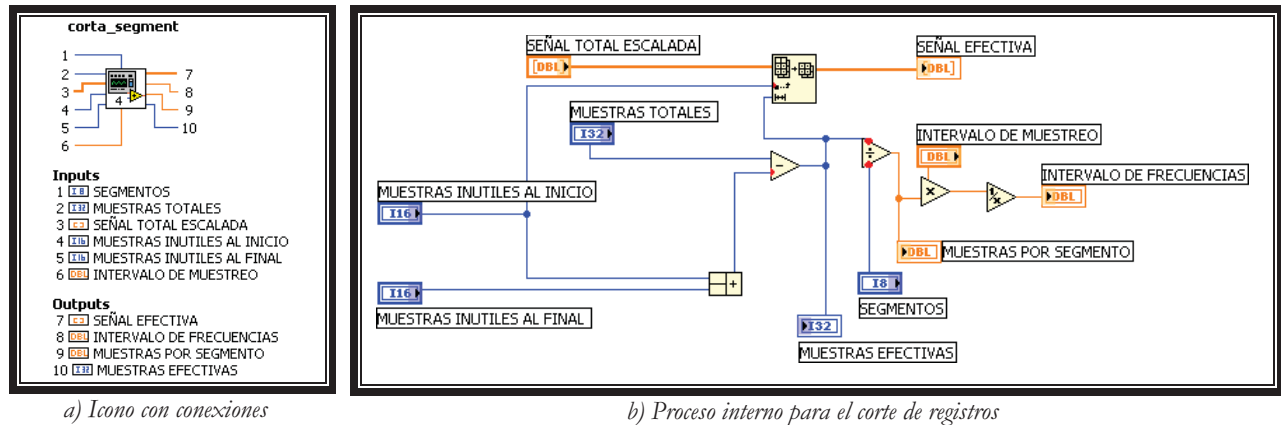
Figura 2.32. Estructura swicher.

*Inversión de la señal*

Los valores del arreglo son afectados por -1 de modo que las aceleraciones del registro invierten su sentido, esto siempre y cuando, se pulse el botón de inversión de sentido para la señal correspondiente, de lo contrario la señal no se ve afectada. Así mismo, en el caso de habilitar la casilla “análisis de señal”, la instrucción continúa normalmente de lo contrario, se genera una señal nula formada por ceros, ello a fin de reducir el tiempo de cómputo cuando no es requerido el análisis en alguna dirección.

*Corte de registros*

Reduce el tamaño del arreglo de forma que se iguale la longitud del registro, esto en función de los valores calculados previamente en la función swicher, por predefinición la diferencia de muestras es extraída del final del registro, sin embargo, cuando el usuario modifica el número de muestras extraídas del inicio, automáticamente se reajustan los valores de modo que se conserve la longitud del mismo, igualando al de menor número de muestras, en caso de ser sobrepasado el límite, es generado una serie de valores nulos de modo que se complete el tamaño del registro para su análisis.



a) Icono con conexiones

b) Proceso interno para el corte de registros

Figura 2.33. Proceso para el corte de registros

*Obtención de espectros de Fourier y Potencia*

Este modulo, fig. 2.34, es el encargado de realizar las operaciones tras el análisis de Fourier. Inicialmente la señal entra a un ciclo o bucle, durante el cual, una fracción de esta es extraída en razón del número de segmentos indicado por el usuario (índice N), una vez extraído el segmento es afectado por la función ventana tipo Hanning, fig. 2.35, seguido por el cálculo de su transformada rápida de Fourier, fig. 2.36, acomodando los valores en una serie de números complejos, sin embargo, para que estos resultados sean de utilidad y tengan un significado al momento de realizar el análisis, se toma la parte real del numero complejo en su forma polar, fig. 2.37.

En paralelo y posterior al proceso de la función ventana, se determina el espectro de potencia como un espectro cruzado entre dos señales de entrada que para el caso son la misma, fig. 2.38.

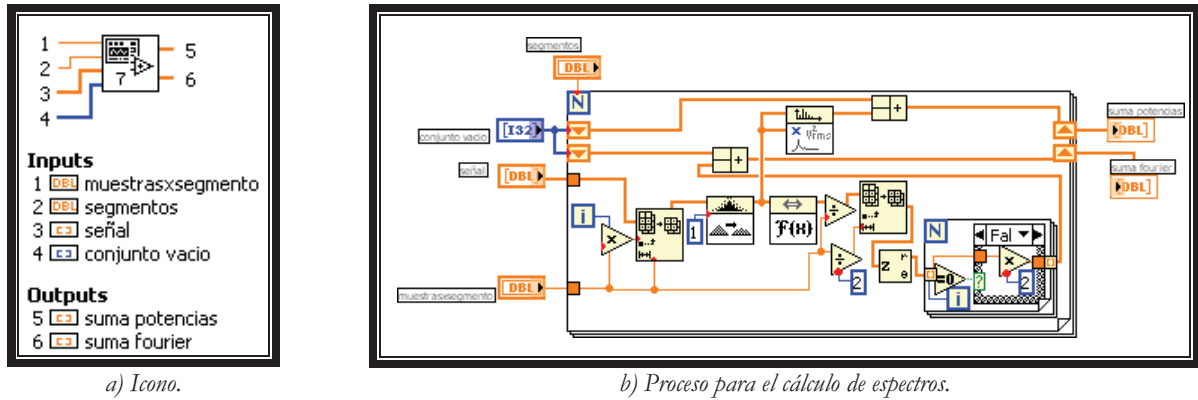
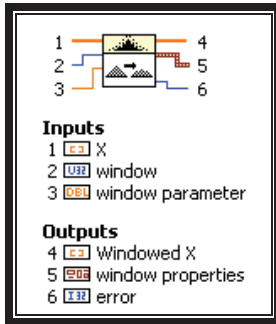


Figura 2.34. Subrutina para el cálculo de espectros y determinación de amplitudes máximas.



Calcula la secuencia de valores  $y$ , obtenidos de afectar una serie de valores  $x$ , por la ventana Hanning, por medio de la ecuación:

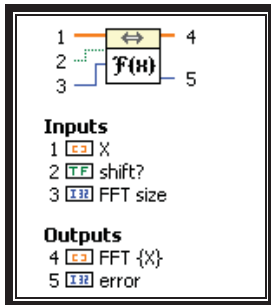
$$y_i = 0.5x_i[1 - \cos(w)] \quad \text{para } i = 0, 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (2.27)$$

Donde:

$n$  Numero de elementos de  $x$ .

$$w = 2\pi i/n$$

Figura 2.35. Aplicación de función ventana para una señal discreta.



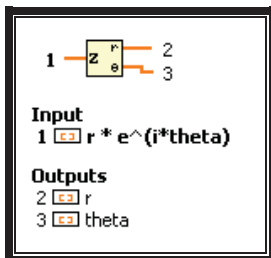
Calcula la transformada discreta de Fourier con el algoritmo definido por la ecuación 2.4, que esta en función de:

$N$  Numero de elementos de la señal de análisis

$\Delta f = f_s/N$  Resolución de frecuencia

$f_s$  Frecuencia de muestreo

Figura 2.36. Determinación de la transformada rápida de Fourier para muestras discretas.



$Z$  Numero complejo de interés

$r$  Magnitud o radio del número complejo en su forma polar

$\theta$  Angulo en radianes del número complejo en su forma polar

Figura 2.37. Transformación de números complejos a su forma polar.

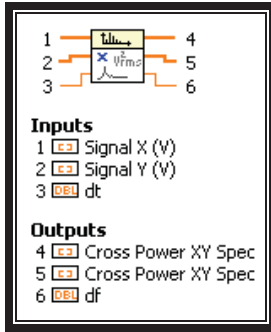


Figura 2.38. Cálculo del espectro cruzado de potencia entre dos señales discretas.

Determina el producto de la amplitud entre las señales  $x$  y  $y$  como:

$$\frac{FFT(señalx) \times (FFT)^*(señaly)}{N^2}$$

Donde  $N$ , es el numero de puntos que componen la señal  $x$  o  $y$ .

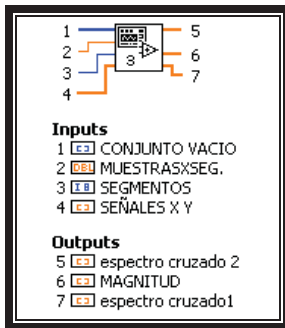
Asi mismo, calcula la diferencia entre fases como, fase  $y$  menos fase  $x$ .

Una vez procesado este tramo, los resultados se ordenan dentro de dos arreglos (inicialmente definidos como vacíos), uno para el espectro de Fourier y otro para el de Potencia, dando pauta al cambio del contador "i", el cual indica la repetición del proceso de análisis para una nueva fracción de la señal o por decirlo de otro modo, se corre la ventana para extraer y analizar el i-esimo fragmento del registro, hasta barrer la totalidad de segmentos que la componen.

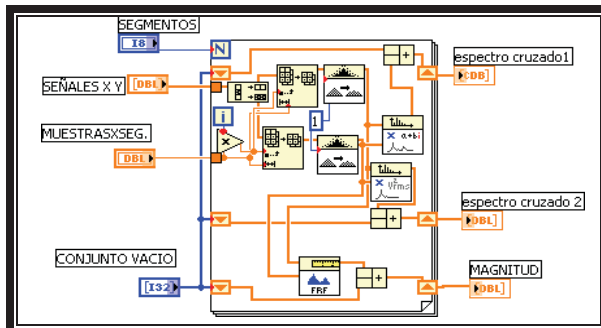
*Obtención del Espectro cruzado y Cocientes espectrales*

Este módulo presenta similitudes con el dedicado a la obtención de espectros de Fourier, sin embargo, en este punto se realiza la comparación entre las dos señales analizadas.

De igual forma están contenidas en un ciclo para inventanado, no obstante en el interior las operaciones realizadas con los segmentos de señal consisten en el cálculo del espectro cruzado de potencia entre las señales comparadas  $x$  y  $y$ , así como de los cocientes espectrales.

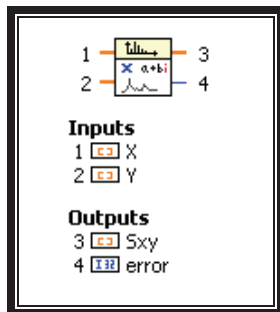


a) Icono y conexiones



b) Proceso y elementos que contiene esta instrucción.

Figura 2.39. Rutina interna para el cálculo del espectro cruzado, fase y coherencia.



Icono

Calcula el espectro cruzado de potencia dado por la expresión:

$$S_{XY} = \frac{1}{n^2} F^*(X)F(Y)$$

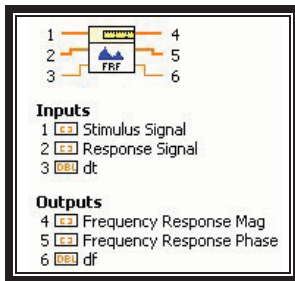
donde

$F^*(X)$  Transformada de Fourier del complejo conjugado de la señal  $x(t)$

$F(Y)$  Transformada de Fourier de la señal  $y(t)$

$n$  Numero de muestras que componen tanto a  $x(t)$  y  $y(t)$ .

Figura 2.40. Calculo del espectro cruzado entre dos señales discretas.



Icono

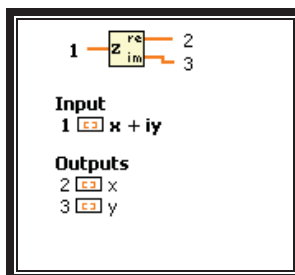
Calcula la respuesta entre una señal de estímulo  $x$ , y una  $y$  considerada como respuesta del sistema.

Figura 2.41. Cálculo de la fase entre una señal de estímulo y una de respuesta.

Realizado el proceso en toda la señal, los resultados permiten casi de forma inmediata observar el espectro cruzado entre las señales X y Y, así como, el comportamiento de la función de transferencia.

#### Determinación de fase y coherencia entre las señales

La obtención de estos parámetros se realiza con base a los resultados del espectro cruzado de potencias  $S_{xy}$ , relacionando para ello las diferentes formas en que se pueden representar los números complejos obtenidos, así por ejemplo, la fase estará representada por el Angulo  $\theta$  (theta) del número complejo en su forma polar, mientras la coherencia corresponderá a la parte real del mismo número pero en su forma rectangular, empleándose las estructuras de transformación complejo-real/imaginario y complejo-polar, fig.2.42.



Icono

- $Z$  Número complejo de interés
- $x$  Escalar de la parte real del número complejo en su forma ortogonal
- $y$  Escalar de la parte imaginaria del número complejo en su forma ortogonal.

Figura 2.42. Descomposición de números complejos a su forma ortogonal.

## PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para hacer posible la observación de forma gráfica de los diferentes arreglos con los resultados concernientes los parámetros deseados, se recurre al uso de estructuras auxiliares denominadas bundle o atados, en ellos se define el orden de la serie de datos para ser desplegados dentro de una grafica del tipo de pares de puntos ( $x$ ,  $y$ ).

La introducción de parámetros se hace por medio de tres casillas:

- ☞ Primera, establece el valor inicial a partir del cual se presentara el eje de las abscisas (generalmente 0).
- ☞ Segunda, define el incremento entre punto y punto para el eje de abscisas.
- ☞ Tercera, establece la serie de valores asociados a las ordenadas en cada punto, en esta última el empleo de clusters o grupos, permite realizar la presentación de más de una serie de datos dentro de una misma gráfica como es el caso de los espectros de Fourier.

El algoritmo de análisis de señales incluye el estudio simultáneo de las tres componentes de un par de registros, los resultados obtenidos del estudio si bien, pueden ser tomados directamente de las graficas que despliega el programa para luego adherirse en un documentos en formato digital para elaborar un reporte



(seleccionando la gráfica y dando las instrucciones copiar y pegar), los valores numéricos pueden ser almacenados en formato ASCII, haciéndolos manipulables desde un editor de hojas de cálculo. Para ello se agrupo cada cadena de valores presentados en las graficas dentro de un solo arreglo

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para observar el funcionamiento de este instrumento se desarrolla el siguiente ejemplo de análisis de señales, correspondiente a un par de registros recabados en azotea y nivel intermedio de un edificio bajo excitación forzada. Debido a que la calidad del registro es notoria en el preproceso solo se realizó la separación de canales por dirección; en lo referente al corte, requirió la eliminación de dos muestras.

Al realizar el análisis para las direcciones 2 y 3 de los registros se puede observar en los espectros de Fourier, la existencia de frecuencias dominantes mas no se aprecia con claridad el orden y magnitud de estas, *fig. 2.43*, al realizar la división de la señal en 6 segmentos se alcanza a definir mejor la existencia de estas, sin embargo, aun presenta incertidumbre para tomar alguna como representativa, mientras que realizando la división en 15 segmentos claramente se vislumbra la existencia de al menos 5 frecuencias dominantes en ambas direcciones.

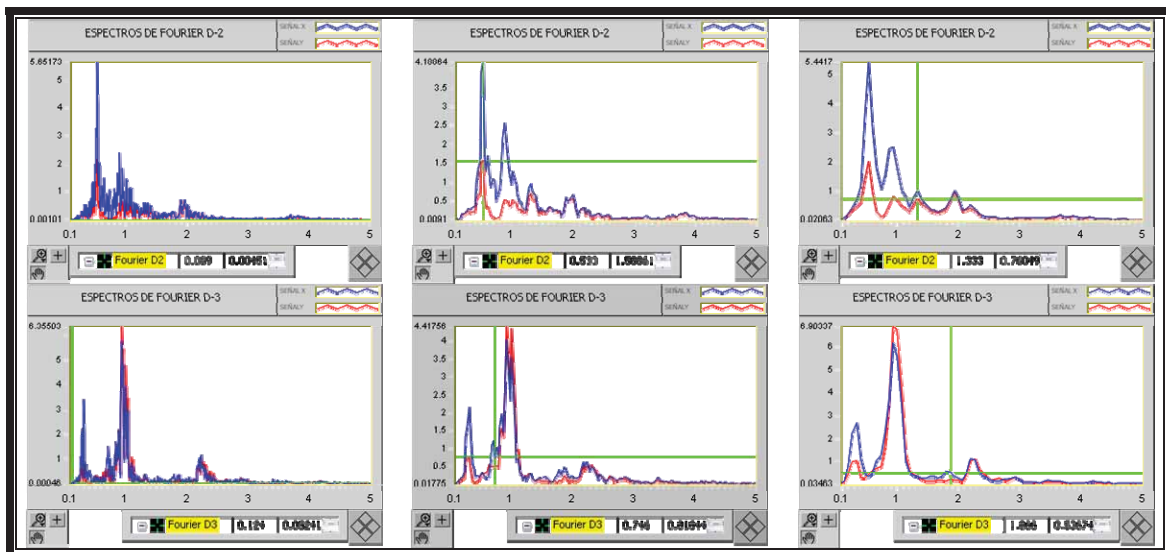
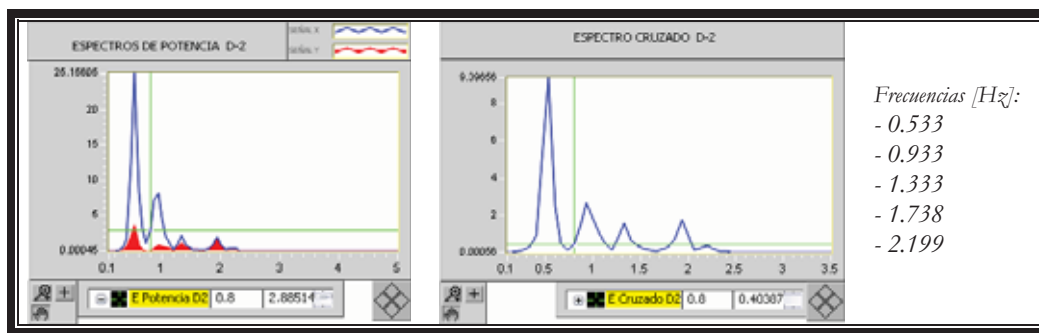
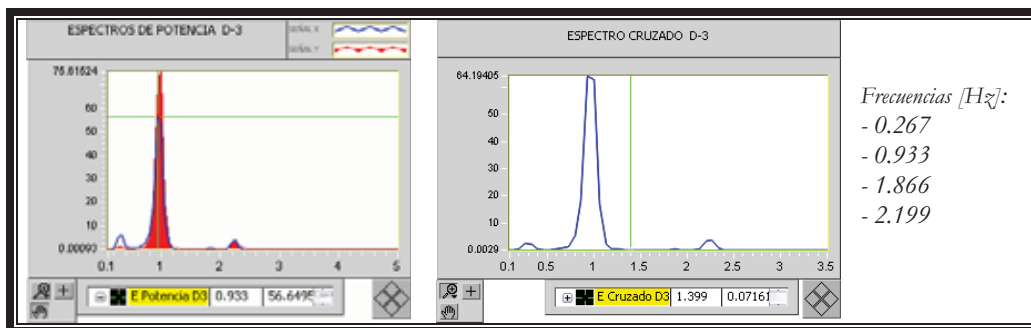


Figura 2.43. Comparativa de espectros de Fourier para una misma señal a distintos niveles de muestreo(sin muestreo, 6 segmentos y 15 segmentos).

Tomando este último muestreo se observa que en los respectivos espectros de potencia y cruzados, se logra una mayor definición de valores, llegándose a reducir hasta a 4 frecuencias de interés para la dirección 3, *fig.2.44*.



a) Espectros para la dirección 2.



b) Espectros para la dirección 3.

Figura 2.44. Espectro de Fourier y Cruzado para las direcciones 2 y 3.

Revisando las graficas de coherencia se observa que se presentan coherencias cercanas a la unidad, fig.2.45, lo cual señala gran relevancia de las frecuencias dentro de la participación en formas modales.

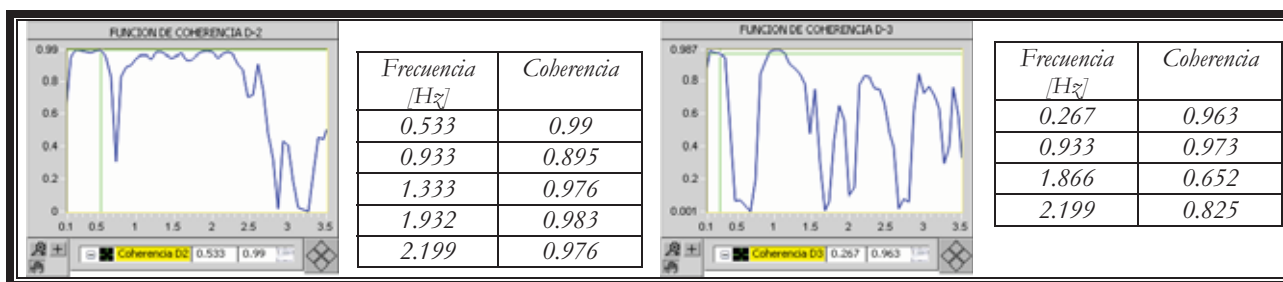


Figura 2.45 Distribución de coherencias entre las señales para direcciones 2 y 3.

Para estimar la forma modal en la que esta participando cada frecuencia se determina la fase que existe entre ambas señales, (valores cercanos a  $0^\circ$  cuando el movimiento de los puntos instrumentados es en la misma dirección y próximos a  $180^\circ$  cuando el movimiento es en sentido contrario). Cabe aclarar que por si sola no es suficiente para lograr estimar la forma modal, en especial cuando se trata de estructuras de una altura considerable, ya que en principio es necesario analizar los valores en conjunto con niveles instrumentados en el resto de niveles cuando se posee información.

Cotejando el movimiento entre este par de niveles (azotea – piso 6) se registraron:

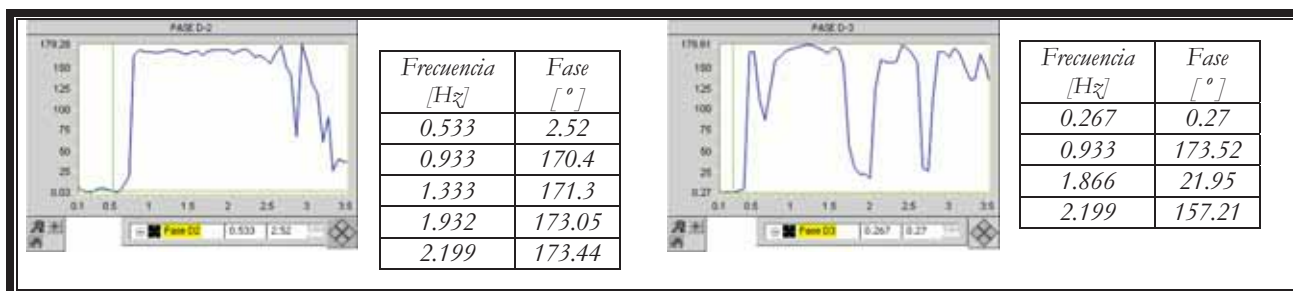


Figura 2.46. Fases relativas entre el piso 6 y azotea.

Para tener un estimado de la magnitud del movimiento y esbozar la forma modal asociada a este, se emplea el recíproco de la amplitud calculada a partir de la función de transferencia, para el caso se muestra para la primera frecuencia en direcciones 2 (0.533 Hz) y 3 (0.267 Hz), fig. 2.47, sin embargo, para poder construir la forma modal se requieren datos del resto de niveles que componen la estructura, como se realiza en el capítulo 4.

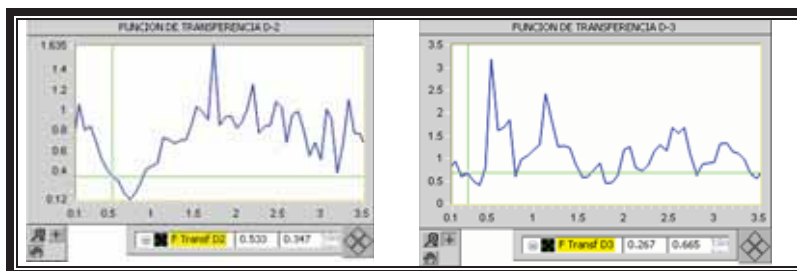


Figura 2.47. Función de transferencia en las direcciones 2 y 3.

Finalmente, para la determinación del nivel de amortiguamiento de la estructura, se emplean las expresiones propuestas por Kawasumi y Shima (1965), *ec. 2.21 y 2.22*, las cuales, se valen del contenido de energía del la señal contenido dentro del ancho de banda en torno a la frecuencia de interés para estimar este parámetro. Por esta razón se toman los espectros de potencia con buena resolución, para establecer gráficamente los parámetros  $w_1$  y  $w_2$ , *fig. 2.48*.

$$\xi \cong \frac{A}{2} \left( 1 - \frac{3}{8} A^2 \right) \quad (2.28)$$

donde:

$$A = \frac{\left( \frac{w_2^2 - w_1^2}{w_2^2 + w_1^2} \right)}{\sqrt{(\lambda - 1)}} \quad (2.29)$$

$w_1$  y  $w_2$  Frecuencias en torno a la de interés, a una amplitud  $Y_{\max}/\lambda$ , utilizando generalmente  $\lambda$  con un valor de 2

Estos parámetros se ejemplifican en la *fig. 2.48*.

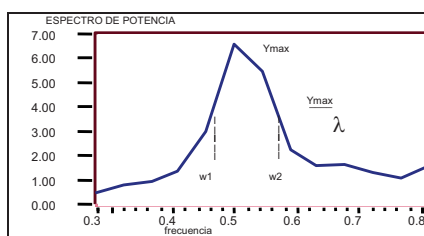
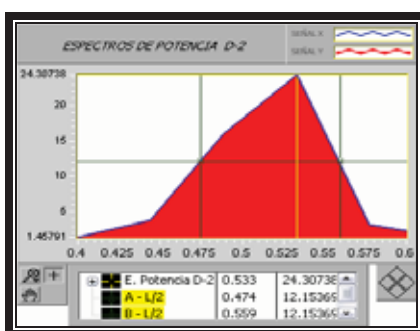


Figura 2.48. Parámetros tomados para determinación de amortiguamientos. (Ayala, García y Castlán, 2001)

Así, para el ejemplo expuesto, se tiene el espectro y valores presentados en la *fig. 2.49*.



Para la primer frecuencia

$$Y_{\max} = 24.30738$$

Las frecuencias a  $Y/\lambda$

$$w_1 = 0.474$$

$$w_2 = 0.559$$

Efectuando los cálculos correspondientes

$$A = 0.1635$$

$$\xi = 0.0809 \rightarrow 8.09\%$$

Figura 2.49. Obtención del amortiguamiento en dirección 2

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS EDIFICIOS ESTUDIADOS

#### 3.1 ANTECEDENTES

Para el presente trabajo se contó con información técnica sobre el comportamiento dinámico de cuatro estructuras, ubicadas en diferentes sitios del Distrito Federal, que por su comportamiento sísmico y características estructurales resultan de interés como objetos de estudio, al ser edificaciones regulares con similitudes entre si , en lo que a estructuración se refiere, donde la principal peculiaridad se encuentra marcada por el tipo de suelo sobre el cual fueron desplantados, abarcando diversas zonas geotécnicas de las que se ha dividido el valle de México, según se establece en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF). En la *fig.3.1*, se indica la ubicación de los 4 edificios de acuerdo a dicha zonificación.

De estos edificios, dos fueron construidos en acero y dos en concreto reforzado, con forma prominentemente rectangular en planta y un número de niveles ligeramente superior a 20. A continuación se presenta una descripción de los edificios estudiados en el presente trabajo.

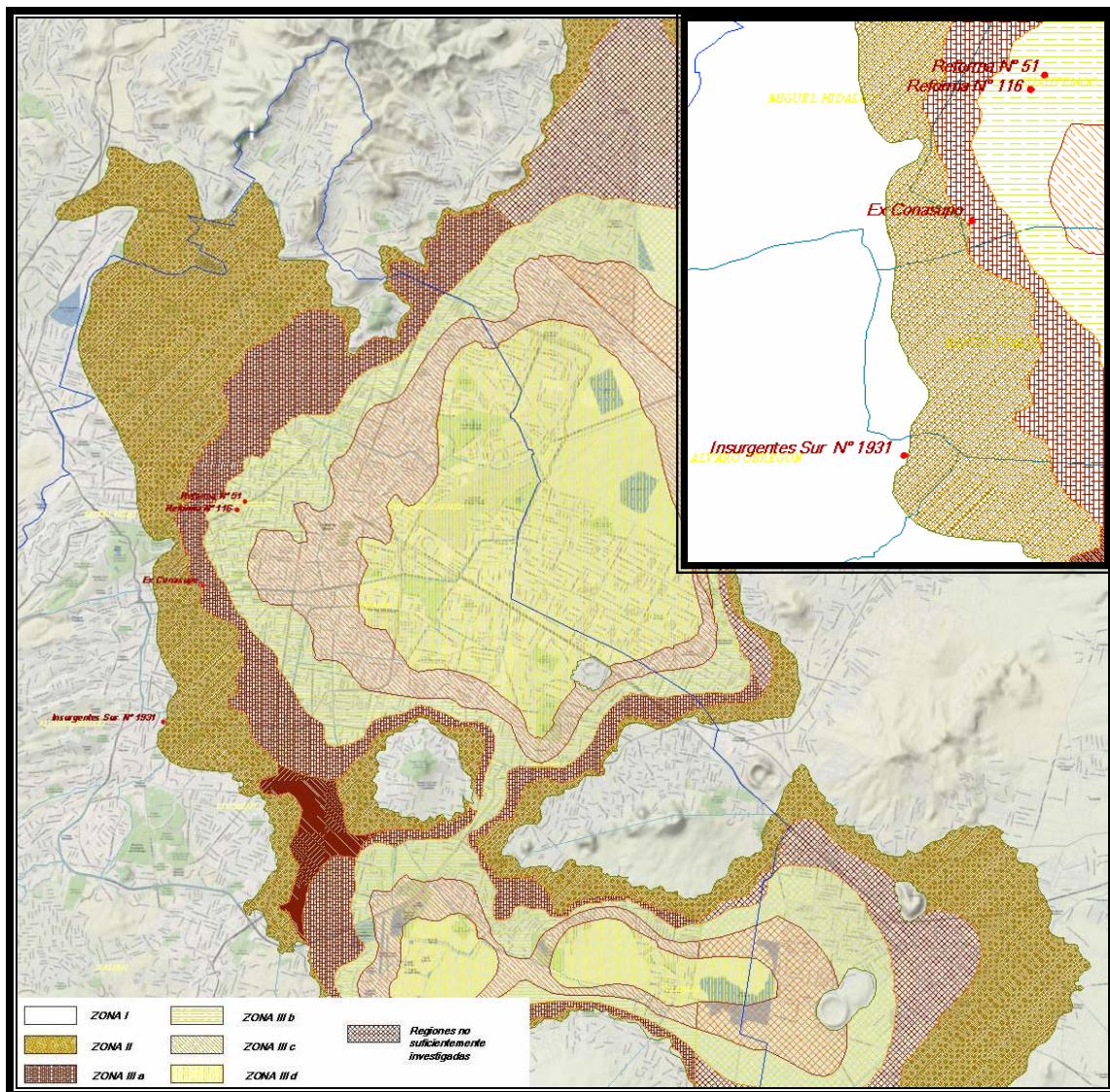


Figura 3.1. Ubicación de los 3 inmuebles según NTC-DS, 2004.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES Y ESTRUCTURALES

#### 3.2.1. Edificio Exconasupo

El edificio denominado en este trabajo como ExCONASUPO, es una estructura de concreto reforzado de 23 niveles, que se compone de 1 sótano, planta baja, Mezanine, 17 niveles de oficinas y 3 penthouse; su planta es casi rectangular con dimensiones aproximadas de 20 m x 36 m, En la *fig.3.2*, se muestra una planta tipo del edificio.

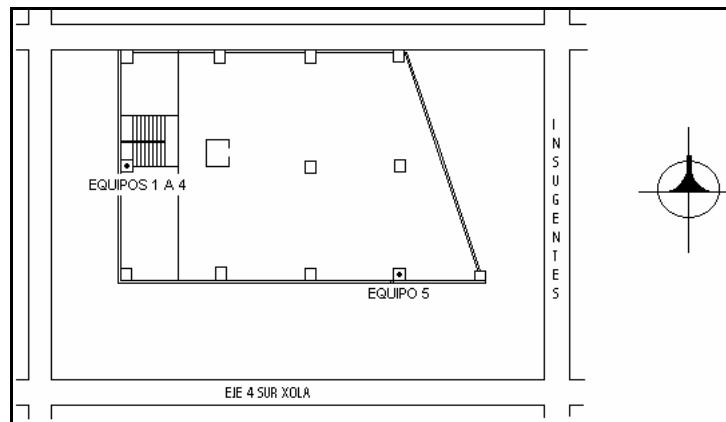


Figura 3.2. Planta tipo del edificio y ubicación de equipos de medición.

Este inmueble se encuentra sobre la Av. Insurgentes Sur, localizado en los límites entre la zona de transición (zona II) y zona IIIa, *fig. 3.3*, con un periodo del suelo de 1.1 seg (0.88 hz) de acuerdo a la zonificación sísmica antes mencionada. El edificio está cimentado sobre un cajón de concreto reforzado apoyado en pilotes.



Figura 3.3. Ubicación del inmueble vista aérea y según zonificación sísmica

Su sistema estructural está formado por muros de concreto colindantes en la dirección longitudinal (norte-sur) y marcos a base de columnas y losa aligerada en la dirección transversal (este-oeste).

Debido a que inicialmente el inmueble poseía rastros de agrietamiento importante en su dirección transversal derivados de la estructuración original con un nivel de flexibilidad considerable, el inmueble fue sometido a

reforzamiento mediante la inyección de resinas epóxicas en grietas de muros y sistema de losa, conjuntamente se colocaron diagonales metálicas y disipadores de energía, para reducir el daño ante eventos sísmicos intensos, cuyo funcionamiento se describe a detalle en el trabajo de Castelán (2001). A continuación en la *fig.3.4*, se observa el reforzamiento del edificio en su parte anterior y posterior, así mismo en la *fig.3.5*, se muestra esquemáticamente su distribución en planta y elevación.



Figura 3.4. Detalles del reforzamiento estructural del edificio Exconasupo.

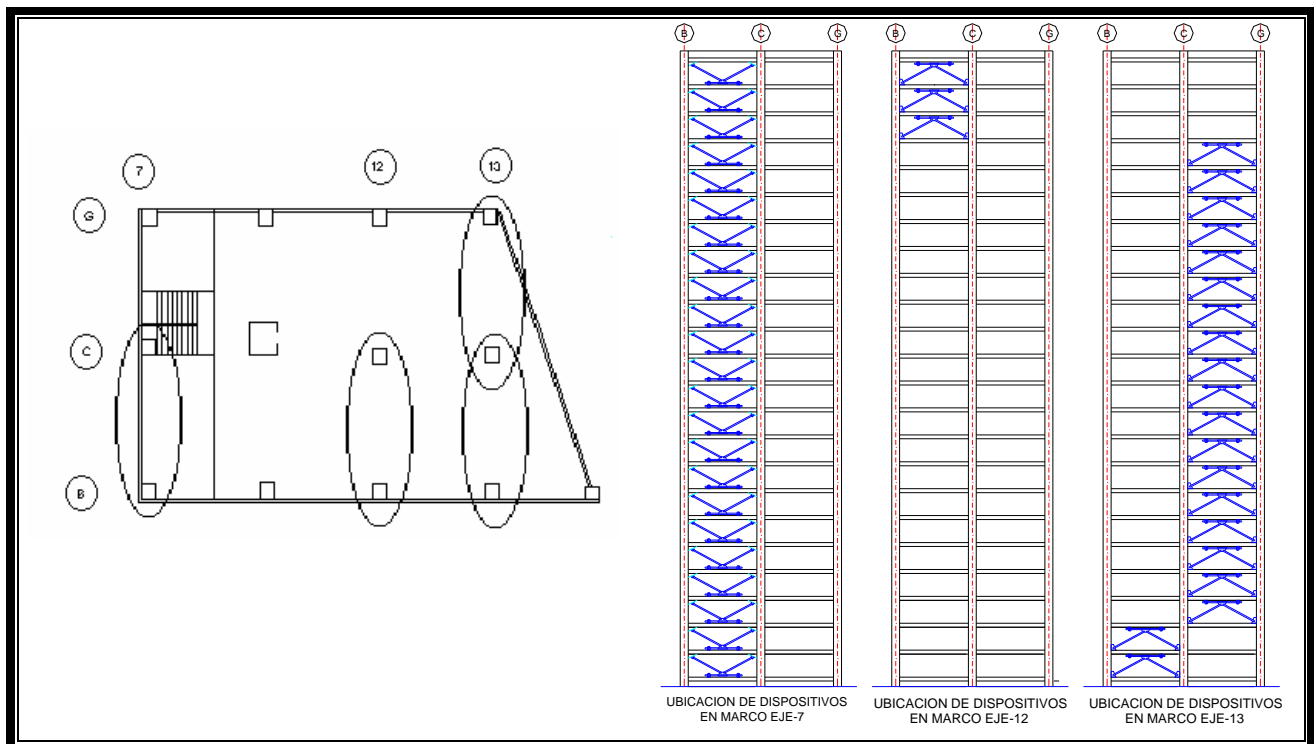


Figura 3.5. Distribución en planta y elevación de los disipadores de energía.

### 3.2.2. Edificio Insurgentes Sur 1931

El edificio localizado en Av. de los Insurgentes Sur 1931, Colonia Guadalupe Inn, Delegación Álvaro Obregón. Se trata de una estructura de concreto reforzado de planta rectangular, formada por un cuerpo de 20 niveles, cimentado sobre un cajón de cimentación con pilotes de punta. El inmueble está desplantado sobre terreno lomerío en la CD de México, zona I de acuerdo con la clasificación de la propuesta por las NTC- DS (2004), *fig.3.6*, con un periodo dominante del suelo por debajo de 0.7 seg de acuerdo al mapa de isoperiodos propuesto en las NTC-DS..



Figura 3.6. Ubicación del edificio Insurgentes 1931, vista aérea y según zonificación sísmica.

Su sistema estructural consiste de muros de concreto reforzado en una dirección y marcos de flexibles de concreto reforzado formados a base de columnas y vigas que soportan losas reticulares de concreto, mismas que proporcionan una gran rigidez en su plano.

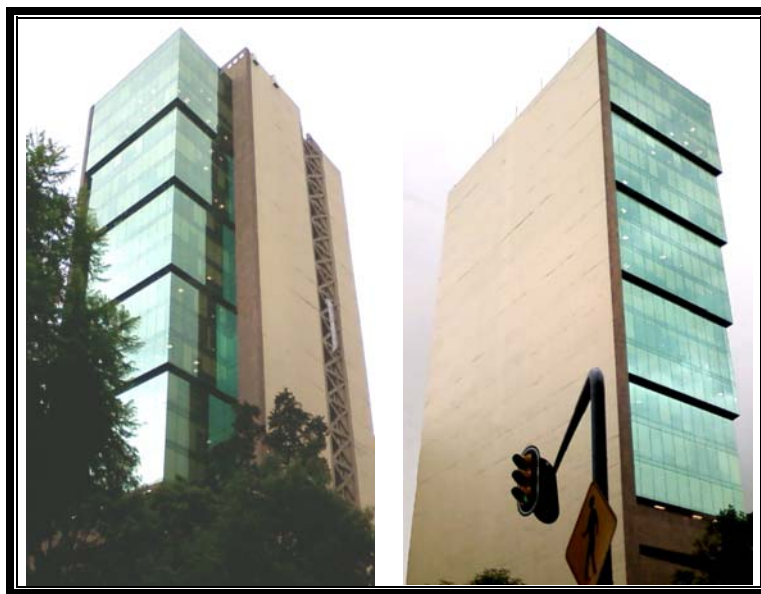


Figura 3.7. Vistas del edificio Insurgentes sur 1931.

**3.2.3. Edificio Reforma 116.**

El edificio en estudio se localiza al igual que los edificios anteriores en el DF, en Av. Paseo de la Reforma número 116, Colonia Juárez, Delegación Cuauhtémoc. Desde el punto de vista geotécnico se encuentra desplantado sobre terreno blando conocido comúnmente como zona del lago, (zona III b de acuerdo a las NTC Sismo RCDF), con un periodo dominante del suelo de aproximadamente 2 seg. A continuación en la fig. 3.8, se muestra la localización del edificio:



Figura 3.8. Ubicación del edificio en Av. Paseo de la Reforma 116.

Es una estructura construida en acero que data de la década de los 50's, con planta rectangular formada por dos cuerpos independientes de 3 y 20 niveles separados por juntas constructivas, destinado a un uso preponderantemente de oficinas, (Anaya 2007). En la fig. 3.9, se ilustra la forma y distribución en planta de los niveles que forman este edificio.

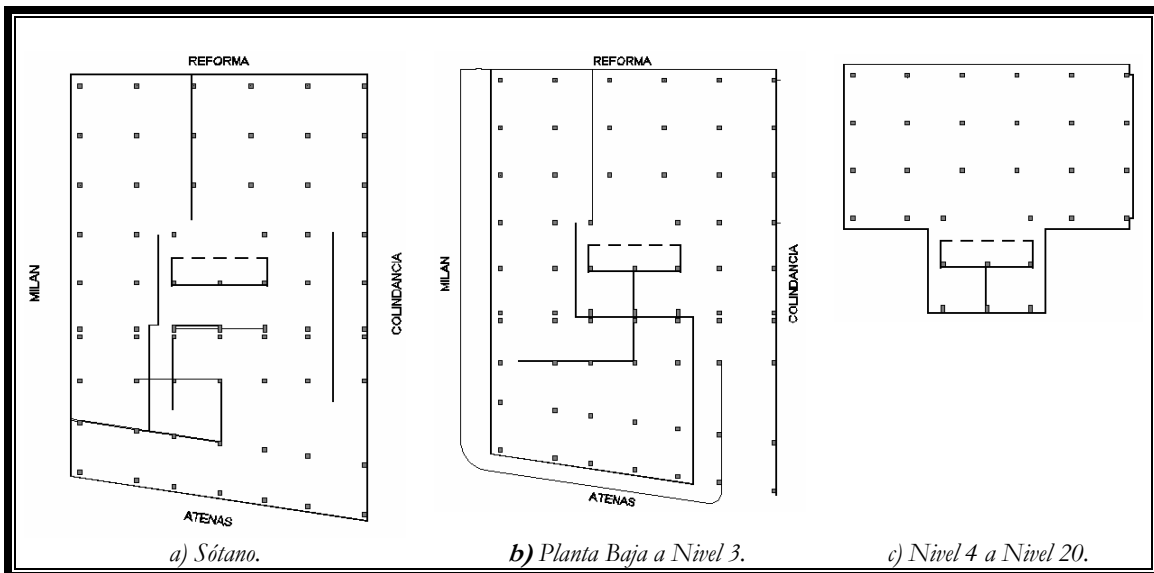
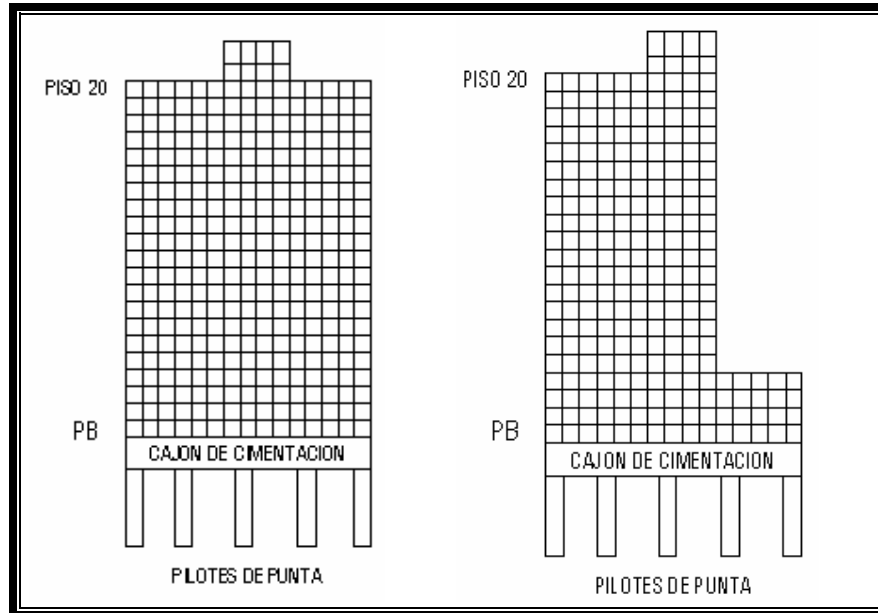


Figura 3.9. Nivel Tipo, edificio Reforma 116.



En cuanto a cimentación, se trata de un sistema compensado a base de un cajón apoyado sobre pilotes de punta, sobre el que se desplanta el cuerpo principal, *fig.3.10*. El sistema estructural de la superestructura consiste de marcos flexibles de acero formados a base de columnas y vigas que soportan losas macizas de concreto, mismas que proporcionan una gran rigidez en su plano, aunado a estos, el edificio cuenta con un núcleo de servicios provocando asimetrías de importancia, situación que puede apreciarse en la *fig.3.9.c*.



*Figura 3.10. Vistas longitudinal y transversal del edificio*

A continuación en la *fig.3.11*, se presentan algunas ilustraciones del estado del edificio al momento de realizar su estudio.



*Figura 3.11. Imágenes del edificio*

**3.2.4. Edificio Reforma 51.**

Este edificio se encuentra localizado sobre Av. Paseo de la Reforma N° 51, Col. Tabacalera, Delegación Cuauhtémoc, D. F., desplantado según las NTC Sismo RCDF en Zona III b como se aprecia en la *fig.3.12*, el cual se caracteriza por ser un suelo francamente blando, con un periodo dominante de aproximadamente 2 seg.

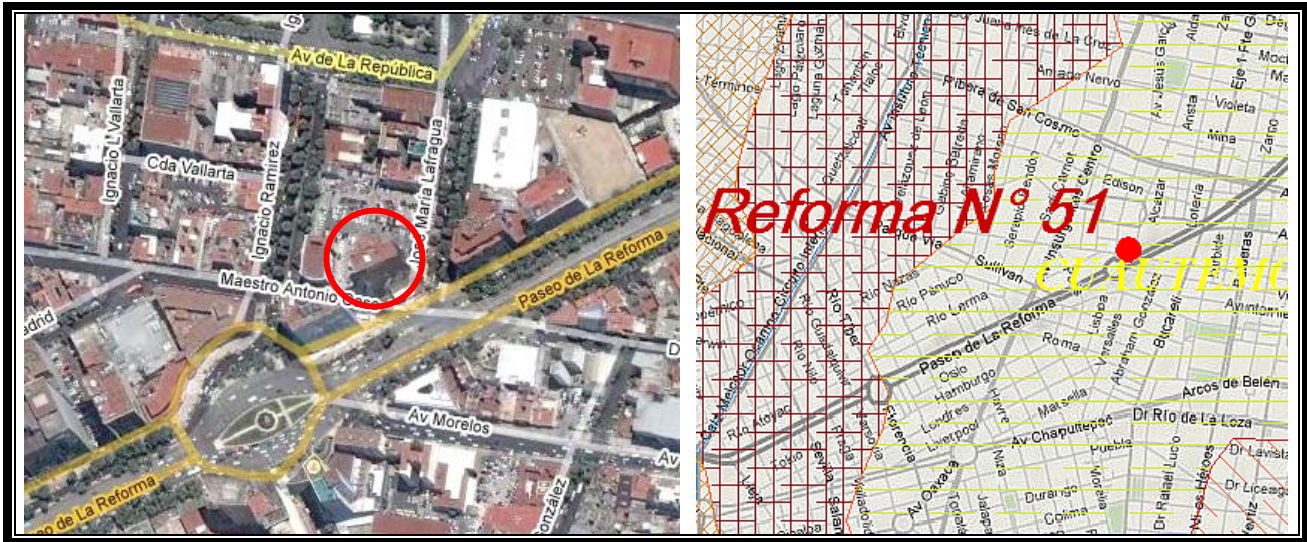


Figura 3.12. Ubicación del edificio Reforma 51 desde perspectiva aérea y según zonificación geotécnica.

Dada su ubicación, la subestructura consta de un cajón de cimentación sustentado sobre pilotes de punta. Mientras el cuerpo principal se encuentra constituido por dos tipos de plantas, *fig.3.13*, distribuidas conforme aumenta la elevación, primero del sótano a 2° nivel y del 3er nivel a azotea, para un total de 22 niveles, (*Valdés 2005*).

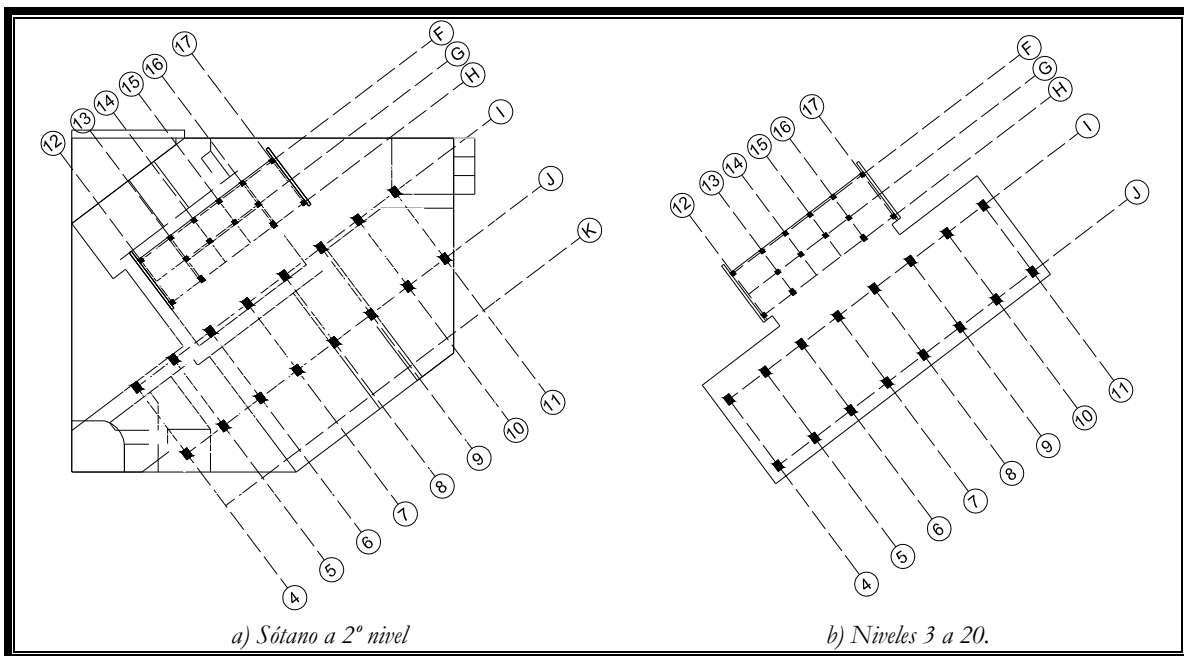


Figura 3.13. Plantas tipo representativas que componen el edificio Reforma 51

La estructuración de este edificio consiste básicamente en un sistema esquelético de marcos flexibles de acero, formados a partir de vigas y columnas con una distribución regular en planta, encargada de proporcionar la resistencia requerida por la estructura, la cual se concentra entre los ejes de identificación 4-17 en la transversal y ejes F-J en dirección longitudinal de la planta tipo, cabe mencionar que es importante la presencia de un núcleo lateral en la parte posterior del inmueble que aporta rigidez y provoca asimetría.



Figura 3.14. Vistas del edificio Reforma N° 51

## 4. DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS EDIFICIOS

En este capítulo se obtienen y comparan los resultados del análisis de señales para la determinación de las propiedades dinámicas de los edificios estudiados. Se discute el comportamiento dinámico experimentado por estos, tomando en cuenta, entre otras cosas, el material de construcción, tipo de estructuración, número de niveles y las características particulares del sitio de desplante.

El primer edificio fue originalmente estudiado por Castellán (2001), sin embargo, en este trabajo se tomó como base de comparación para observar la funcionalidad de la metodología de análisis de señales implementada en el instrumento virtual desarrollado en esta tesis, con objeto de reproducir el análisis de los registros de vibración forzada obtenidos en el edificio.

### 4.1 EDIFICIO EXCONASUPO

#### 4.1.1 Tipo de instrumentación

El sistema de medición y monitoreo sísmico instalado en el edificio de la EXCONASUPO, estuvo formado por 5 instrumentos (acelerómetros) ubicados en sótano, pisos 6, 13 y dos equipos en la azotea. La ubicación de los instrumentos en planta se basó en observaciones en las que se determinó que los efectos de torsión eran mínimos, debido a la gran rigidez torsional proporcionada por los muros longitudinales de concreto. Esta razón aunada a la búsqueda de la facilidad de acceso al equipo, se colocaron cuatro instrumentos en la línea de columnas adyacente a la zona de escaleras y el quinto equipo fue colocado diagonalmente en la azotea, *figs. 4.1*.

La denominación de los equipos o estaciones de medición fue determinada de acuerdo a su ubicación en el edificio. A continuación se describen las características más importantes de cada instrumento.

#### Equipo No. 1.

Ubicación: Sótano.

- ✦ Registrador digital GSR-12 marca Terra-Technology
- ✦ 12 bits
- ✦ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✦ Montaje vertical
- ✦ Memoria RAM 4.0 MB
- ✦ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 0.50 g
- ✦ Umbral de disparo configurado a 2 gals (0.002g)
- ✦ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✦ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✦ Muestras por segundo: 100

#### Equipos No. 2 y 3.

Ubicación: Piso 6 y piso 13.

- ✦ Registrador digital GSR-12 marca Terra-Technology
- ✦ 12 bits
- ✦ 2 canales de registro (sensor biaxial interno SSA-220)
- ✦ Montaje vertical
- ✦ Memoria RAM 4.0 MB
- ✦ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g
- ✦ Umbral de disparo configurado a 3 gals (0.003g)
- ✦ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✦ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✦ Muestras por segundo: 100

**Equipo No. 4.** (Equipo maestro)

Ubicación: Azotea escalera.

- ✦ Registradores digitales GSR-12 marca Terra-Technology
- ✦ 12 bits
- ✦ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✦ Montaje vertical
- ✦ Memoria RAM 4.0 MB
- ✦ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- ✦ Umbral de disparo configurado a 6 gals (0.006g)
- ✦ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✦ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✦ Muestras por segundo: 100
- ✦ Funciona como equipo maestro con una interfaz 485 para comunicación con los otros equipos.
- ✦ Equipado con GPS (unidad de geoposicionamiento).
- ✦ Equipado con módem para la comunicación a distancia.

**Equipo No. 5.**

Ubicación: Azotea exterior.

- ✦ Registradores digitales GSR-16 marca Terra-Technology
- ✦ 16 bits
- ✦ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✦ Montaje vertical
- ✦ Memoria RAM 4.0 MB
- ✦ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- ✦ Umbral de disparo al que configurado a 6 gals (0.006g)
- ✦ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✦ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✦ Muestras por segundo: 100

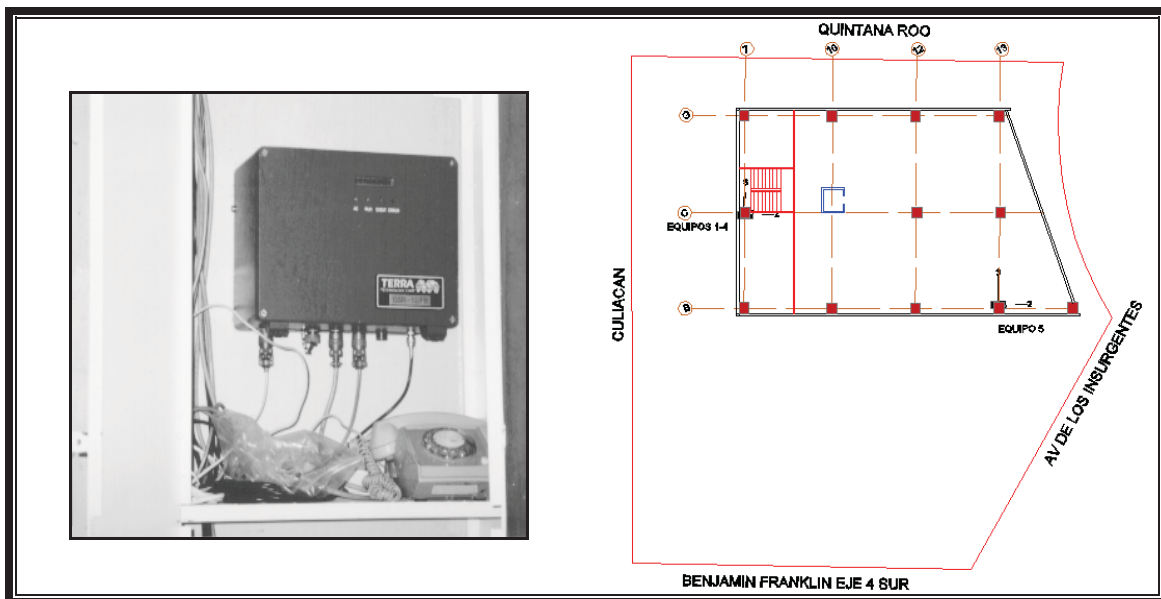


Figura.4.1.a. Equipo de medición representativo instalado en el edificio Exconasupo y ubicación de los mismos en planta.

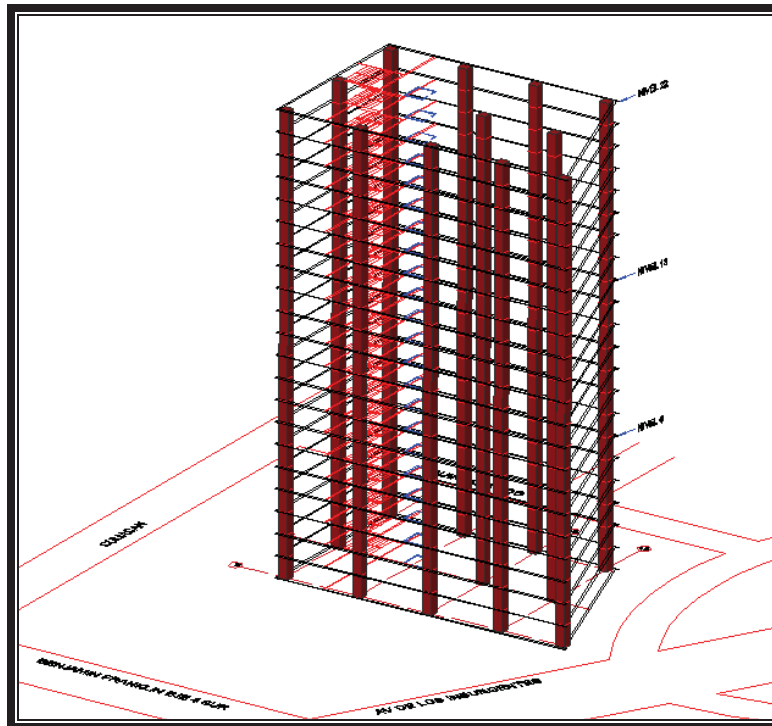


Figura.4.1.b. Ubicación en elevación de los instrumentos utilizados.

El sistema se activa por un equipo maestro (equipo No. 4) colocado en la azotea, el cual se encarga de garantizar que el disparo sea simultáneo en todos los instrumentos. Además, posee un modem para el resguardo de información a través de una línea telefónica y una unidad de geoposicionamiento (GPS), que permite obtener, entre otras cosas, el tiempo exacto a nivel mundial, para tener un tiempo común de referencia de los registros sísmicos en el edificio respecto a otras estaciones localizadas en el Valle de México y en las costas del Pacífico Sur del país.

El registro de datos se activa simultáneamente en todos los equipos del sistema cuando en alguno de ellos se rebasa el umbral de disparo preestablecido. La amplitud de estos niveles de aceleración se definió, tratando de evitar la saturación de la memoria física de los equipos por efecto de ruido ambiental insignificante, para este caso, se seleccionó una aceleración de disparo de 2 gals en el sótano y hasta 6 gals en azotea.

#### **4.1.2. Datos recabados**

El sistema de monitoreo sísmico instalado en el edificio funcionó de 1998 a 2001 y logró recabar una gran cantidad de registros producidos principalmente por ruido ambiental de bajos niveles de aceleración, sin embargo, también captó importantes eventos sísmicos durante este lapso de tiempo. A continuación se presentan las características de los datos recabados.

##### ***Vibraciones Ambientales.***

Desde un inicio se recabaron señales de vibración ambiental, lo que permitió evaluar la evolución de las propiedades dinámicas de la estructura desde su estado original hasta la conclusión de su reforzamiento.

En la *tabla 4.1* se presentan las características de los principales acelerogramas empleados por Castellán (2001) para realizar su estudio empleando vibración ambiental; estos cuatro conjuntos de registros son los de

amplitud máxima, duración y calidad al realizar el análisis de señales, no obstante, tomaron un total de 100 registros, abarcando el periodo comprendido de junio del 98 a junio de 2000.

Tabla 4.1. Características de los principales acelerogramas de vibración ambiental analizados por Castellán.

Acelerograma	Ubicación	Fecha [meridiano]	Tiempo de disparo [meridiano]	Acel. Pico [gal]			Nº de muestras	Duración del registro [s.]
				Long.	Trans.	Vert.		
1_1730d	Aes	22/06/1998	10:44:24 p.m.	0.958	0.958	-	8502	85.02
3_1730d	P13	22/06/1998	10:44:24 p.m.	0.958	0.958	-	8500	85
5_1730d	P6	22/06/1998	10:37:52 p.m.	0.958	0.958	-	8204	82.04
4_1730d	Sótano	22/06/1998	10:37:52 p.m.	0.2395	0.2395	-	8106	81.06
1_1730c	Aes	22/06/1998	10:43:02 p.m.	1.916	0.958	-	7902	79.02
3_1730c	P13	22/06/1998	10:43:02 p.m.	0.958	0.958	-	7902	79.02
5_1730g	P6	22/06/1998	10:43:02 p.m.	0.958	0.958	-	5004	50.04
4_1730g	Sótano	22/06/1998	10:43:02 p.m.	0.1198	0.2395	-	4902	49.02
Aex16401	Aex	13/06/2000	10:46:08 p.m.	-0.6586	8.3826	-1.737	7113	71.13
Aes16401	Aes	13/06/2000	10:46:09 p.m.	1.916	0.958	1.916	7100	71
P1316401	P13	13/06/2000	10:46:09 p.m.	0.958	0.958	-	7100	71
P6_16401	P6	13/06/2000	10:46:09 p.m.	1.437	0.479	-	7100	71
Sot16401	Sótano	13/06/2000	10:46:09 p.m.	0.2395	0.2395	-	7100	71
Aex17302	Aex	22/06/2000	05:59:40 p.m.	1.916	0.958	1.916	5000	50
Aes17302	Aes	22/06/2000	05:59:40 p.m.	1.916	0.958	1.916	5000	50
P1317302	P13	22/06/2000	05:59:40 p.m.	0.958	0.958	-	5000	50
P6_17302	P6	22/06/2000	05:59:40 p.m.	0.958	-3.353	-	5000	50
Sot17302	Sótano	22/06/2000	05:59:40 p.m.	0.2395	0.2395	0.2395	5000	50

### Vibraciones forzadas.

La instrumentación permanente sobre el edificio durante el periodo antes mencionado, permitió grabar no solo registros producidos por la vibración ambiental, sino también 6 eventos sísmicos, cuyas características se muestran en la tabla 4.2. De esta tabla se destacan dos temblores, que por su magnitud e intensidad excitaron de manera importante a la estructura en su condición reforzada (15 de Junio y 30 de Septiembre de 1999).

Tabla.4.2. Características de los sismos analizados.

Fecha	Origen	Latitud norte	Longitud oeste	Profundidad	Intensidad
15/06/1999	Puebla y Oaxaca	18.39 grados	-97.44 grados	70 kms.	6.7 Mw
21/06/99	Costas de Oaxaca.	18.32	-101.54	68	6.2 Mw
30/09/99	Costas de Oaxaca.	16.06	-96.93	60	7.4 Mw
28/12/99	Costas de Oaxaca.	18.24	-101.43	20	5.9 Mw
21/07/00	Puebla y Morelos	18.09	-98.97	47	5.9 Mw
09/08/00	Costas de Guerrero y Michoacán	17.94	-102.71	9	6.4 Mw

Tabla. 4.3. Datos de los acelerogramas analizados

Acelerograma	Ubicación	Fecha [meridiano]	Tiempo de disparo [meridiano]	Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [ s ]
				Long.	Trans.	Vert.		
Aex16601	Azot-ext	15/06/1999	08:42:46 p.m.	-48.9183	-100.591	20.8496	22452	174.52
Aes16601	Azot-esc	15/06/1999	08:42:46 p.m.	-45.0263	-65.1445	20.1182	22514	175.14
P1316602	Piso 13	15/06/1999	08:42:46 p.m.	24.4292	39.7573	0.4818	22514	175.14
P6_16601	Piso 6	15/06/1999	08:42:46 p.m.	17.7231	64.6655	0.309	22516	175.16
Sot16602	Sótano	15/06/1999	08:42:45 p.m.	22.5132	22.8724	-9.2208	22581	175.81
Aex17200	Azot-ext	21/06/1999	05:44:18 p.m.	-16.1664	16.4658	3.0536	11785	67.85
Aes17200	Azot-esc	21/06/1999	05:44:19 p.m.	13.4127	10.5381	-3.832	11804	68.04
P1317200	Piso 13	21/06/1999	05:44:19 p.m.	8.1431	5.748	0.4764	11804	68.04
P6_17200	Piso 6	21/06/1999	05:44:19 p.m.	5.748	-9.5801	0.318	11804	68.04
Sot17200	Sótano	21/06/1999	05:44:19 p.m.	-4.5505	4.4308	-1.7963	11804	68.04
Aex27300	Azot-ext	30/09/1999	04:32:39 p.m.	-76.4011	-108.794	-12.7535	24276	192.76
Aes27300	Azot-esc	30/09/1999	04:32:40 p.m.	67.0605	66.1025	-13.4121	24316	193.16
P1327300	Piso 13	30/09/1999	04:32:40 p.m.	-38.3203	34.0093	0.4875	24316	193.16
P6_27300	Piso 6	30/09/1999	04:32:40 p.m.	-29.6982	-68.4976	0.4845	24318	193.18
Sot27300	Sótano	30/09/1999	04:32:39 p.m.	15.4479	-22.6329	5.6283	24357	193.57
Aex06000	Azot-ext	29/12/1999	05:21:16 a.m.	9.1011	-8.9813	-1.7364	7561	25.61
Aes06000	Azot-esc.	29/12/1999	05:21:17 a.m.	9.5801	4.79	2.874	7502	25.02
P1306000	Piso 13	29/12/1999	05:21:17 a.m.	5.748	3.832	0.3568	7502	25.02
P6_06000	Piso 6	29/12/1999	05:21:17 a.m.	-3.353	5.269	0.4635	7502	25.02
Sot06000	Sótano	29/12/1999	05:21:17 a.m.	2.395	2.395	0.958	7502	25.02
Aex20200	Azot-ext	21/07/2000	06:14:03 a.m.	-17.1244	31.4346	-8.5622	13397	83.97
Aes20200	Azot-esc	21/07/2000	06:14:03 a.m.	17.2441	16.2861	8.6221	13505	85.05
P1320200	Piso 13	21/07/2000	06:14:04 a.m.	8.6221	-10.0591	0.4637	13480	84.8
P6_20200	Piso 6	21/07/2000	06:14:04 a.m.	9.1011	18.2021	0.4795	13410	84.1
Sot20200	Sótano	21/07/2000	06:14:03 a.m.	-6.2271	6.4666	-4.1913	13490	84.9
Aex22100	Azot-ext	09/08/2000	11:43:29 a.m.	29.3989	-31.7939	3.626	17251	122.51
Aes22100	Azot-esc	09/08/2000	11:43:30 a.m.	22.9922	19.1601	4.79	17210	122.1
P1322100	Piso 13	09/08/2000	11:43:30 a.m.	14.8491	11.9751	0.4844	17208	122.08
P6_22100	Piso 6	09/08/2000	11:43:30 a.m.	9.1011	-17.2441	0.488	17212	122.12
Sot22100	Sótano	09/08/2000	11:43:30 a.m.	6.2271	5.6283	2.395	17212	122.12

En la *tabla 4.3.* se muestran las características de los registros recabados tras la acción de los eventos sísmicos mencionados, así mismo en *fig. 4.2.a y 4.2.b,* se muestran esquemáticamente los registros de aceleraciones obtenidos de los eventos sísmicos y el efecto de amplificación que se produce en la altura del edificio, efecto análogo al comportamiento de una viga en voladizo. Por otra parte en la dirección transversal se observa en el nivel 6 aceleraciones más grandes que el nivel siguiente, comportamiento que puede atribuirse a la mayor participación de modos superiores o bien la interacción con cargas de entrepiso importantes, provocando el efecto de entrepiso débil.



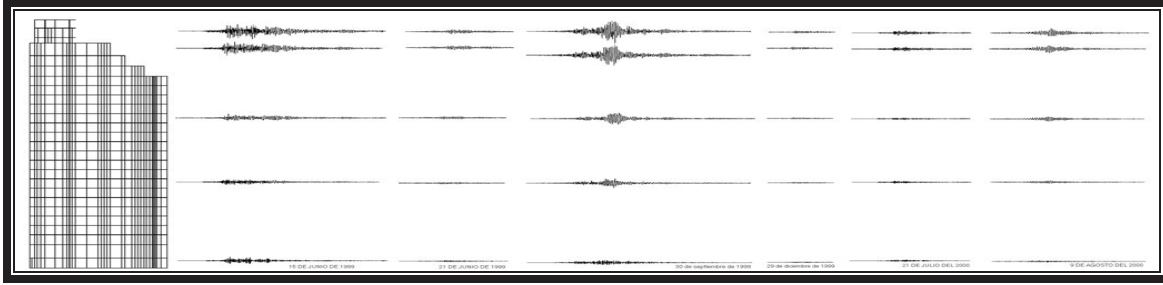


Figura 4.2.a. Acelerogramas en dirección longitudinal.

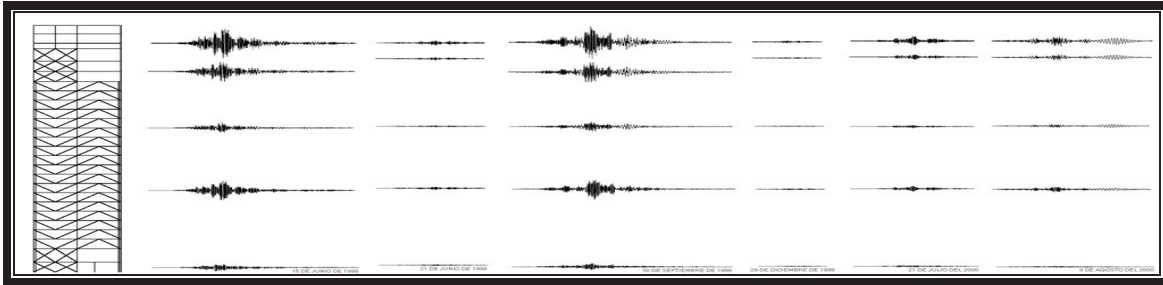


Figura 4.2.b. Acelerogramas en dirección transversal.

### 4.1.3. Propiedades dinámicas

Tras el análisis de las señales de vibración ambiental a pesar de los bajos niveles de aceleración detectados y por ende baja calidad de coherencia entre las señales, Castellán (2001) identificó los periodos fundamentales y percibió el sensible cambio de estos antes, durante y post-refuerzo, *fig 4.3*, lo cual resultó ser más evidente en la dirección transversal por ser la más flexible para el edificio, sufriendo un incremento de rigidez debido a la implementación del sistema de contraventeos y disipadores de energía. En la dirección longitudinal no se adicionaron sistemas resistentes, solo se realizó inyección de resinas en grietas del muro de concreto, por lo cual, el cambio de propiedades fue mínimo. Se puede notar que, en el lapso intermedio, existieron variaciones importantes asociadas a la modificación de las cargas gravitacionales y rigidización gradual de la estructura.

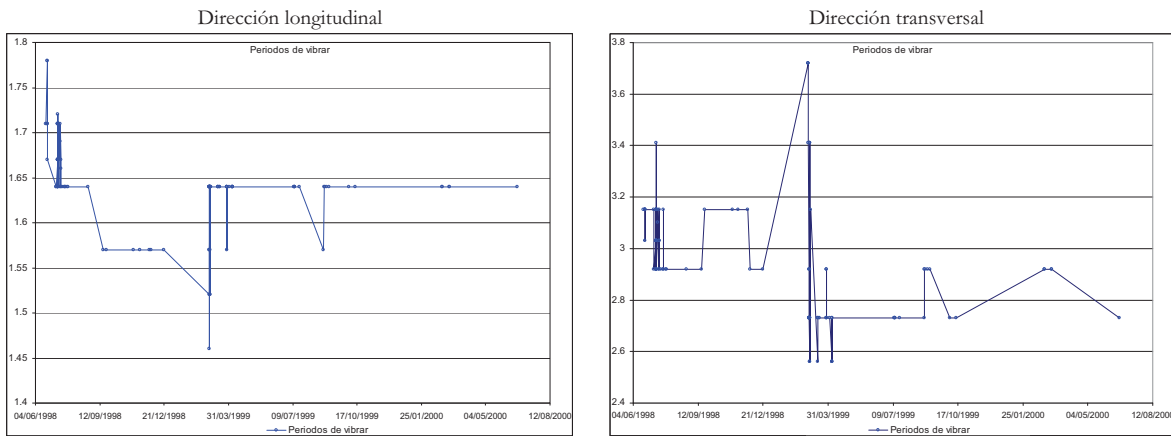


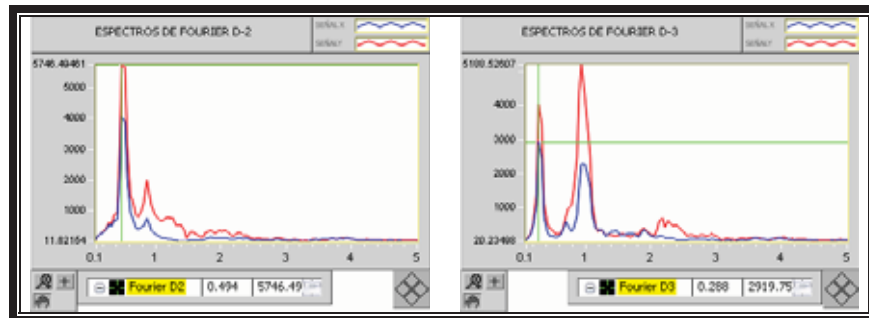
Figura 4.3. Evolución de los periodos fundamentales antes, durante y después del refuerzo del inmueble.

En cuanto a la obtención de formas modales del edificio a partir de las excitaciones ambientales, Castellán (2001) seleccionó aquellas con picos significativos y valores de coherencia altos para poder considerar satisfactorio el valor de la fase obtenida, sin embargo, es con los registros de vibración forzada donde fue más clara y con mejor calidad la obtención de frecuencias y formas modales.

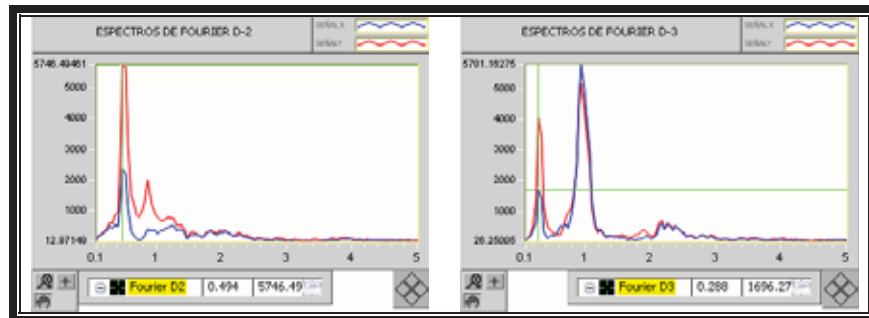
Esta primera parte del capítulo, está enfocada a la verificación de resultados de propiedades dinámicas del edificio en cuestión obtenidos por Castellán (2001), utilizando el instrumento virtual IVAS desarrollado en este trabajo, y los seis registros de vibración forzada recabados durante el periodo que duro la instrumentación. Estas señales son de gran calidad ya que presentan poco ruido externo, y, a excepción del equipo en el sótano, poseen altas coherencias (superiores al 95%). En las *figs 4.4.a, b, c, d*, se presenta el análisis espectral para el evento del 30 de septiembre de 1999, el cual presento la mayor intensidad.

En la *fig. 4.4.a*, se pueden observar dos frecuencias importantes en el espectro de Fourier de 0.288 hz en la dirección transversal y 0.494 hz en la dirección longitudinal, las cuales corresponden a las frecuencias naturales de vibrar del edificio como se demostrará más adelante. En estas graficas se aprecian la superposición de los espectros de Fourier para dos de los equipos colocados en niveles distintos; con color rojo se indica el espectro del equipo colocado en nivel superior (señal de respuesta) y en azul el equipo en el nivel inferior (señal de estímulo). Las coherencias asociadas a estos registros se presentan en la *fig. 4.4.b* y en ellas se identifican valores altos, lo cual, indica que existe una buena correlación entre la señal de entrada y salida y, por tanto, se demuestra que están asociadas al comportamiento dinámico del edificio.

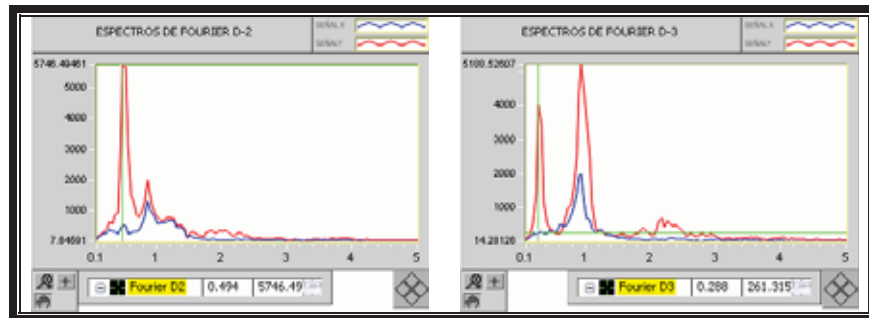
Para complementar el análisis de señales, se hace uso de las funciones de transferencia y de fase, *figs. 4.4.c y 4.4.d*, de utilidad en la obtención de las formas modales de la estructura.



*Espectros correspondientes a los niveles de azotea vs nivel 13*

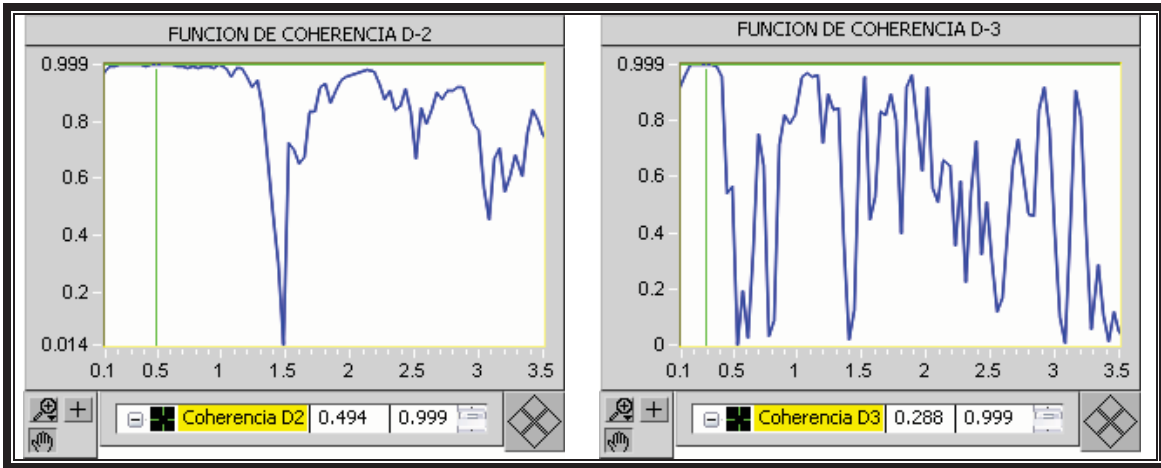


*Espectros correspondientes a los niveles de azotea vs nivel 6*

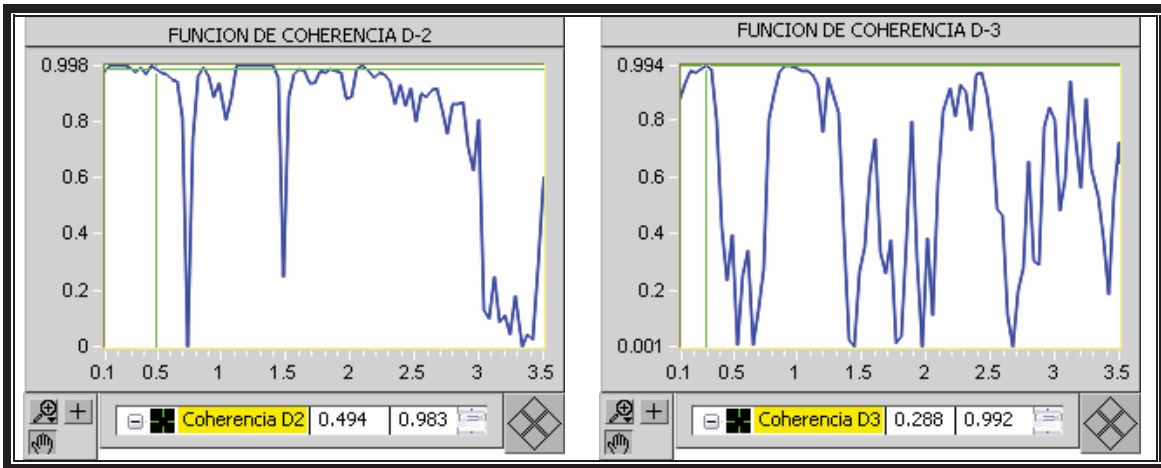


*Espectros correspondientes a los niveles de azotea vs sótano*

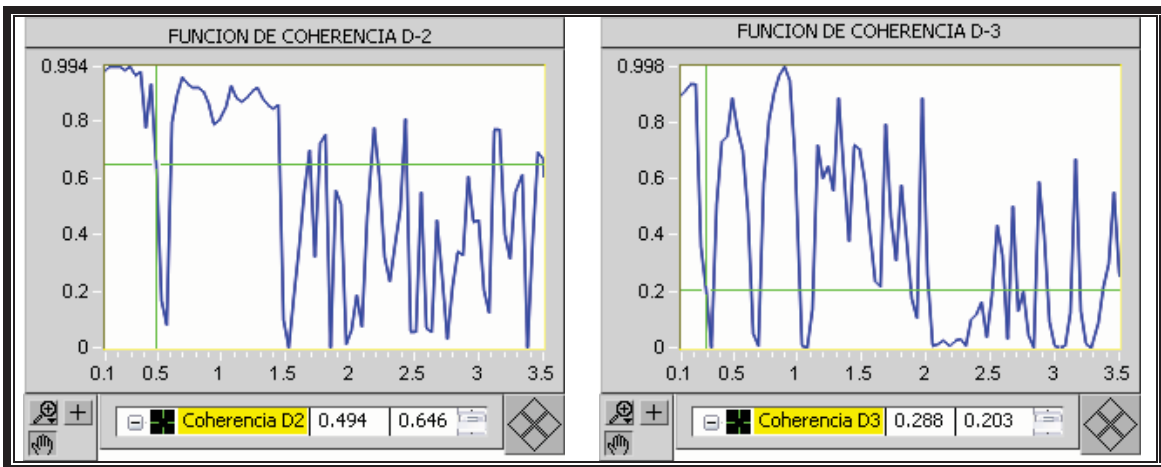
*Figura. 4.4.a. Espectros de Fourier en las direcciones longitudinal y transversal para el sismo del 30 de septiembre de 1999.*



*Funciones de coherencia entre azotea y nivel 13*

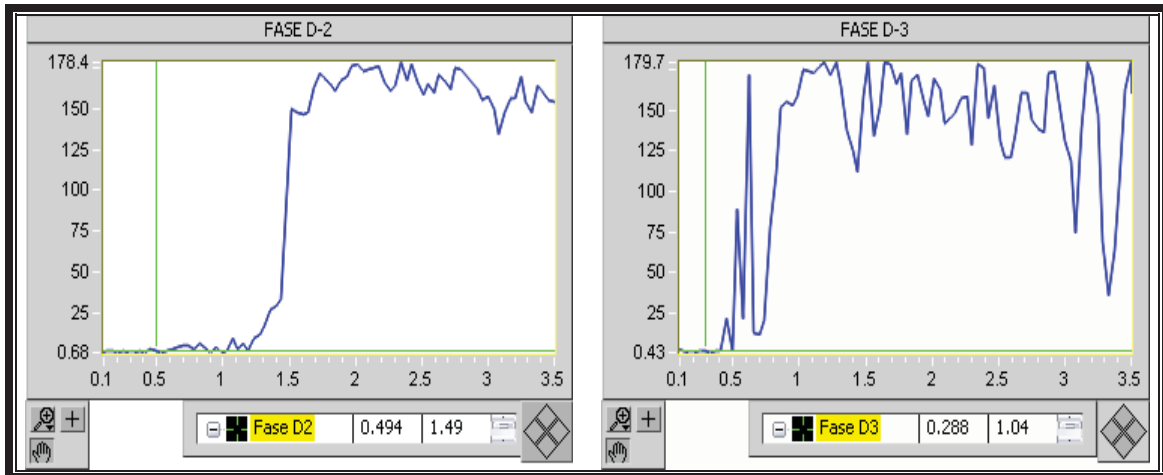


*Funciones de coherencia entre azotea y nivel 6*

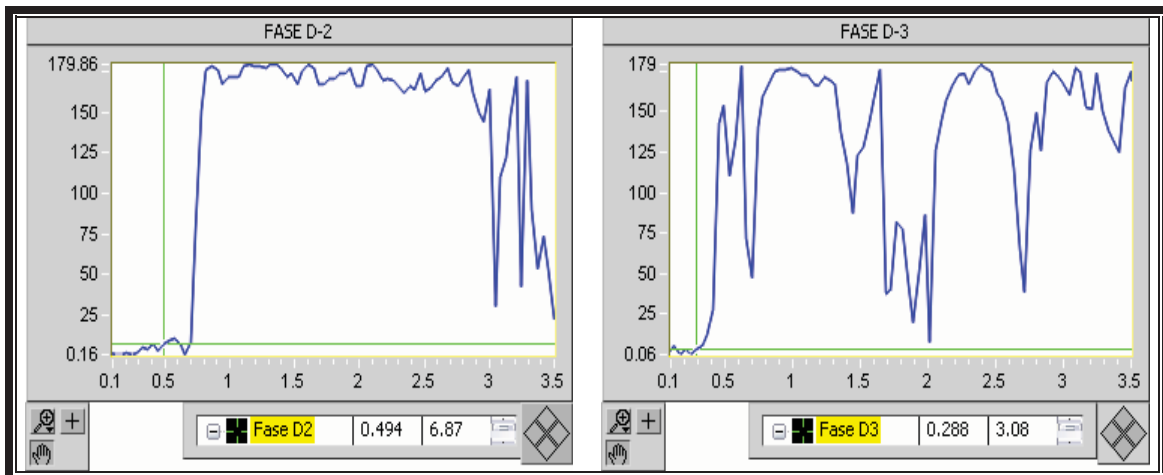


*Funciones de coherencia entre azotea y nivel de sótano*

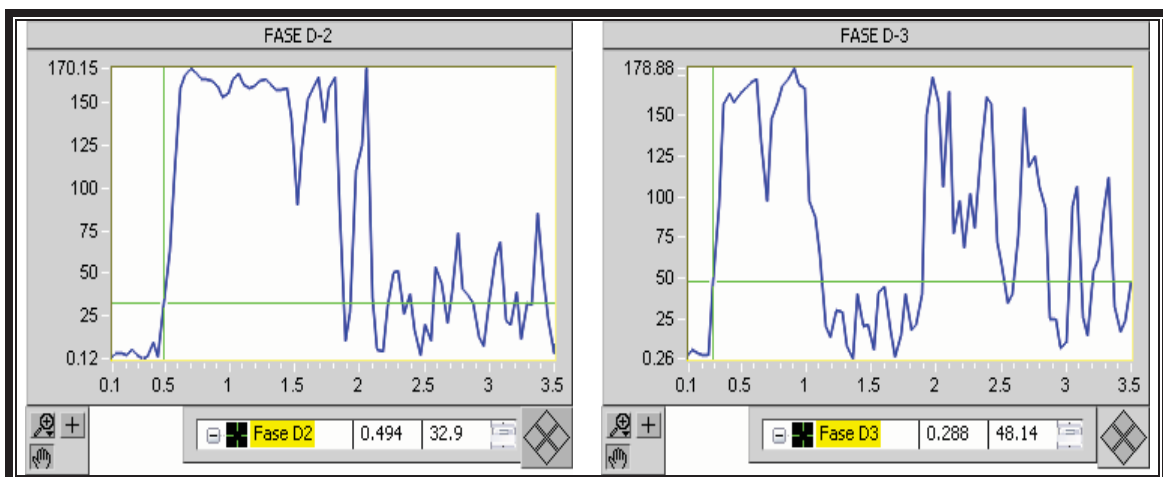
*Figura. 4.4.b. Funciones de coherencia en las direcciones longitudinal y transversal para el sismo del 30 de septiembre de 1999.*



Fases entre las señales para azotea y nivel 13

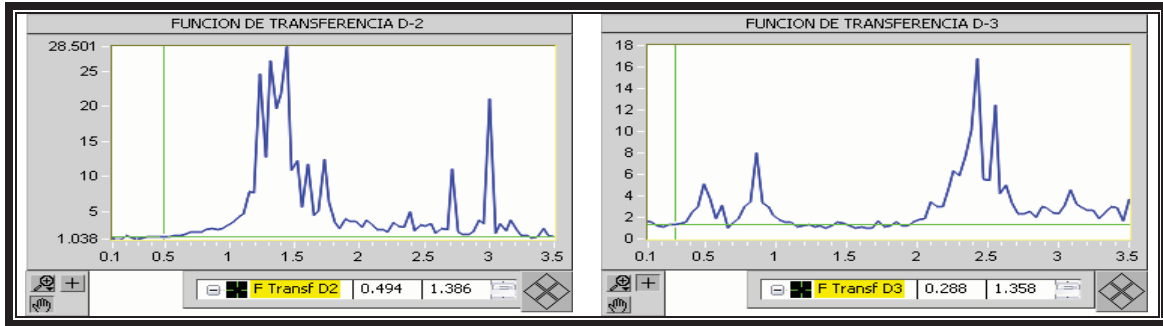


Fases entre las señales para azotea y nivel 6

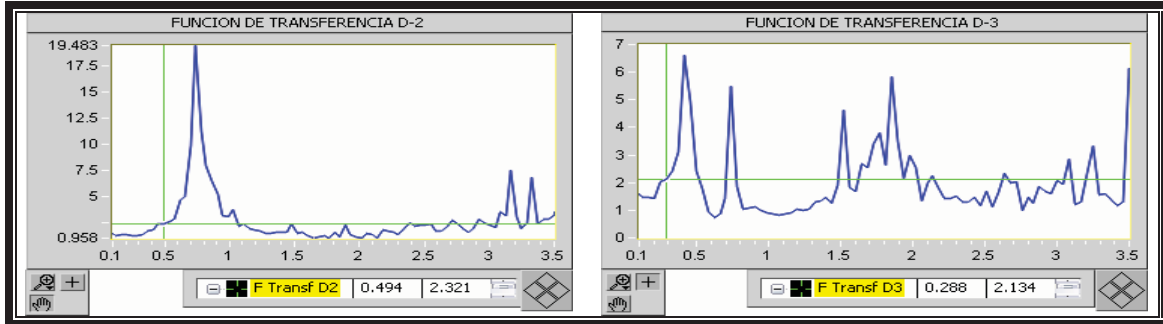


Fases entre las señales para azotea y sótano

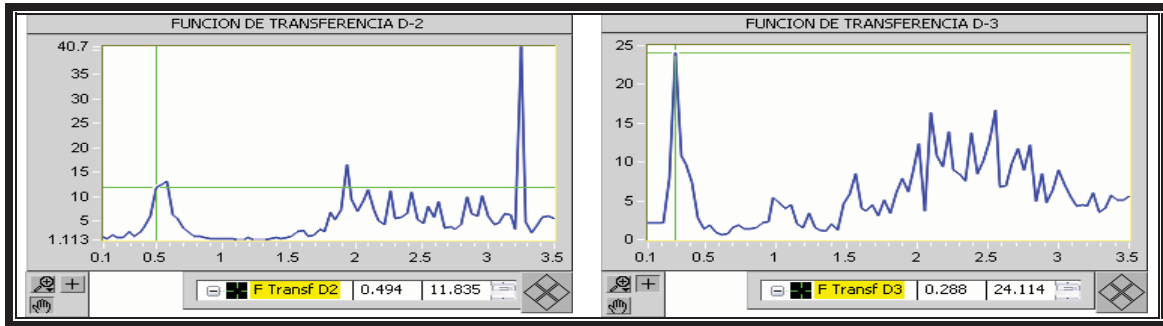
Figura. 4.4.c. Fases en las direcciones longitudinal y transversal para el sismo del 30 de septiembre de 1999.



Función de transferencia entre las señales de azotea y nivel 13



Función de transferencia entre las señales de azotea y nivel 6



Función de transferencia entre las señales de azotea y sótano

Figura. 4.4.d. Funciones de transferencia ambas direcciones para el sismo del 30 de septiembre de 1999.

A continuación, en la tabla 4.4, se muestran los resultados del análisis de señales para cada uno de los eventos sísmicos analizados por medio del instrumento virtual, con la cual, se reconstruye gráficamente las formas modales para el edificio, fig. 4.5.a y b.

Tabla 4.4. Amplitudes obtenidas del análisis de los eventos sísmicos en ambas direcciones.

		Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano	Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano
15 de junio de 1999.	Coherencia	0.518	1	0.992	0.293	0.296	0.998	0.981	0.713
	Fase [°]		0.3	4.18	48.27		0.28	1.92	14.45
	Transferencia [Sxy/Syy]		1.63	2.826	10.38		1.326	2.277	7.981
	Coherencia	1.762	0.969	0.989	0.869	1.333	0.842	0.964	0.608
	Fase [°]		177.18	178.5	174.71		159.96	179.89	36.48
	Transferencia [Sxy/Syy]		5.124	1.186	4.984		1.318	1.11	2.947
	Coherencia	No se identifico				1.910	0.956	0.63	0.745
	Fase [°]						172.82	25.26	175.5
	Transferencia [Sxy/Syy]						1.058	2.317	4.118

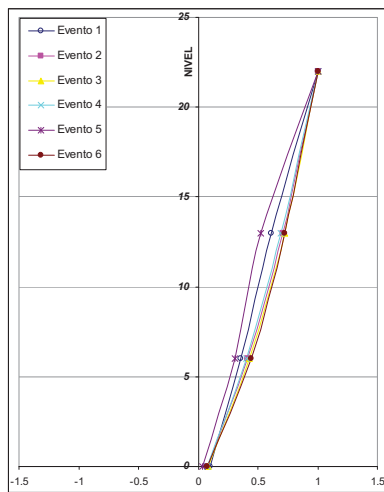
		Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano	Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano
21 de junio de 1999.	Coherencia	0.508	0.999	1	0.827	0.305	0.999	0.998	0.599
	Fase [°]		1.37	0.45	24.09		0.73	0.78	31.88
	Transferencia [Sxy/Syy]		1.419	2.423	12.686		1.91	3.395	15.742
	Coherencia	1.576	0.697	0.959	0.952	0.974	0.861	0.94	0.921
	Fase [°]		148	172.96	174.56		159.71	166.13	164.34
	Transferencia [Sxy/Syy]		12.594	1.488	10.257		2.72	1.024	1.886
	Coherencia	No se identifico				1.910	0.875	0.442	0.897
	Fase [°]						164.41	27.36	168.84
	Transferencia [Sxy/Syy]						1.43	3.261	4.046

		Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano	Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano
30 de Septiembre de 1999.	Coherencia	0.494	0.999	0.983	0.646	0.288	0.999	0.992	0.203
	Fase [°]		1.49	6.87	32.9		1.04	3.08	48.14
	Transferencia [Sxy/Syy]		1.386	2.321	11.835		1.358	2.134	24.114
	Coherencia	1.837	0.865	0.988	0.401	1.234	0.891	0.95	0.644
	Fase [°]		160.49	174.61	44.27		171.69	171.19	29.88
	Transferencia [Sxy/Syy]		2.648	1.025	6.741		1.284	0.979	3.421
	Coherencia	No se identifico				1.910	0.964	0.798	0.889
	Fase [°]						172.4	20.36	173.2
	Transferencia [Sxy/Syy]						1.262	3.516	8.628

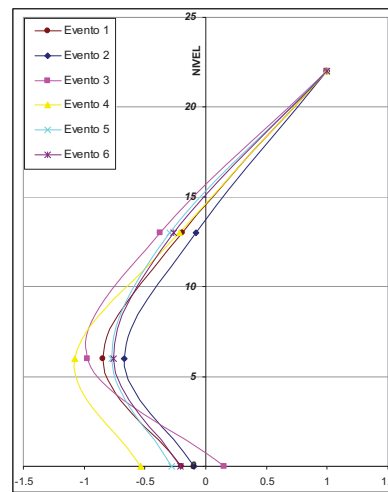
		Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano	Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano
29 de diciembre de 1999.	Coherencia	0.520	0.999	0.999	0.979	0.307	0.997	0.984	0.757
	Fase [°]		1.71	1.68	2.17		0.03	0.35	10.79
	Transferencia [Sxy/Syy]		1.444	2.467	13.319		1.487	2.845	4.189
	Coherencia	1.813	0.907	0.988	0.955	1.280	0.939	0.965	0.718
	Fase [°]		164.1	176.6	177.1		178.24	174.6	22.72
	Transferencia [Sxy/Syy]		4.571	0.927	1.866		1.097	0.837	3.384
	Coherencia	No se identifico				1.959	0.949	0.406	0.639
	Fase [°]						171.2	48.48	31.93
	Transferencia [Sxy/Syy]						1.027	4.585	6.682

		Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano	Frecuencia [Hz.]	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano
21 de julio de 2000.	Coherencia	0.521	0.991	0.978	0.982	0.298	0.999	0.995	0.665
	Fase [°]		1.6	4.58	2.35		0.54	1.34	13.3
	Transferencia [Sxy/Syy]		1.096	1.562	1.996		1.239	1.971	13.908
	Coherencia	1.861	0.965	0.999	0.898	0.993	0.958	0.998	0.764
	Fase [°]		169.72	179.47	164.16		168.74	177.63	152.1
	Transferencia [Sxy/Syy]		3.394	1.298	3.62		2.074	1.103	4.959
	Coherencia	No se identifico				1.823	0.965	0.591	0.655
	Fase [°]						170.88	38.14	25.19
	Transferencia [Sxy/Syy]						1.588	4.405	5.952

		Frecuencia	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano	Frecuencia	Azotea - N13	Azotea - N6	Azotea - Sótano
9 de Agosto de 2000.	Coherencia	0.493	0.998	0.997	0.765	0.288	0.998	0.987	0.435
	Fase [°]		2.19	1.02	23.41		0.84	1.38	38.57
	Transferencia [Sxy/Syy]		1.382	2.236	12.659		1.363	2.283	9.069
	Coherencia	1.894	0.95	0.978	0.652	1.061	0.96	0.997	0.869
	Fase [°]		175.4	173.1	152.5		171.2	179.57	163.04
	Transferencia [Sxy/Syy]		3.749	1.316	4.897		1.308	0.742	2.567
	Coherencia	No se identificó	No se identificó	No se identificó	No se identificó	1.968	0.929	0.086	0.208
	Fase [°]						170.4	45.32	56.45
	Transferencia [Sxy/Syy]						1.543	2.851	7.818

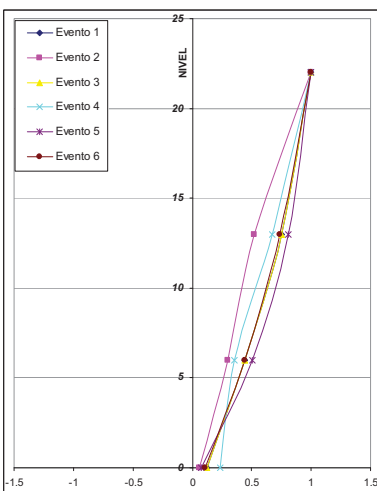


Primer forma modal (0.51 Hz)

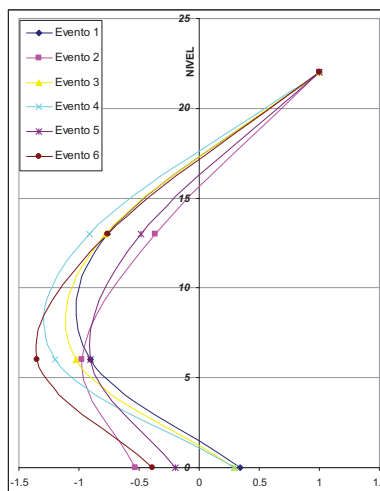


Segunda forma modal (1.191 Hz)

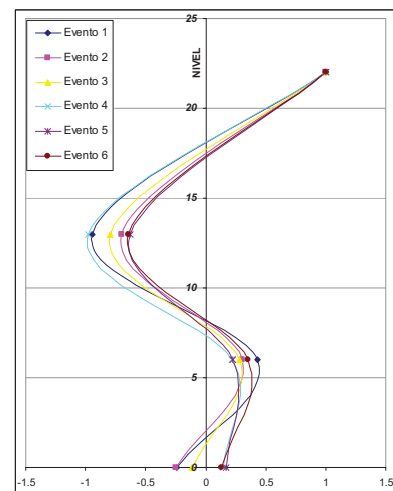
Figura 4.5.a. Formas modales identificadas ante los seis eventos estudiados en la dirección longitudinal



Primer forma modal (0.297 Hz)



Segunda forma modal (1.146 Hz)



Tercer forma modal (1.941 Hz)

Figura 4.5.b. Formas modales identificadas ante los seis eventos estudiados en la dirección transversal

Comparando los resultados obtenidos contra los reportados originalmente por Castelán (2001), en la tabla 4.5, se observa que no existen diferencias significativas respecto al primer modo en traslación para ambas direcciones.

Tabla 4.5. Comparación de resultados con el estudio original (empleando espectros de Fourier y espectro cruzado)

vibración Forzada	Resultados a partir del Espectro de Fourier				Resultados a partir del Espectro Cruzado				Diferencia	
	Dir Longitudinal		Dir Transversal		Dir Longitudinal		Dir Transversal		Longitudinal	Transversal
	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]	f [Hz]	T [s]		
15 de Junio de 1999	0.49	2.04	0.29	3.45	0.518	1.931	0.296	3.378	-5.7%	-2.1%
21 de Junio de 1999	0.52	1.92	0.33	3.03	0.508	1.969	0.305	3.279	2.3%	7.6%
30 de Septiembre de 1999	0.51	1.96	0.31	3.23	0.494	2.024	0.288	3.472	3.1%	7.1%
28 de Diciembre de 1999	0.52	1.92	0.31	3.23	0.520	1.923	0.307	3.261	0.0%	1.1%
21 de Julio de 2000	0.52	1.92	0.3	3.33	0.521	1.919	0.298	3.356	-0.2%	0.7%
9 de Agosto de 2000	0.49	2.04	0.29	3.45	0.493	2.030	0.288	3.472	-0.5%	0.7%

En lo que respecta las frecuencias de modos superiores de vibración (torsión y traslación), de un análisis mas detallado pudo identificarse que la frecuencia de torsión identificada por Castelán (2001), corresponde a una frecuencia en traslación, lo cual fue posible concluir gracias a la capacidad mejorada que tiene el programa desarrollado en esta tesis respecto al que en su momento se utilizó. Así mismo este software permitió identificar la tercera forma modal en la dirección más flexible. En resumen, los valores promedio de periodos obtenidos fueron los siguientes:

- ✦ Dirección longitudinal
  - 1.96 s. (0.509 Hz) primer modo
  - 0.56 s. (1.791 Hz) Segundo modo
- ✦ Dirección transversal
  - 3.37 s. (0.297 Hz) primer modo
  - 0.87 s. (1.146 Hz) segundo modo
  - 0.52 s. (1.941 Hz) tercer modo
- ✦ En torsión
  - 1.13 seg. (0.884 Hz)

En lo que se refiere a los amortiguamientos, estos presentan valores por encima del comúnmente asociado a las estructuras en la práctica (5%), siendo del 11% en la dirección flexible (transversal) y 8 % en la longitudinal, ambos asociados al primer modo de vibrar.

En este edificio se puede apreciar claramente la utilidad de la técnica de instrumentación empleada, en lo particular, para la verificación de la efectividad del proceso de reforzamiento que, como se mencionó, fue más evidente para la dirección transversal, lo que trajo como consecuencia la disminución del periodo de vibración de la estructura de 3.15 seg. a 2.7 seg, equivalente al 14%. Cabe aclarar que estos resultados fueron obtenidos a partir de registros de vibración ambiental, sin embargo, en caso de contarse con sistema de monitoreo e instrumentación por un periodo relativamente largo, la posibilidad de registrar eventos sísmicos se incrementa y los resultados obtenidos pueden ser más representativos del comportamiento dinámico que puede experimentar el edificio ante un evento sísmico intenso.

Para el edificio de Exconasupo, las diferencias en los resultados de periodos de vibrar obtenidos de vibración ambiental y vibración forzada (23%), se pueden atribuir a lo siguiente:



a) La cantidad de energía del evento, lo cual se refleja en las amplitudes de las frecuencias que se identifican en los espectros de Fourier.

b) Para una edificación relativamente sana, una excitación de vibración ambiental (tráfico de vehículos, funcionamiento de maquinas, etc.) no genera daño en su estructura, ni en sus elementos no estructurales que no han sido desligados adecuadamente. Así mismo el porcentaje de participación de estos últimos en la rigidez lateral del sistema, es mayor, que en excitaciones producidas por eventos sísmicos, lo que contribuye a que el análisis de este tipo de señales de vibración ambiental arroje resultados de periodos de vibrar ligeramente menores.

c) Ante eventos sísmicos intensos puede generarse cierto nivel de daño, no solo en la estructura sino también en sus elementos estructurales sobre todo si no han sido desligados adecuadamente, lo cual conduce a que la estructura se pueda flexibilizar ligeramente y por tanto, el análisis de las señales correspondientes conduzca a periodos de vibrar ligeramente mayores que los obtenidos en vibración ambiental.

## 4.2. EDIFICIO INSURGENTES SUR 1931

### 4.2.1. Tipo de instrumentación

Se realizó un estudio de vibración ambiental en el edificio *Insurgentes 1931* registrando pequeñas vibraciones producto de excitaciones ambientales, tales como: el tránsito de vehículos, funcionamiento de equipos y maquinaria en el interior del edificio, etc., encaminado a la determinación de las propiedades dinámicas del inmueble en cuestión de una forma rápida y eficiente que no involucrara la instrumentación a largo plazo, realizándose mediciones con dos equipos de medición fabricados por la empresa Terra Technology cuyas características principales se presentan a continuación y se muestran en la *fig. 4.6*.



Figura 4.6. Equipo de medición instalado en *Insurgentes sur 1931*

#### Equipo No. 1.

Ubicación: Azotea.

Nombre de la estación: SOT.

- ✓ Registrador digital GSR-12 marca Terra-Technology
- ✓ 12 bits
- ✓ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✓ Montaje vertical
- ✓ Memoria RAM 4.0 MB
- ✓ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 0.50 g
- ✓ Umbral de disparo configurado: a 2 gals (0.002g)
- ✓ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✓ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✓ Muestras por segundo: 100

#### Equipo No. 2.

Ubicación: Azotea exterior, Niveles intermedios, Sótano y Campo libre.

Nombre de la estación: GAM.

- ✓ Registradores digitales GSR-16 marca Terra-Technology
- ✓ 16 bits
- ✓ 3 canales de registro (sensor triaxial interno SSA-320)
- ✓ Montaje horizontal

- ✓ Memoria RAM 4.0 MB
- ✓ Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g
- ✓ Umbral de disparo al que fue configurado: 6 gals (0.006g)
- ✓ Tiempo de pre-evento: 30 s.
- ✓ Tiempo de post-evento: 20 s.
- ✓ Muestras por segundo: 100

Para llevar a cabo el registro de señales se seleccionaron puntos de medición distribuidos en los pisos 16 (nivel 20), 11(nivel 15), 7(nivel 11), 3(nivel 7), E4 (nivel 3) y sótano del edificio, además de un punto sobre el terreno circundante tomado como de campo libre cuyo movimiento se supone no afectado por la presencia de la estructura, cabe aclarar que los disparos no fueron simultáneos (es decir ante un mismo eventos), sin embargo se cree pertinente su estudio, dado que las fuentes de excitación son del mismo orden.

En la mayoría de los casos los equipos se situaron en el centro geométrico de éste edificio y puntos extremos de la estructura (esquinas). Distinguiéndose tres tipos de acomodos diferentes que según el objetivo de medición perseguido se pueden clasificar como:

#### Arreglo 1.

Objetivo: Identificar los periodos naturales de vibración longitudinales y transversales con respecto a la azotea, tomando a esta como punto de referencia.

Características: sensores en configuración maestro - esclavo, ubicando uno a niveles intermedios (sensor esclavo) mientras en la azotea el sensor maestro permanece colocado cerca del centroide geométrico del edificio, aproximadamente sobre el mismo punto que el equipo maestro desde una perspectiva en planta.

#### Arreglo 2:

Objetivo: Identificar los periodos o frecuencias de vibración correspondientes a modos de torsión, aumentando para ello la distancia entre sensores que actuaran como brazo de palanca amplificando los movimientos debidos a este suceso.

Características: sensores conectados en configuración maestro - esclavo, ubicando el sensor maestro en el centroide a nivel de azotea y equipo esclavo en puntos extremos del edificio (esquinas) con una separación significativa en planta, esto a diferentes niveles sobre la estructura.

#### Arreglo 3:

Objetivo: Recabar información que permita identificar la existencia de efectos de sitio e interacción suelo-estructura.

Características sensores conectados en configuración maestro esclavo, ubicando el sensor maestro en el centroide a nivel del sótano y equipo esclavo sobre la banqueta de la Av. Insurgentes, en un sitio que se consideró como de campo libre.

### **4.2.2. Datos recabados**

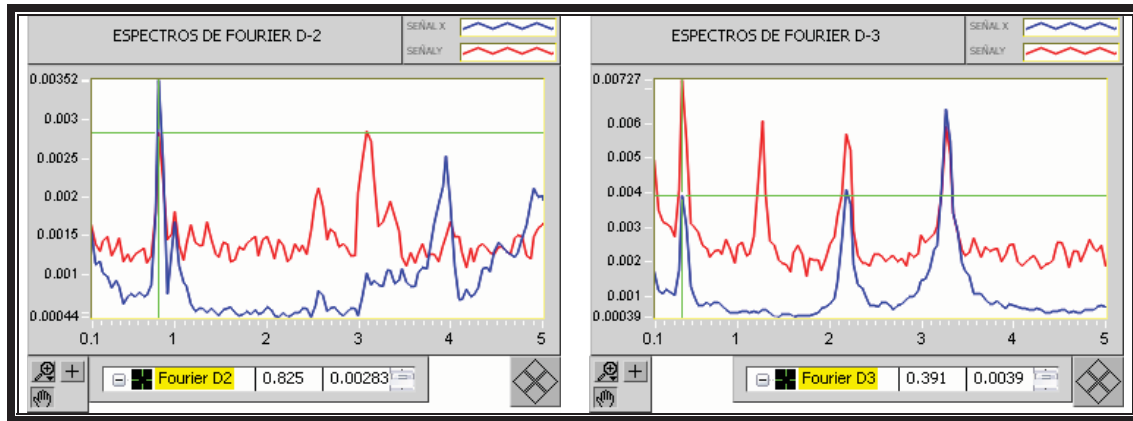
Con estos equipos instalados se realizaron dos campañas de mediciones obteniéndose 21 registros de aceleración, cuyas características principales se condensan en la *tabla 4.6*.

Tabla. 4.6. Registros obtenidos en Insurgentes sur 1931

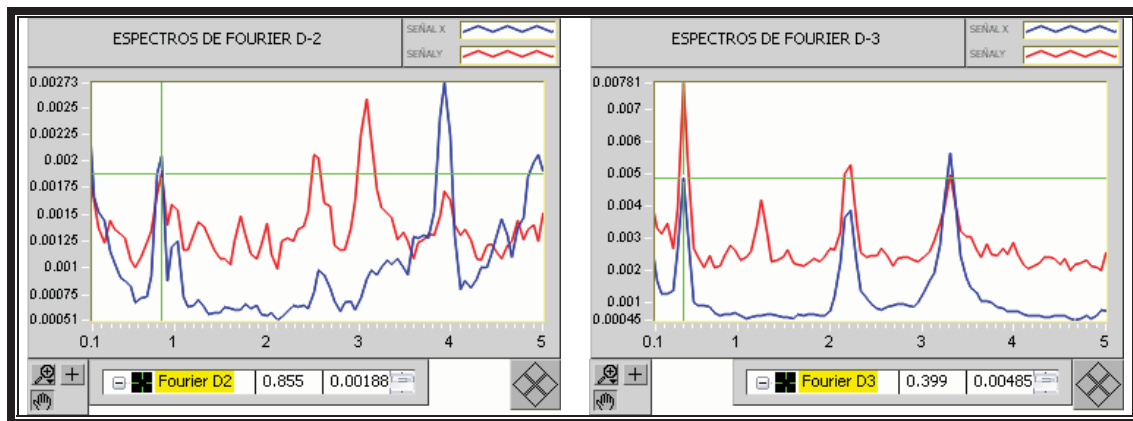
Par	Acelerograma		Fecha	Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s.]
	Registro	Numero		PUNTO	PISO	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	27103	28-Sep-02	1	16	0.3467	0.2212	0.2917	63192	631.92
	GAM	27103		2	16	12.128	8.6601	9.9317	63208	632.08
2	SOT	27104	28-Sep-02	1	16	0.5209	0.382	0.537	64580	645.8
	GAM	27104		2	16	4.5413	3.2933	3.8869	64589	645.89
3	SOT	27109	28-Sep-02	1	16	0.3729	0.2491	0.3255	62166	621.66
	GAM	27109		1	11	0.4108	0.3205	0.2329	62204	622.04
4	SOT	2710A	28-Sep-02	1	16	0.3727	0.2468	0.2016	61420	614.2
	GAM	2710A		1	11	0.3156	0.5177	0.216	61426	614.26
5	SOT	2710C	28-Sep-02	1	16	0.3895	0.2467	0.5195	63824	638.24
	GAM	2710D		3	7	1.184	1.6793	1.1737	63831	638.31
6	SOT	2710D	28-Sep-02	1	16	0.6384	0.3697	0.6388	77187	771.87
	GAM	2710E		3	7	1.7171	1.574	1.3333	77194	771.94
7	SOT	27203	28-Sep-02	1	16	0.3789	0.2312	0.4617	61616	616.16
	GAM	27204		1	7	0.2571	0.6712	0.2064	61655	616.55
8	SOT	27204	28-Sep-02	1	16	0.5921	0.2505	0.3813	63829	638.29
	GAM	27205		1	7	0.4793	0.525	0.3851	63871	638.71
9	SOT	27207	28-Sep-02	1	16	0.4636	0.1249	0.2384	71464	714.64
	GAM	27208		1	3	0.3601	0.4922	0.4482	71495	714.95
10	SOT	27208	28-Sep-02	1	16	0.4102	0.363	0.2498	63152	631.52
	GAM	27209		1	3	0.5509	0.7168	0.331	63180	631.8
11	SOT	2720A	28-Sep-02	1	16	1.5017	0.966	1.8482	61898	618.98
	GAM	2720B		1	E4	0.6368	0.7455	0.458	61857	618.57
12	SOT	2720B	28-Sep-02	1	16	0.4634	0.3589	0.8657	61859	618.59
	GAM	2720C		1	E4	0.2408	0.5644	0.3886	61876	618.76
13	SOT	2720D	28-Sep-02	1	16	0.8091	0.492	1.0905	65771	657.71
	GAM	2720E		4	SOT	0.4162	0.8041	0.2911	65779	657.79
14	SOT	2720E	28-Sep-02	1	16	1.0116	0.4909	1.0874	62356	623.56
	GAM	2720F		4	SOT	0.481	0.2894	0.3573	62335	623.35
15	SOT	2720N	28-Sep-02	1	SOT	0.3687	0.3087	0.4395	61452	614.52
	GAM	2720J		4	SOT	0.3952	0.4261	0.8759	61458	614.58
16	SOT	2720Q	28-Sep-02	1	SOT	0.2658	0.2043	0.2685	61077	610.77
	GAM	2720M		5	SOT	1.6873	0.4502	0.4138	61109	611.09
17	SOT	2720R	28-Sep-02	1	SOT	0.3338	0.1953	0.267	61879	618.79
	GAM	2720N		5	SOT	1.2885	0.4782	0.5074	61888	618.88
18	SOT	2720T	28-Sep-02	1	SOT	0.4568	0.308	0.3823	60812	608.12
	GAM	2720Q		6	SOT	0.9658	0.443	0.3721	60707	607.07
19	SOT	2720U	28-Sep-02	1	SOT	0.2692	0.1893	0.2265	61130	611.3
	GAM	2720R		6	SOT	0.8936	0.3311	0.2703	61013	610.13
20	SOT	2720X	28-Sep-02	1	SOT	0.2319	0.2872	0.4413	103026	1030.26
	GAM	2720U		calle	CALLE	13.2284	4.493	4.114	103177	1031.77
21	SOT	2720Y	28-Sep-02	1	SOT	1.8964	0.3098	0.2727	87721	877.21
	GAM	2720V		calle	CALLE	18.1167	5.8067	3.9764	87732	877.32

### 4.2.3. Propiedades dinámicas

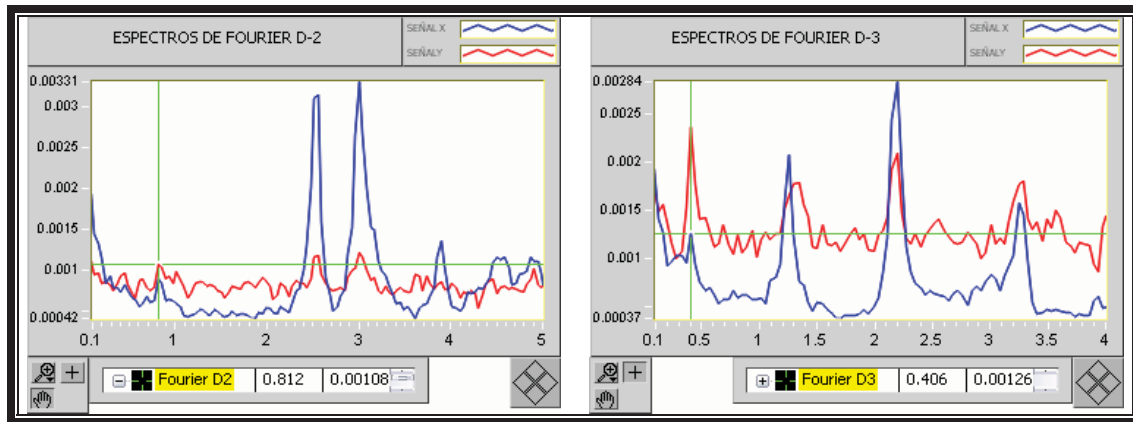
En la fig. 4.7, se presentan algunos de los espectros de Fourier más representativos por nivel y dirección, estudiándose la correlación entre los equipos ubicados en dos diferentes pisos (11-16, 7-16 y 3-16); en ellos se alcanza a observar la existencia de 4 frecuencias en el rango de los 0 a 5 [Hz] por dirección que pueden estar asociadas al comportamiento dinámico de la estructura, situación que se analizará a continuación, con ayuda de las funciones de coherencia y de fase.



a) Espectros de Fourier representativos para los pisos 11 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes



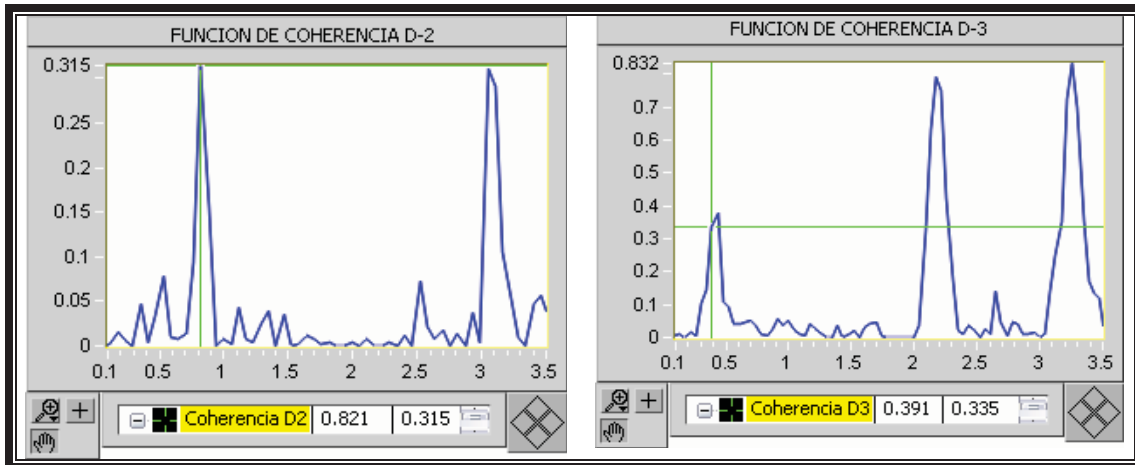
b) Espectros de Fourier representativos para los pisos 7 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes



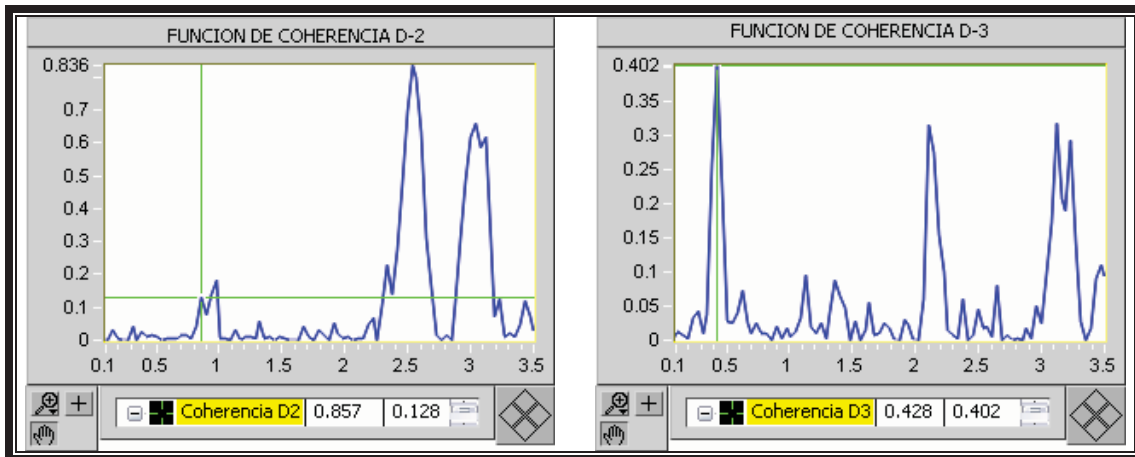
c) Espectros de Fourier representativos para los pisos 3 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes

Figura 4.7. Espectros de Fourier representativos

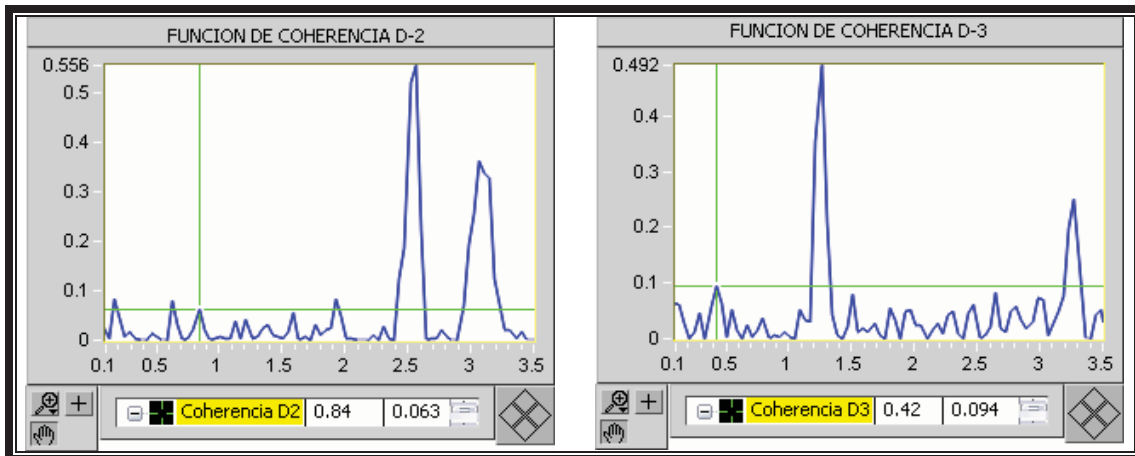
No obstante a pesar de que no todos los registros ofrecieron una calidad favorable, al momento de realizar la correlación entre estos mediante el instrumento virtual, se observa que las coherencias en el mejor de los casos se encuentran entre el 30 a 80 %, tabla 4.7, lo cual puede atribuirse a fuentes importantes de ruido. Sin embargo, aunque estos valores son relativamente bajos, fig. 4.8 y 4.9, son los más importantes en el rango de frecuencias que corresponde al comportamiento estimado para la estructura.



a) Funciones de coherencia representativos para los pisos 11 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes

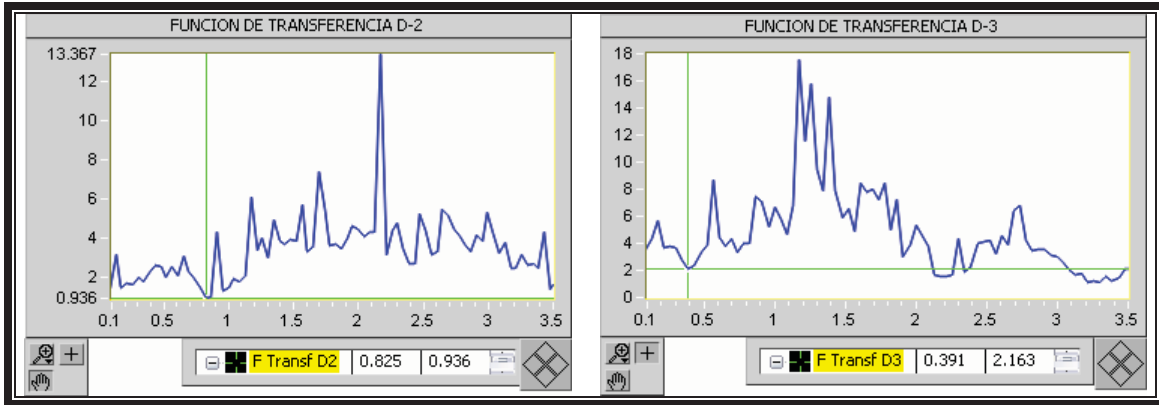


b) Funciones de coherencia representativos para los pisos 7 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes

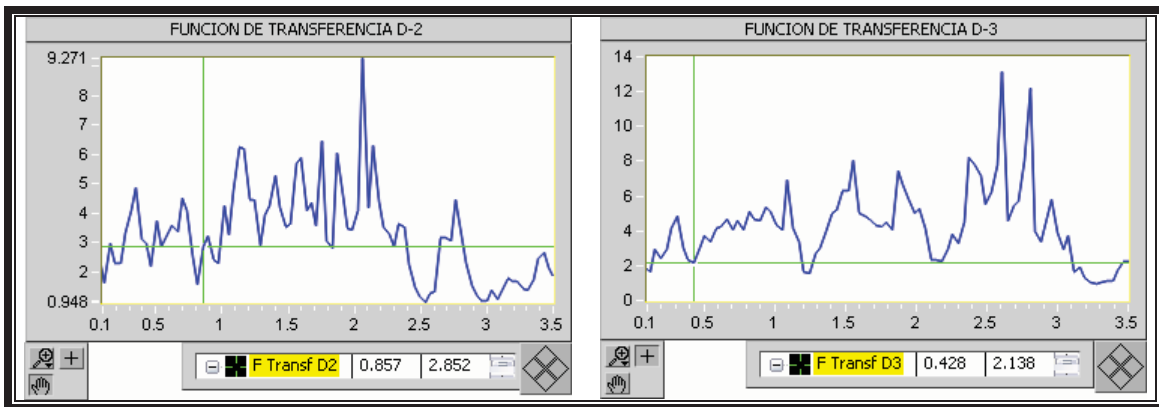


c) Funciones de coherencia representativos para los pisos 3 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes

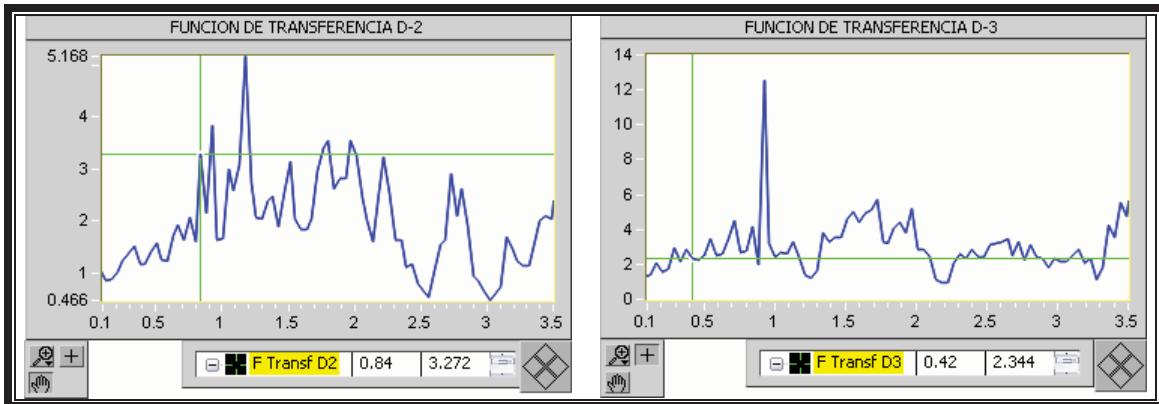
Figura 4.8. Espectros de Fourier representativos



a) Espectros de Fourier representativos para los pisos 11 y 16  
Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes



b) Espectros de Fourier representativos para los pisos 7 y 16  
Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes



c) Espectros de Fourier representativos para los pisos 3 y 16  
Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes

Figura 4.9. Funciones de transferencia asociados a las figuras anteriores

Tomando como base los valores de frecuencias predominantes observados tanto en amplitud como en la función de coherencia, se identificaron 2 de ellas asociadas a periodos de la estructura de 1.23 seg. (0.831 Hz) y 2.427 seg. (0.412 Hz) en las direcciones (longitudinal) y (transversal) del edificio respectivamente.

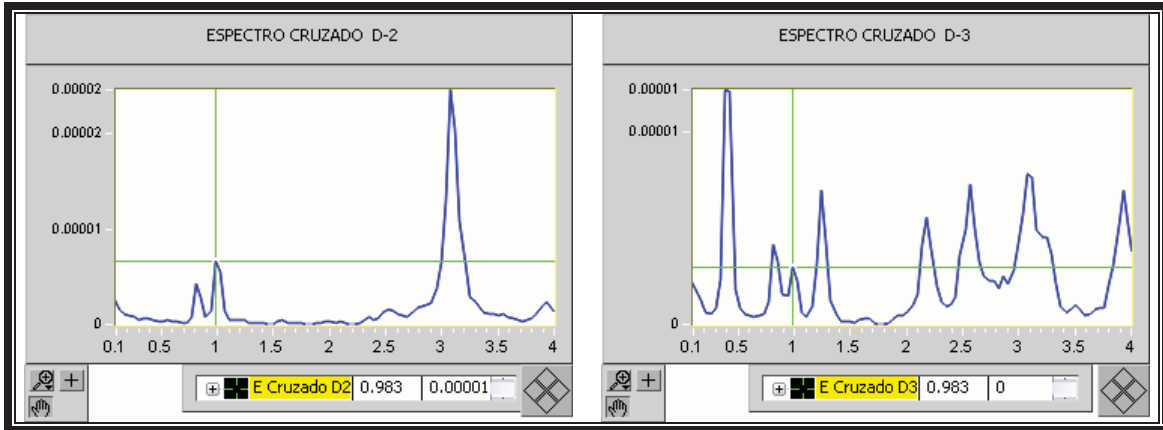
En la tabla 4.7, se presentan los resultados de los parámetros que permitieron determinar las frecuencias propias de vibrar de la estructura.

Tabla 4.7. Parámetros observados al correlacionar las señales.

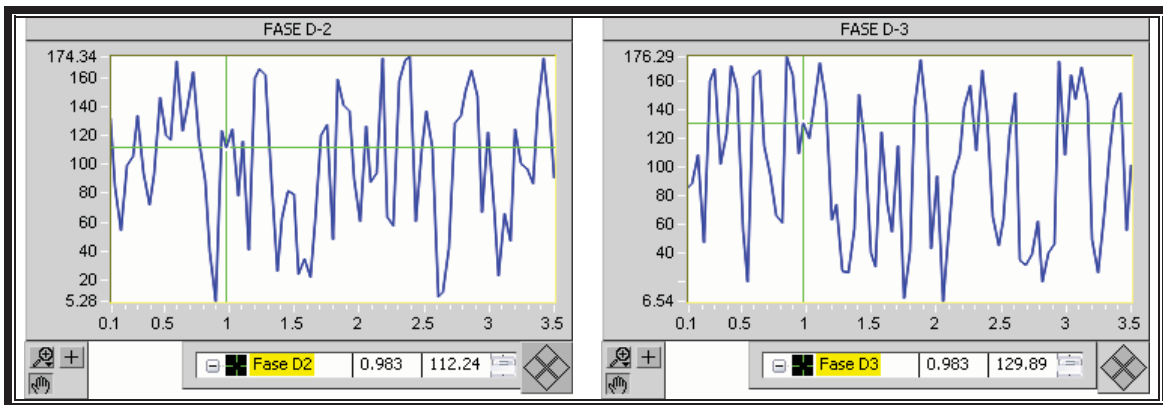
Piso	Registros	Dirección 3 paralela a Insurgentes				Dirección 2 perpendicular a Insurgentes				
		Frecuencia [Hz.]	Coherencia	Fase [°]	Transferencia	Frecuencia [Hz.]	Coherencia	Fase [°]	Transferencia	
16 - 11	SOT27109 - GAM27109	0.418	0.3368	127	1.976	0.836	0.0287	79	0.937	
		1.255	0.0056	70	13.163	0.997	0.327	25	1.219	
		2.188	0.8075	171	1.313	2.574	0.1885	53	3.365	
		2.656	0.1082	140	0.395	3.089	0.135	118	4.36	
		3.282	0.8125	170	0.95	3.957	0.0578	55	0.679	
		4.539	0.0335	126	0.209	3.314	0.1329	123	2.328	
	SOT2710A - GAM2710A	0.391	0.0186	98	1.747	0.847	0.4054	144	0.958	
		1.255	0.0197	114	9.448	1.009	0.0169	101	1.377	
		2.188	0.8097	18	2.699	2.572	0.0112	99	2.508	
		2.686	0.0279	119	0.435	3.126	0.0423	105	2.355	
		3.289	0.1723	63	0.914	3.94	0.0333	116	0.867	
		4.445	0.0066	122	0.613	3.354	0.0765	65	1.824	
	16 - 07	SOT 27203 - GAM27204	0.39	0.3035	136	2.555	0.828	0.000	81	2.186
			1.266	0.2708	129	1.846	1.022	0.001	69	3.355
2.194			0.6873	176	1.8	2.580	0.322	49	1.185	
2.58			0.0282	31	5.458	3.019	0.023	99	0.989	
3.262			0.6912	6	1.027	3.846	0.279	10	2.020	
4.431			0.1181	42	3.95	3.311	0.258	176	1.791	
SOT27204 - GAM27205		0.423	0.2069	134	1.704	0.828	0.005	113	1.701	
		1.269	0.2487	126	1.439	0.987	0.068	51	2.229	
		2.162	0.6221	178	1.764	2.538	0.072	68	0.777	
		2.538	0.0047	127	5.88	3.008	0.056	107	0.810	
		3.29	0.5161	4	0.929	3.854	0.020	13	1.440	
		4.418	0.0458	56	1.233	3.290	0.055	155	1.010	
16 - 03		SOT27207 - GAM27208	0.420	0.253	137	2.344	0.840	0.006	80	3.870
			1.259	0.146	122	1.222	1.008	0.056	22	1.669
	2.183		0.601	7	0.958	2.561	0.347	39	0.541	
	2.771		0.011	64	2.246	3.023	0.054	110	0.462	
	3.274		0.419	36	1.125	3.904	0.022	114	0.993	
	4.408		0.012	165	0.811	3.442	0.000	95	2.021	
	SOT27208 - GAM27209	0.428	0.226	173	0.732	0.808	0.001	86	0.785	
		1.235	0.066	114	0.956	1.140	0.023	113	1.200	
		2.185	0.358	39	1.721	2.518	0.394	28	4.950	
		2.755	0.008	47	0.644	2.993	0.340	136	2.664	
		3.230	0.173	48	1.114	3.895	0.001	84	2.373	
		4.418	0.025	70	2.166	3.468	0.066	17	0.963	

En lo que respecta al modo torsional, se utilizó el par de registros obtenidos en el piso 16 para los equipos ubicados en el centro y en la esquina de la planta. Del análisis de las funciones de fase (cercana a 180°) y de coherencia se concluye que la frecuencia de 0.98 Hz (1.02 seg) corresponde al modo en torsión, *fig.4.10*.

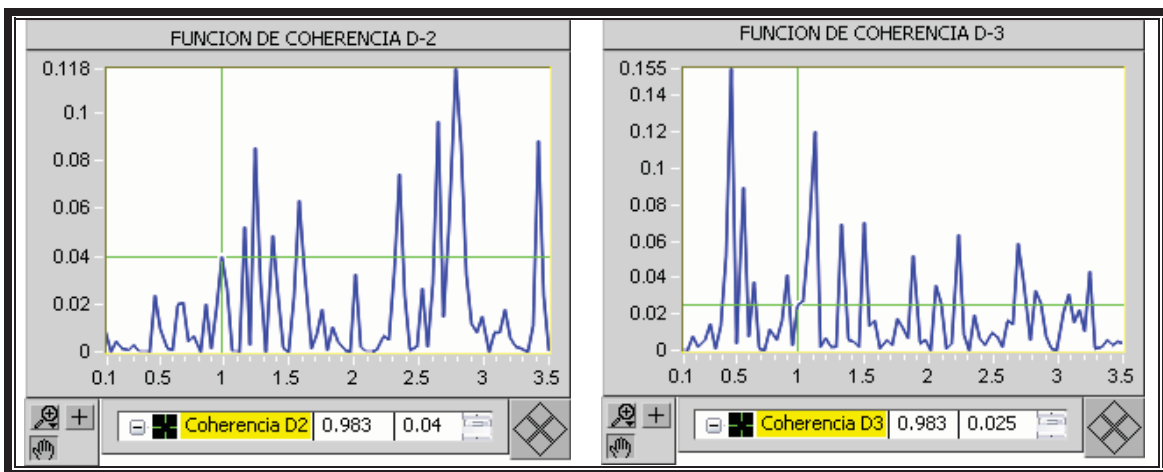




a) Espectros representativos en el piso 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes



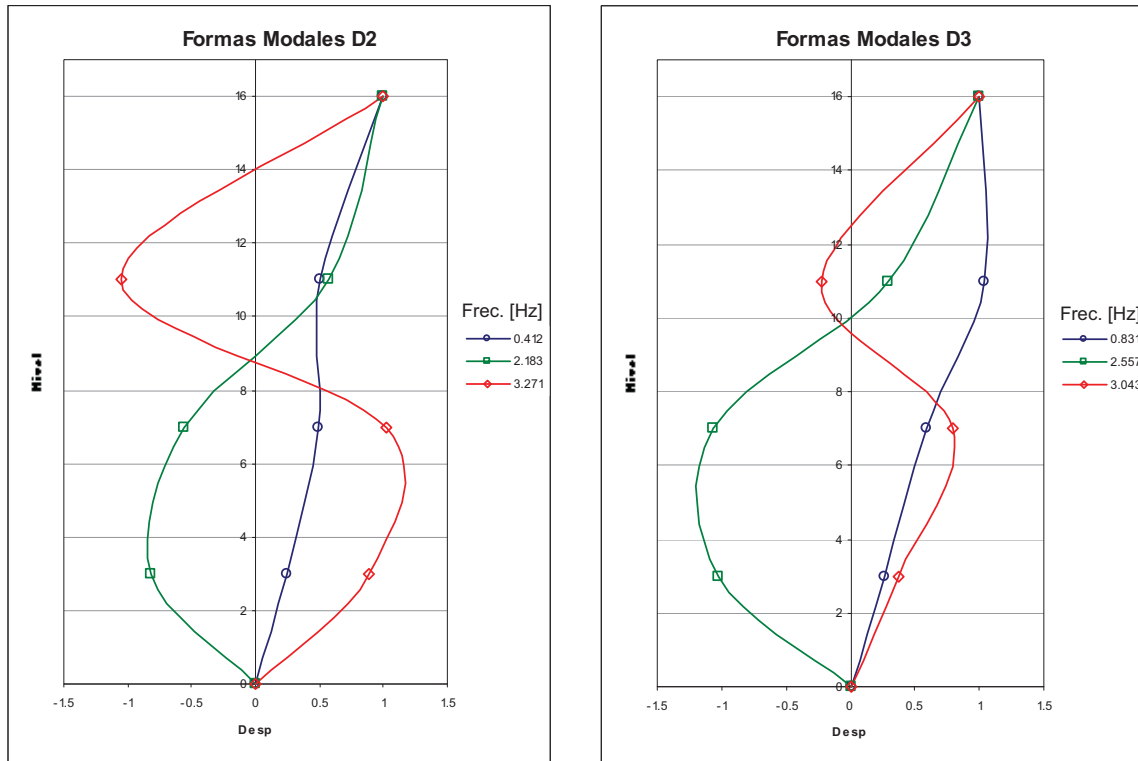
a) Fases correspondientes los registros del piso 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes



a) Funciones de pisos 11 y 16  
 Dirección 2 perpendicular a Insurgentes y Dirección 3 paralela a Insurgentes

Figura 4.10. Parámetros asociados al modo en torsión.

Aunque la instrumentación utilizada consistió en la colocación de solo dos instrumentos, fue posible determinar modos superiores en las direcciones 2 y 3, debido al alto grado de participación de las frecuencias aledañas y empleando criterio ingenieril, fig. 4.11.



a) Dirección perpendicular a Insurgentes

b) Dirección paralela a Insurgentes

Figura 4.11. Formas modales identificadas

En resumen se obtuvieron los siguientes valores de periodos:

- ✦ Dirección perpendicular a insurgentes
  - 2.427 seg. (0.412 Hz) primer modo
  - 0.458 seg. (2.183 Hz) segundo modo
  - 0.306 seg. (3.271 Hz)tercer modo
  
- ✦ Dirección paralela a insurgentes
  - 1.203 seg. (0.831 Hz) primer modo
  - 0.391 seg. (2.557 Hz) segundo modo
  - 0.329 seg. (3.043 Hz) tercer modo
  
- ✦ En torsión
  - 1.02 seg. (0.98 Hz)

En los espectros de Fourier del análisis de registros recabados en este edificio, no se observan frecuencias bien definidas, lo cual suele presentarse cuando existe una importante cantidad de ruido, ocasionado probablemente por las características del sitio donde se encuentra desplantado el edificio.

Comparando los espectros obtenidos de los otros edificios estudiados en este trabajo, es claramente visible la influencia del sitio, ya que el nivel de excitación ocasionada por el ambiente circundante fue sensiblemente bajo, situación que se traduce en la existencia de una amplia gama de frecuencias presentes a lo largo del espectro. Este efecto se observó sobre todo en los puntos de instrumentación ubicados por debajo del 7° nivel, condición que dificultó el análisis de señales ya que la coherencia entre estas fue reducida y la determinación de fases muestra bruscas variaciones que hacen dudosa su interpretación. Con base en lo anterior, se recurrió a utilizar valores promedio para contar con una estimación razonable de los resultados.

Por otra parte, en lo que se refiere al cálculo de amortiguamientos correspondientes al primer modo en traslación para las dos direcciones estudiadas, debido al tipo de estructuración, se observaron algunas variaciones en estos. En la dirección conformada claramente por el sistema de marcos se estima un valor promedio de 5.8 %, valor muy similar al reportado en la literatura, mientras en la dirección afectada por la presencia de muros perimetrales (perpendicular a insurgentes), se tiene un valor promedio ligeramente mayor (del orden de 9.6%). Cabe hacer notar que este último valor es muy similar al estimado en el edificio *Exconasupo* (11%) en la dirección que presenta muros.

### 4.3. EDIFICIO REFORMA 116

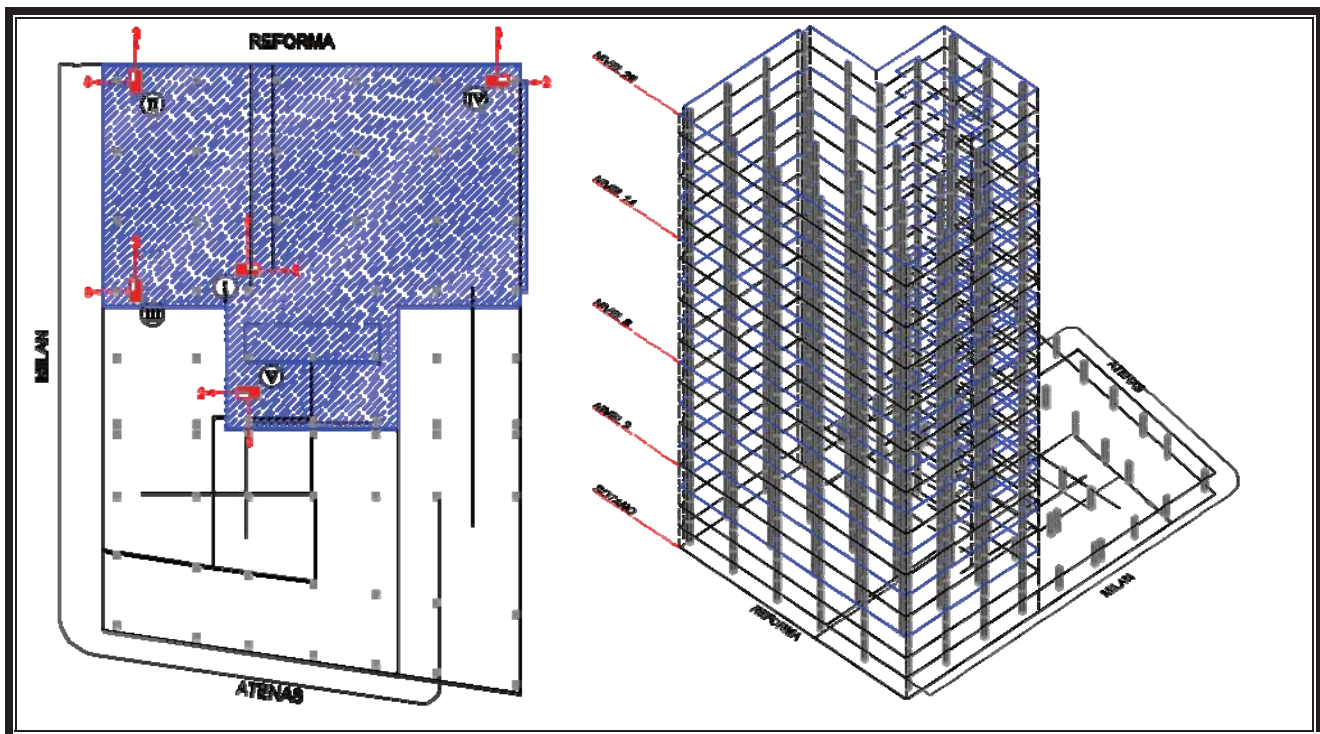
#### 4.3.1. Tipo de instrumentación

Al igual que en el edificio *Insurgentes Sur 1931*, se empleó una instrumentación no permanente basada en el registro de señales derivadas de la vibración ambiental provenientes del interior del edificio y del tráfico en sus alrededores. Se realizaron mediciones con dos equipos cuyas características ya fueron descritas en el edificio anterior. *Fig. 4.12.*



*Figura 4.12. Instrumentación del Edificio Reforma 116*

Para llevar a cabo el registro de señales se seleccionaron puntos de medición distribuidos en el sótano, niveles 3, 8, 14 y 20 colocados estratégicamente en planta sobre dichos niveles, *fig 4.13*, además se incluyeron mediciones de campo libre. De igual que en el edificio anterior se sincronizaron los equipos en los tres tipos de acomodos descritos con anterioridad.



*Figura 4.13. Distribución en planta y elevación de los puntos de medición en el edificio de Reforma 116*

**4.3.2. Datos recabados**

Con el equipo instalado se realizaron 6 campañas de monitoreo, durante las cuales se logró recabar información para un total de 50 pares de registros con sus tres componentes ortogonales. Información que se muestra en la *tabla 4.8. a, b, c, d, e y f.*

*Tabla. 4.8.a. Registros concernientes a la primera campaña de instrumentación*

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	1590E	08-Jun-02	1	Azotea	0.7528	0.428	0.4056	18471	184.71
	GAM	1590U		1	Sótano	0.5545	0.4318	1.5292	18470	184.7
2	SOT	1590F	08-Jun-02	1	Azotea	1.2106	0.5121	0.526	60857	608.57
	GAM	1590V		1	Sótano	0.1754	0.3974	0.1791	60858	608.58
3	SOT	1590G	08-Jun-02	1	Azotea	0.9935	0.5134	0.5081	64954	649.54
	GAM	1590W		1	Sótano	0.2259	0.7645	0.1999	64961	649.61
4	SOT	1590H	08-Jun-02	2	Azotea	2.7059	2.791	0.7653	62255	622.55
	GAM	1590X		1	Sótano	0.2584	0.2988	0.1478	62261	622.61
5	SOT	1590I	08-Jun-02	2	Azotea	1.1423	1.4492	0.4336	1902	19.02
	GAM	1590Y		1	Sótano	0.1013	0.3078	0.1066	1896	18.96
6	SOT	1590J	08-Jun-02	2	Azotea	1.8631	3.0315	0.8633	61607	616.07
	GAM	1590Z		1	Sótano	0.2352	0.3851	0.1728	61621	616.21
7	SOT	1590K	08-Jun-02	3	Azotea	2.5129	2.5621	0.6338	2602	26.02
	GAM	15910		1	Sótano	0.0929	0.294	0.0759	2609	26.09
8	SOT	1590L	08-Jun-02	3	Azotea	9.5204	8.9486	0.818	60758	607.58
	GAM	15911		1	Sótano	1.4924	2.6384	0.4697	60771	607.71
9	SOT	1590M	08-Jun-02	3	Azotea	3.6373	3.4256	0.8308	60925	609.25
	GAM	15912		1	Sótano	0.1553	0.2893	0.1923	60924	609.24
10	SOT	1590U	08-Jun-02	4	Azotea	3.2271	0.7625	2.7237	61605	616.05
	GAM	15916		1	Sótano	0.2345	0.3751	0.1781	61607	616.07
11	SOT	1590V	08-Jun-02	5	Azotea	0.9173	1.8424	1.2032	59943	599.43
	GAM	15917		1	Sótano	0.2379	0.7645	0.2412	59957	599.57

*Tabla. 4.8.b. Registros concernientes a la segunda campaña de instrumentación*

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	16605	15-Jun-02	1	Azotea	0.8861	0.4421	0.4908	61103	611.03
	GAM	16603		1	Sótano	0.1924	0.1849	0.2632	61118	611.18
2	SOT	1660O	15-Jun-02	1	Azotea	1.4512	0.5419	0.7305	62625	626.25
	GAM	1660Q		4	Azotea	3.7642	0.8232	1.695	62634	626.34
3	SOT	1660P	15-Jun-02	1	Azotea	1.0262	0.4707	0.7599	67013	670.13
	GAM	1660R		4	Azotea	1.4667	0.726	1.1889	67014	670.14
4	SOT	16611	15-Jun-02	1	Azotea	0.9427	0.4739	0.9391	61887	618.87
	GAM	16614		2	Azotea	2.1826	2.6838	6.2331	61881	618.81
5	SOT	16612	15-Jun-02	1	Azotea	0.9275	0.4711	0.5881	60424	604.24
	GAM	16615		2	Azotea	1.1023	0.7587	0.848	60432	604.32
6	SOT	16613	15-Jun-02	1	Azotea	0.8675	0.4259	0.5076	30524	305.24
	GAM	16616		2	Azotea	1.876	0.8753	2.7207	30509	305.09
7	SOT	1661U	15-Jun-02	4	14	1.3993	0.732	1.245	62265	622.65
	GAM	1661V		1	14	0.9506	1.1785	1.1134	62294	622.94
8	SOT	1661V	15-Jun-02	4	14	1.3859	1.4358	1.5677	85052	850.52
	GAM	1661W		1	14	2.1439	2.6594	2.7905	85086	850.86
9	SOT	16629	15-Jun-02	4	Sótano	0.4982	0.6135	0.884	64953	649.53
	GAM	16628		1	Sótano	0.185	0.1577	0.1684	64968	649.68
10	SOT	1662A	15-Jun-02	4	Sótano	0.7322	1.3214	0.2444	58556	585.56
	GAM	16629		1	Sótano	1.5441	2.8694	2.1567	58538	585.38

Tabla. 4.8.c. Registros concernientes a la tercera campaña de instrumentación

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	16902	18-Jun-02	1	Azotea	3.4413	3.0128	1.7664	61471	614.71
	GAM	16902		2	Sótano	0.2683	0.631	0.5898	61477	614.77
2	SOT	16903	18-Jun-02	1	Azotea	3.5906	3.1197	1.6469	65146	651.46
	GAM	16903		2	Sótano	0.2705	1.3147	0.2241	65157	651.57
3	SOT	16904	18-Jun-02	1	Azotea	3.4711	3.2365	1.7389	65863	658.63
	GAM	16904		2	Sótano	0.2429	0.3979	0.2258	65906	659.06
4	SOT	16905	18-Jun-02	1	Azotea	3.4412	3.1338	1.7709	58995	589.95
	GAM	16905		2	Sótano	0.2377	0.2281	0.1714	59007	590.07

Tabla. 4.8.d. Registros concernientes a la cuarta campaña de instrumentación

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	17317	22-Jun-02	1	Azotea	24.8166	3.4472	12.7139	64095	640.95
	GAM	1730N		1	3	1.3945	0.769	0.8488	64108	641.08
2	SOT	17318	22-Jun-02	1	Azotea	33.9038	4.8967	16.9713	62866	628.66
	GAM	1730O		1	3	0.4901	0.4601	0.4388	62907	629.07
3	SOT	17319	22-Jun-02	1	Azotea	1.0904	0.6978	0.5123	63595	635.95
	GAM	1730P		1	3	0.5066	0.1892	0.3748	63607	636.07
5	SOT	1731C	22-Jun-02	1	Azotea	1.2055	0.4969	0.7402	33005	330.05
	GAM	1730S		1	8	0.8365	1.7186	1.3127	33007	330.07
6	SOT	1731E	22-Jun-02	1	Azotea	1.0895	0.6174	0.8622	59870	598.7
	GAM	1730U		1	8	0.5473	0.9703	0.8302	59870	598.7
7	SOT	1731F	22-Jun-02	1	Azotea	1.3838	0.7636	0.7048	61929	619.29
	GAM	1730V		1	8	0.7216	0.4695	0.5294	61930	619.3
8	SOT	1731G	22-Jun-02	1	Azotea	20.2561	7.7495	9.4935	63059	630.59
	GAM	1730W		1	8	0.7998	1.3922	0.6616	63059	630.59
9	SOT	1731R	22-Jun-02	2	8	0.4531	0.6971	0.6375	62637	626.37
	GAM	17313		1	8	0.4665	0.9674	0.5218	62635	626.35
10	SOT	1731S	22-Jun-02	2	8	0.5451	0.5893	0.618	61108	611.08
	GAM	17314		1	8	0.6941	1.1083	0.6266	61111	611.11
11	SOT	1731T	22-Jun-02	2	8	8.3091	3.8463	3.8014	61239	612.39
	GAM	17315		1	8	0.7145	0.791	0.7669	61243	612.43
12	SOT	1731Y	22-Jun-02	1	Azotea	0.9236	0.4456	0.4497	64269	642.69
	GAM	1731B		1	14	0.377	0.2003	0.5947	64307	643.07
13	SOT	1731Z	22-Jun-02	1	Azotea	1.1404	0.4468	0.5527	66175	661.75
	GAM	1731C		1	14	0.7983	0.5467	0.8499	66180	661.8
14	SOT	17320	22-Jun-02	1	Azotea	8.0919	1.4416	4.0964	25292	252.92
	GAM	1731D		1	14	0.3591	0.3817	0.6329	25296	252.96

Tabla. 4.8.e. Registros concernientes a la quinta campaña de instrumentación

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	18007	29-Jun-02	2	Sótano	0.3762	0.2578	0.5692	71034	710.34
	GAM	18001		1	Calle	2.6838	1.111	1.8499	71032	710.32
2	SOT	1800B	29-Jun-02	2	Sótano	0.2776	0.194	0.3379	62366	623.66
	GAM	18005		1	Calle	1.5087	1.4528	1.2641	62398	623.98

Tabla. 4.8.f. Registros concernientes a la sexta campaña de instrumentación

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	20003	19-Jul-02	1E	Sótano	0.4509	0.5196	0.4621	60041	600.41
	GAM	20002		1E	3	3.1122	4.4861	1.5051	60875	608.75
2	SOT	20004	19-Jul-02	1E	Sótano	0.5271	0.5056	0.5413	60041	600.41
	GAM	20003		1E	3	3.6974	6.1344	1.6089	60788	607.88
3	SOT	20005	19-Jul-02	1E	Sótano	0.4119	0.4738	0.4608	60041	600.41
	GAM	20004		1E	3	2.6251	3.1404	1.2194	60788	607.88
4	SOT	20000	19-Jul-02	1E	Sótano	0.4645	0.4036	0.4518	60041	600.41
	GAM	20001		1E	3	2.1367	1.91	0.691	61428	614.28
5	SOT	20007	19-Jul-02	1E	3	3.6635	0.6394	0.7525	30030	300.3
	GAM	20006		2E	3	2.6538	5.7739	4.3238	30307	303.07
6	SOT	20008	19-Jul-02	1E	3	2.8677	0.8047	0.7485	30030	300.3
	GAM	20007		2E	3	1.9526	3.9537	4.2411	30628	306.28
7	SOT	20009	19-Jul-02	1E	3	3.1778	1.1489	0.9369	30030	300.3
	GAM	20008		2E	3	2.0085	4.4489	5.8848	30628	306.28
8	SOT	2000A	19-Jul-02	1E	3	2.1942	1.1221	1.1057	30030	300.3
	GAM	20009		2E	3	1.8785	6.6292	4.6055	30713	307.13
9	SOT	2000B	19-Jul-02	1E	3	3.2848	1.093	0.7331	30030	300.3
	GAM	2000A		2E	3	1.9168	6.0807	5.5878	30564	305.64
10	SOT	2000C	19-Jul-02	1E	3	2.9477	0.5136	0.7327	30030	300.3
	GAM	2000B		2E	3	1.6638	2.3289	2.4997	30457	304.57

### 4.3.3. Propiedades dinámicas

Del análisis de las señales correspondientes a la instrumentación realizada entre la azotea y el nivel de sótano, se obtuvo un alto nivel de ruido (baja coherencia), que impidió resaltar alguna frecuencia en particular, sin embargo, del análisis de las señales para los niveles superiores se lograron coherencias por encima del 90 %, facilitando la identificación de las frecuencias, fig. 4.14.

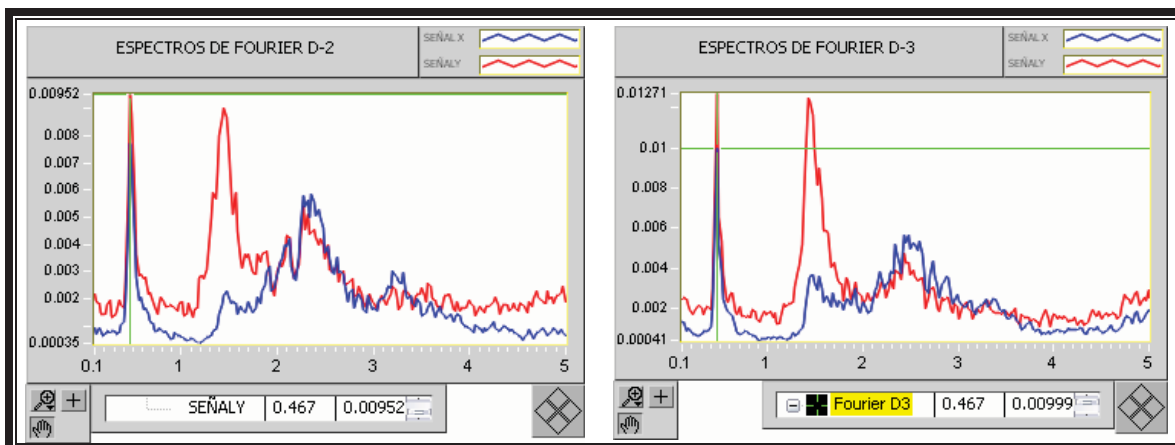


Figura 4.14. a) Espectros de Fourier representativos correspondientes a los registros GAM 1731B y SOT1731Y

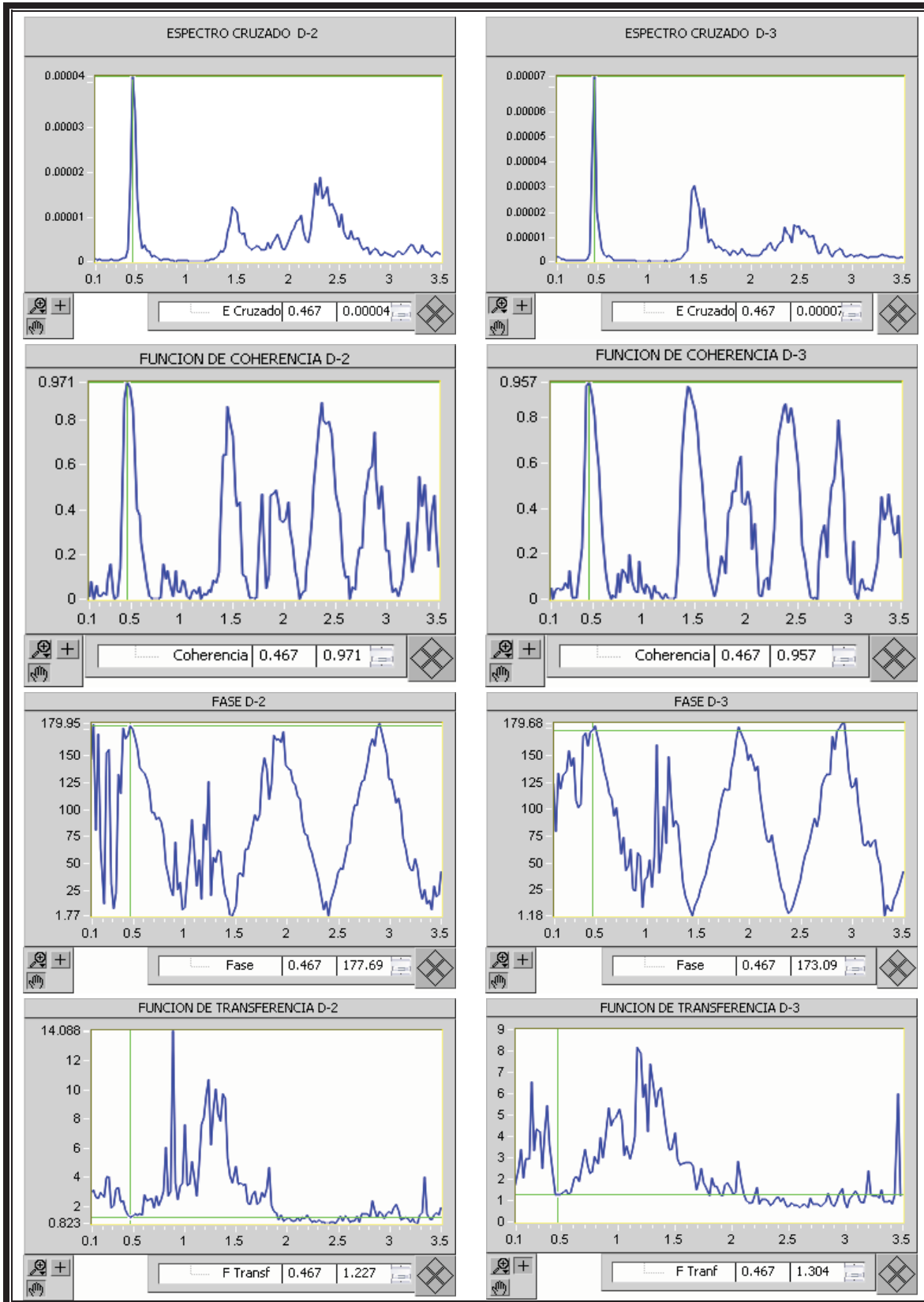


Figura 4.14. b) Coherencia, Fase y transferencia representativos correspondientes a los registros GAM 1731B y SOT1731Y



En la tabla 4.9 se presentan, para ambas direcciones, los resultados del análisis de 4 frecuencias consideradas como las de mayor participación. Es importante destacar que los valores reflejados en ambas direcciones son muy similares entre sí, a pesar de que la estructura del edificio posee un núcleo que aloja ascensores y escaleras, que provoca cierta excentricidad y acoplamiento en sus movimientos traslacionales y rotacionales, lo cual, se ve reflejado en las frecuencias observadas, *tabla 4.9*.

Tabla 4.9. Parámetros obtenidos tras el análisis de los registros más representativos.

Nivel	Registros	Direccion 2:				Direccion 3:			
		Frecuencia [Hz]	Coherencia	Fase [°]	Transferencia	Frecuencia [Hz]	Coherencia	Fase [°]	Transferencia
Azotea - Nivel 14	GAM 1731B VS SOT 1731Y	0.467	0.971	177.690	1.227	0.467	0.957	173.090	1.304
		1.447	0.862	1.830	4.081	1.447	0.934	1.180	3.373
		1.890	0.471	164.630	1.535	1.914	0.591	1.215	1.215
		2.381	0.804	15.140	0.823	2.427	0.846	11.340	0.957
	GAM 1731C VS SOT 1731Z	0.437	0.879	179.32	6.4	0.477	0.86	177.62	10.794
		1.392	0.927	0.770	2.039	1.432	0.853	17.940	2.705
		1.988	0.489	38.680	1.571	1.909	0.521	5.410	1.793
		2.346	0.925	176.510	0.921	2.346	0.841	177.540	0.880
Azotea - Nivel 8	GAM 1730V VS SOT 1731F	0.460	0.965	1.750	2.259	0.460	0.974	0.300	2.612
		1.405	0.969	175.68	0.904	1.429	0.989	176.51	0.916
		1.841	0.808	177.830	2.496	2.010	0.589	156.550	2.451
		2.398	0.860	15.380	2.531	2.519	0.935	9.070	1.340
	GAM 1730S VS SOT 1731C	0.454	0.923	0.510	2.303	0.454	0.948	0.440	2.637
		1.439	0.931	167.070	0.986	1.439	0.951	167.450	0.908
		2.121	0.505	174.48	10.095	2.045	0.611	174.02	3.569
		2.424	0.500	40.520	2.857	2.424	0.730	22.830	1.901
Azotea - Nivel 3	GAM 1730P VS SOT 17319	0.448	0.876	179.760	6.882	0.448	0.876	23.270	10.250
		1.392	1.000	10.000	1.897	1.439	0.834	21.390	2.350
		1.840	0.392	16.280	2.522	1.840	0.642	157.800	1.400
		2.312	0.985	177.33	1	2.264	0.755	67.79	1.022
	GAM 1730O VS SOT 17318	0.491	0.953	179.460	1417.249	0.453	0.956	172.210	1324.708
		1.436	0.806	18.070	6498.239	1.473	0.930	6.480	3513.500
		2.002	0.583	147.240	1251.909	1.927	0.635	178.670	1684.654
		2.380	0.922	8.760	890.471	2.418	0.934	1.720	691.840

De las cuatro frecuencias presentadas en la tabla anterior, se observó que la que se localiza dentro del rango de 1.84 hz a 2 hz, no se puede asociar a alguno de los modos en traslación debido al valor de su fase, por lo cual, apoyándose en los registros de azotea (segunda campaña) se concluye que se trata del modo en torsión, ya que a pesar de la baja coherencia se mantienen en fases próximas a los 180°, tanto a nivel de azotea como en niveles intermedios, *fig. 4.15*.

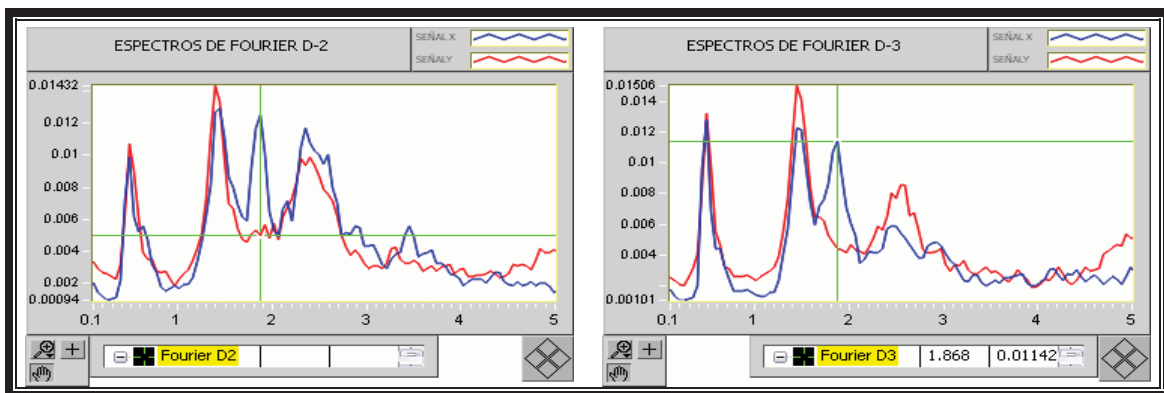


Figura 4.15. a) Espectros de Fourier para la identificación de frecuencias en torsión

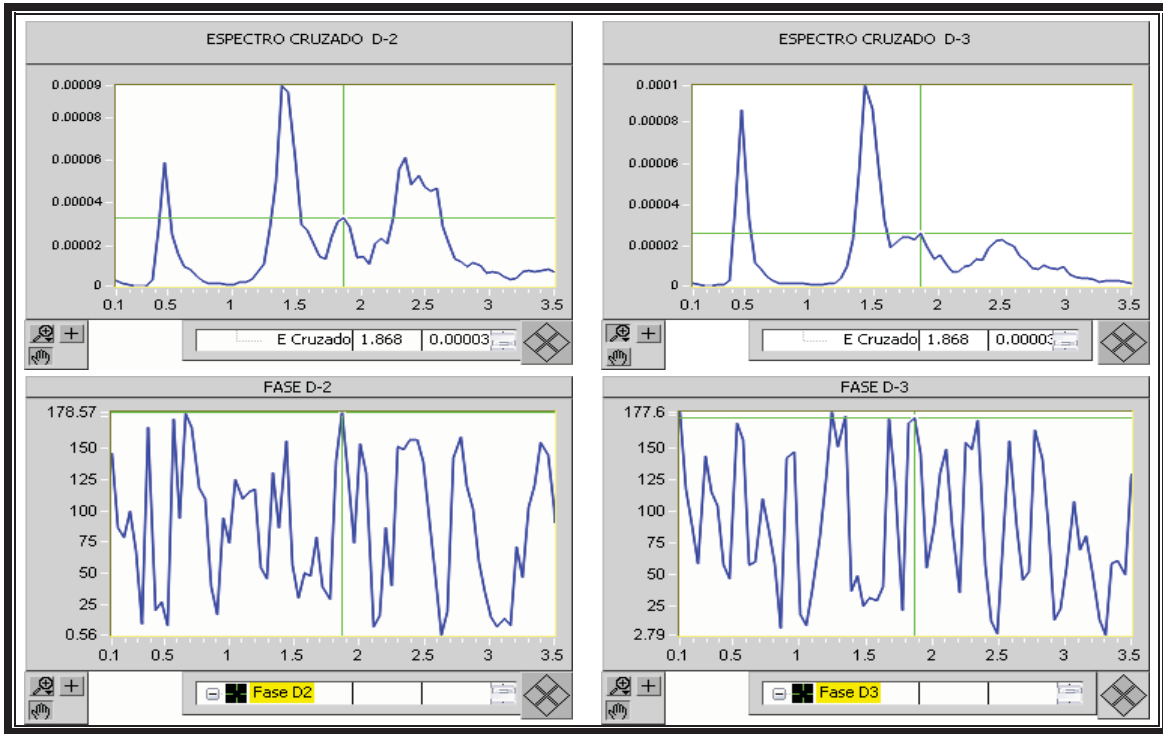


Figura 4.15. b) Espectro cruzado y fase para la detección de la frecuencia en torsión

Finalmente, con base en las amplitudes de la función de transferencia se pueden graficar las formas modales asociadas a las frecuencias identificadas, *fig. 4.16*. De estas se nota la gran similitud entre los tres modos de vibración identificados por dirección, lo que indica un comportamiento acoplado entre las direcciones principales del edificio, aun en modos superiores.

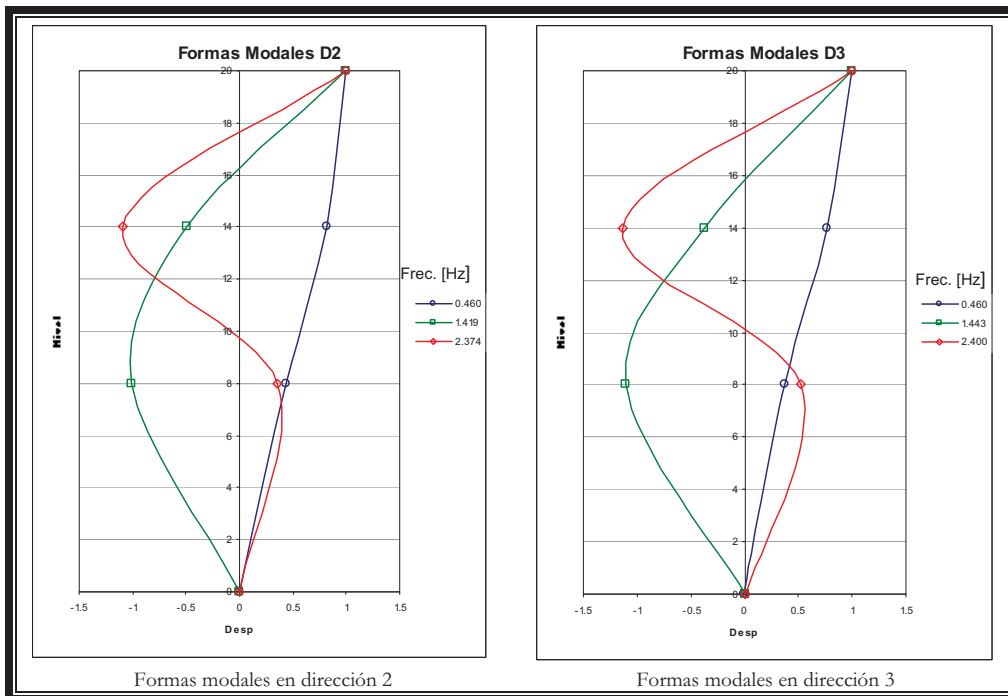


Figura 4.16. Formas modales asociadas a las frecuencias identificadas en ambas direcciones

En resumen se tiene:

- ✦ Dirección paralela a Reforma (dirección 2)
  - 2.174 seg. (0.460 Hz) primer modo
  - 0.705 seg. (1.419 Hz) segundo modo
  - 0.420 seg. (2.379 Hz) tercer modo
  
- ✦ Dirección perpendicular a Reforma (dirección 3)
  - 2.174 seg. (0.460 Hz) primer modo
  - 0.693 seg. (1.443 Hz) segundo modo
  - 0.417 seg. (2.400 Hz) tercer modo
  
- ✦ En torsión
  - 0.514 seg. (1.944 Hz)

En este caso de estudio, los resultados hacen evidente que se trata de una estructura más flexible tanto por su ubicación como el tipo de materiales con los que fue construida. Esta característica fue fundamental para que los registros recabados durante el estudio de vibración ambiental fueran de buena calidad. Sin embargo, se puede observar que la presencia de ruido puede distorsionar ligeramente los espectros, aun que para este caso no se sacrifica información valiosa. Al obtener las funciones de correlación, se alcanzan coherencias entre el 97% y 87 % para la primera forma modal, lo que indica que las frecuencias identificadas corresponden a las del sistema estructural.

Para el caso de los amortiguamientos, al igual que en los valores obtenidos de las formas modales, existe cierta similitud entre ambas direcciones, manteniéndose en promedio el 9.0 % de amortiguamiento en la dirección paralela a la Av. Reforma, mientras en la dirección perpendicular se observa un 8.2 %. Nuevamente los valores sobrepasan a los esperados para una estructura formada casi en su totalidad por marcos de acero, mas esto puede deberse al efecto que produce la interacción con el núcleo de elevadores y elementos no estructurales que, a pesar de abarcar un área relativamente pequeña (de muros en su mayoría divisorios) pueden contribuir a este incremento.

**4.4. EDIFICIO REFORMA 51**

**4.4.1. Tipo de instrumentación**

Con base en las características y distribución de elementos estructurales del edificio, se seleccionaron diversos puntos de medición, en la planta y elevación, para realizar el estudio de vibración ambiental, afín de determinar las propiedades dinámicas del inmueble. En la *fig.4.17 a, b y c*, se presenta la planta tipo del edificio y diversos puntos seleccionados para ubicar los instrumentos de medición, incluyendo aquellos seleccionados para medir los movimientos torsionales, sobre la azotea. Así mismo, en la *fig. 4.18*, se muestran esquemáticamente los niveles instrumentados, obedeciendo la metodología seguida en los edificios anteriores.

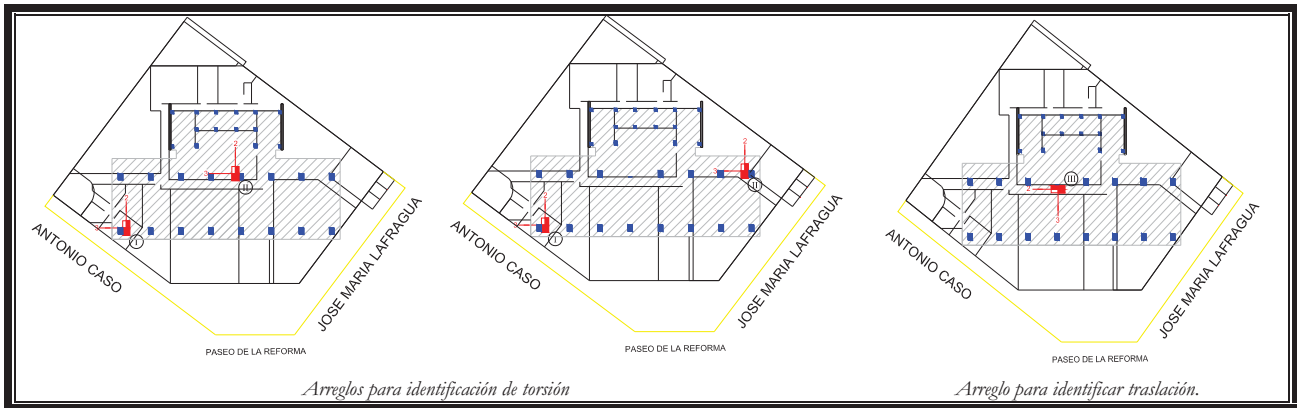


Figura 4.17.a. Puntos de instrumentación tomados para la campaña del 20 de julio de 2002.

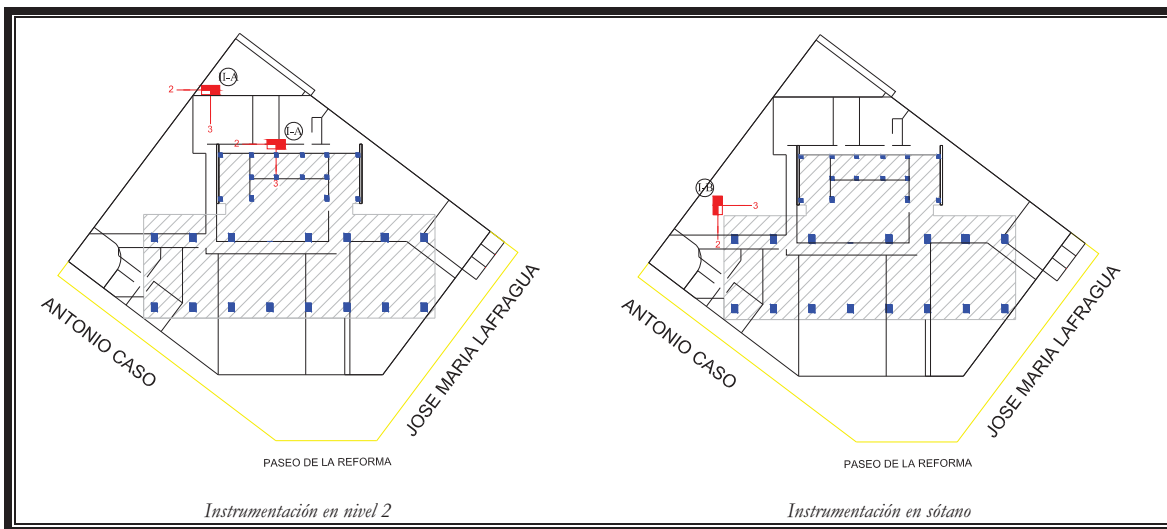
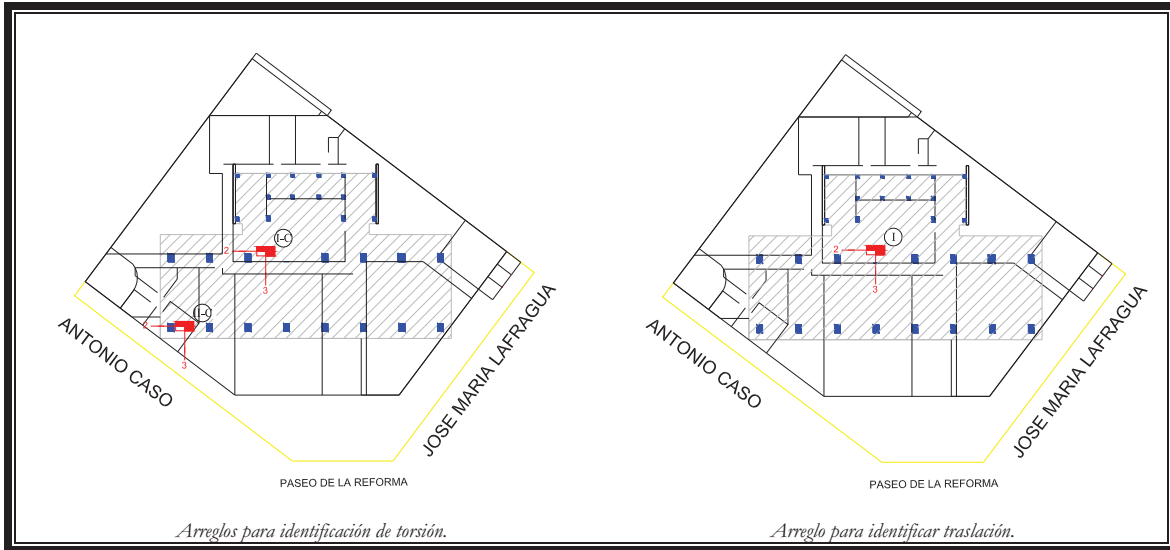


Figura 4.17.b. Puntos de instrumentación tomados para la campaña del 27 de julio de 2002.



Arreglos para identificación de torsión.

Arreglo para identificar traslación.

Figura 4.17.c. Puntos de instrumentación tomados para la campaña del 8 de agosto de 2002.

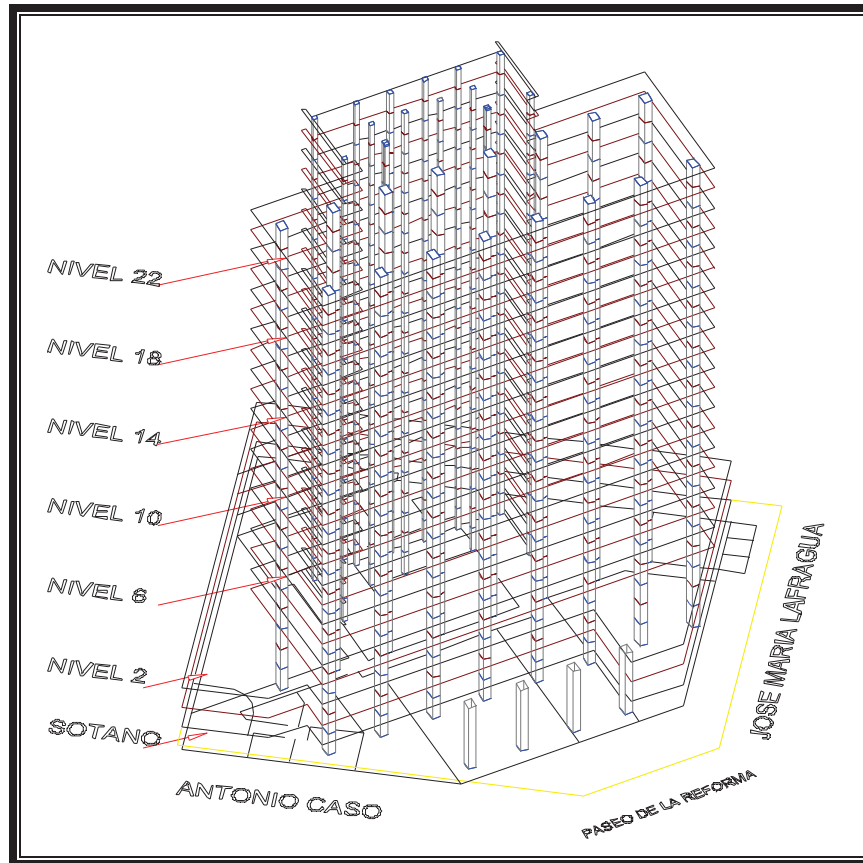


Figura 4.18. Localización representativa de los diferentes niveles instrumentados.

#### 4.4.2. Datos recabados

En este edificio se llevaron a cabo tres campañas de mediciones en días y horas diferentes, de las cuales se obtuvo la siguiente información presentada en la *tabla 4.10*.

Tabla 4.10. Registros de vibración ambiental tomados en el edificio Reforma 51.

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	20103	20-Jul-02	1	22	3.0752	2.4172	0.5661	60041	600.41
	GAM	20105		2	22	2.5998	1.5339	0.8258	60618	606.18
2	SOT	20104	20-Jul-02	1	22	5.8982	3.2638	0.6798	60041	600.41
	GAM	20106		2	22	1.7322	1.2169	0.5534	60638	606.38
3	SOT	20105	20-Jul-02	1	22	6.7746	3.0223	1.1562	60041	600.41
	GAM	20107		2	22	1.9141	2.9767	1.2819	60876	608.76
4	SOT	20107	20-Jul-02	1	22	4.2296	1.6699	0.5518	60041	600.41
	GAM	2010B		2	22	0.9778	1.0698	0.5124	60638	606.38
5	SOT	20108	20-Jul-02	1	22	4.1426	1.7314	0.6884	60041	600.41
	GAM	2010C		2	22	1.0539	0.9414	0.6073	60638	606.38
6	SOT	20109	20-Jul-02	1	22	2.5509	1.2391	0.6475	60041	600.41
	GAM	2010D		2	22	1.6583	1.1409	0.7013	60618	606.18
7	SOT	2010D	20-Jul-02	3	22	1.9452	1.1973	1.2428	60041	600.41
	GAM	2010H		3	18	1.3788	0.6939	0.9249	60467	604.67
8	SOT	2010E	20-Jul-02	3	22	0.6794	0.2668	0.2665	60041	600.41
	GAM	2010I		3	18	0.4225	0.2178	0.3574	60447	604.47
9	SOT	2010F	20-Jul-02	3	22	0.6723	0.4615	0.3477	60041	600.41
	GAM	2010J		3	18	0.4866	0.2518	0.4682	60447	604.47
10	SOT	2010G	20-Jul-02	3	22	0.5422	0.2695	0.2575	60041	600.41
	GAM	2010L		3	14	0.4928	0.2067	0.5272	60468	604.68
11	SOT	2010H	20-Jul-02	3	22	2.6101	1.3667	1.0823	60041	600.41
	GAM	2010M		3	14	1.2219	0.2722	0.5002	60446	604.46
12	SOT	2010I	20-Jul-02	3	22	1.2638	1.4834	0.709	60041	600.41
	GAM	2010N		3	14	0.7199	0.263	0.5344	60467	604.67
13	SOT	2010J	20-Jul-02	3	22	2.3437	1.9541	0.7494	60041	600.41
	GAM	2010P		3	10	1.278	0.5163	0.7791	60531	605.31
14	SOT	2010K	20-Jul-02	3	22	0.8327	0.3501	0.3468	60040	600.4
	GAM	2010Q		3	10	1.4278	1.164	1.5252	60467	604.67
15	SOT	2010L	20-Jul-02	3	22	0.9886	0.7229	0.3416	60041	600.41
	GAM	2010R		3	10	1.1007	0.852	1.182	60468	604.68

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	20803	27-Jul-02	3	22	0.735	0.406	0.3867	60041	600.41
	GAM	20801		3	6	1.8955	1.6576	3.4093	60532	605.32
2	SOT	20804	27-Jul-02	3	22	0.6009	0.3542	0.3494	60041	600.41
	GAM	20802		3	6	2.0454	2.5476	2.3182	60468	604.68
3	SOT	20805	27-Jul-02	3	22	1.971	0.8573	0.8697	60041	600.41
	GAM	20803		3	6	2.7935	3.3357	4.3048	61428	614.28
4	SOT	20809	27-Jul-02	3	22	0.5862	0.5188	0.3198	60041	600.41
	GAM	20807		3	2	1.7895	0.9662	2.7597	60467	604.67
5	SOT	2080A	27-Jul-02	3	22	0.905	0.4121	0.4373	60041	600.41
	GAM	20808		3	2	1.3326	3.0568	1.9872	60468	604.68
6	SOT	2080B	27-Jul-02	3	22	0.4629	0.2868	0.3262	60041	600.41
	GAM	20809		3	2	4.3791	2.1001	6.4621	60532	605.32
7	SOT	2080C	27-Jul-02	3	22	0.6162	1.1425	0.5971	60041	600.41
	GAM	2080B		3	Sótano	27.4116	13.4079	33.2455	60468	604.68
8	SOT	2080D	27-Jul-02	3	22	0.8441	0.3133	0.3091	60041	600.41
	GAM	2080C		3	Sótano	1.0978	0.9853	1.312	60467	604.67
9	SOT	2080E	27-Jul-02	3	22	0.7292	1.0422	0.5561	60041	600.41
	GAM	2080D		3	Sótano	0.3464	0.1289	0.4292	60467	604.67

Par	Acelerograma			Ubicación		Aceleración máxima [gal]			Numero de muestras	Duración del registro [s]
	Registro	Numero	Fecha	PUNTO	NIVEL	Dir 1	Dir 2	Dir 3		
1	SOT	22003	08-Ago-02	1-A	3	3.5887	0.5779	0.942	62923	629.23
	GAM	22004		2-A	3	3.576	2.4592	2.1458	62922	629.22
2	SOT	22004	08-Ago-02	1-A	3	4.8876	0.5543	1.1569	63390	633.9
	GAM	22005		2-A	3	1.9777	1.4989	1.6673	63386	633.86
3	SOT	22008	08-Ago-02	1-B	Sótano	0.4502	0.5604	0.5876	62470	624.7
	GAM	22002		1-B	3	4.404	2.2744	0.9697	62472	624.72
4	SOT	22009	08-Ago-02	1-B	Sótano	0.4947	0.4652	0.5545	62247	622.47
	GAM	22003		1-B	3	2.9167	2.2412	0.8448	62284	622.84
5	SOT	2200H	08-Ago-02	1-C	22	0.8214	0.5137	0.3734	61842	618.42
	GAM	22008		2-C	22	0.7784	0.8376	1.3331	61848	618.48
6	SOT	2200I	08-Ago-02	1-C	22	0.7005	0.3112	0.3818	61586	615.86
	GAM	22009		2-C	22	1.4932	0.9895	0.9476	61594	615.94
7	SOT	2200M	08-Ago-02	1	22	2.0934	0.789	0.9055	55151	551.51
	GAM	2200C		1	18	1.6359	0.8897	1.5258	55162	551.62
8	SOT	2200N	08-Ago-02	1	22	0.7057	0.5548	0.3324	61542	615.42
	GAM	2200D		1	18	0.9819	0.3501	0.7607	61543	615.43
9	SOT	2200P	08-Ago-02	1	22	0.7936	0.9047	0.4438	61434	614.34
	GAM	2200G		1	14	1.2121	0.5893	1.0193	61441	614.41
10	SOT	2200Q	08-Ago-02	1	22	0.9193	0.4361	0.4357	61490	614.9
	GAM	2200H		1	14	1.1379	0.4797	1.1702	61497	614.97
11	SOT	2200R	08-Ago-02	1	22	1.0254	0.9707	1.1584	61517	615.17
	GAM	2200K		1	10	0.8494	0.8702	0.8008	61557	615.57
12	SOT	2200S	08-Ago-02	1	22	0.6857	0.494	0.4277	62827	628.27
	GAM	2200L		1	10	3.7065	8.8387	2.7695	62832	628.32
13	SOT	2200T	08-Ago-02	1	22	0.926	0.4046	0.4884	61720	617.2
	GAM	2200P		1	6	0.7553	0.3497	0.6626	61720	617.2
14	SOT	2200U	08-Ago-02	1	22	1.0501	0.5299	0.6176	60102	601.02
	GAM	2200Q		1	6	0.6572	0.3465	0.4563	60097	600.97
15	SOT	2200W	08-Ago-02	1	22	0.5554	0.4539	0.5216	61202	612.02
	GAM	2200T		1	Sótano	0.1678	0.1908	0.614	61198	611.98
16	SOT	2200X	08-Ago-02	1	22	1.4106	0.7753	0.7163	60104	601.04
	GAM	2200U		1	Sótano	1.8028	0.2891	2.2721	60107	601.07

#### 4.4.3. Propiedades dinámicas

Para este edificio se procedió de manera similar que en los inmuebles anteriores, empleando el análisis de señales producto de la vibración ambiental. En la *tabla 4.11*, se muestran los resultados de las principales frecuencias identificadas.

Como puede observarse en la *fig. 4.19*, destacan 5 frecuencias por dirección, entre ellas se obtuvieron las frecuencias propias de vibración del edificio concluyéndose que en promedio para la dirección 2 el edificio presenta una frecuencia de 0.366 Hz (2.732 s) mientras en la dirección 3 se reporta una frecuencia de 0.333 Hz (3.003 s). Además se presentan otras dos frecuencias en la dirección 2 y una en la 3. En la *tabla 4.11*, se presenta el análisis de señales para estas frecuencias.

Tabla 4.11. Propiedades promedio recabadas del análisis de señales

Nivel	Dirección 2:				Dirección 3:			
	Frecuencia	Coherencia	Fase	Transferencia	Frecuencia	Coherencia	Fase	Transferencia
Nivel 22 vs Nivel 18	0.366	0.923	2.000	1.639	0.333	0.762	26.000	1.175
	1.166	0.635	26.500	6.952	1.232	0.267	56.000	11.227
	2.032	0.729	13.950	1.677	2.398	0.844	6.000	1.119
Nivel 22 vs Nivel 14	0.366	0.920	166.000	1.472	0.333	0.786	160.000	1.739
	1.166	0.931	170.000	1.573	1.232	0.757	151.000	1.366
	2.032	0.894	8.500	1.109	2.398	0.546	3.000	0.916
Nivel 22 vs Nivel 10	0.366	0.892	110.333	2.003	0.333	0.806	156.000	2.394
	1.166	0.797	20.000	0.937	1.232	0.898	11.500	0.963
	2.032	0.458	37.000	0.804	2.398	0.861	12.000	5.065
Nivel 22 vs Nivel 06	0.366	0.674	161.000	6.160	0.333	0.535	1.180	5.708
	1.166	0.952	176.000	1.275	1.232	0.956	175.000	1.196
	2.032	0.539	9.000	1.423	2.398	0.459	37.500	0.726
Nivel 22 vs Nivel 02	0.366	0.157	35.000	11.010	0.333	0.332	171.000	9.875
	1.166	0.820	176.000	3.679	1.232	0.246	120.000	4.443
	2.032	0.661	2.000	3.034	2.398	0.748	0.000	1.832

Por otra parte, al igual que en los edificios anteriores la información arrojada en los niveles inferiores como son: sótano y nivel 2, presenta un bajo nivel de coherencia, atribuible al ruido, sin embargo, se observan las frecuencias de la estructura que posteriormente se pueden validar.

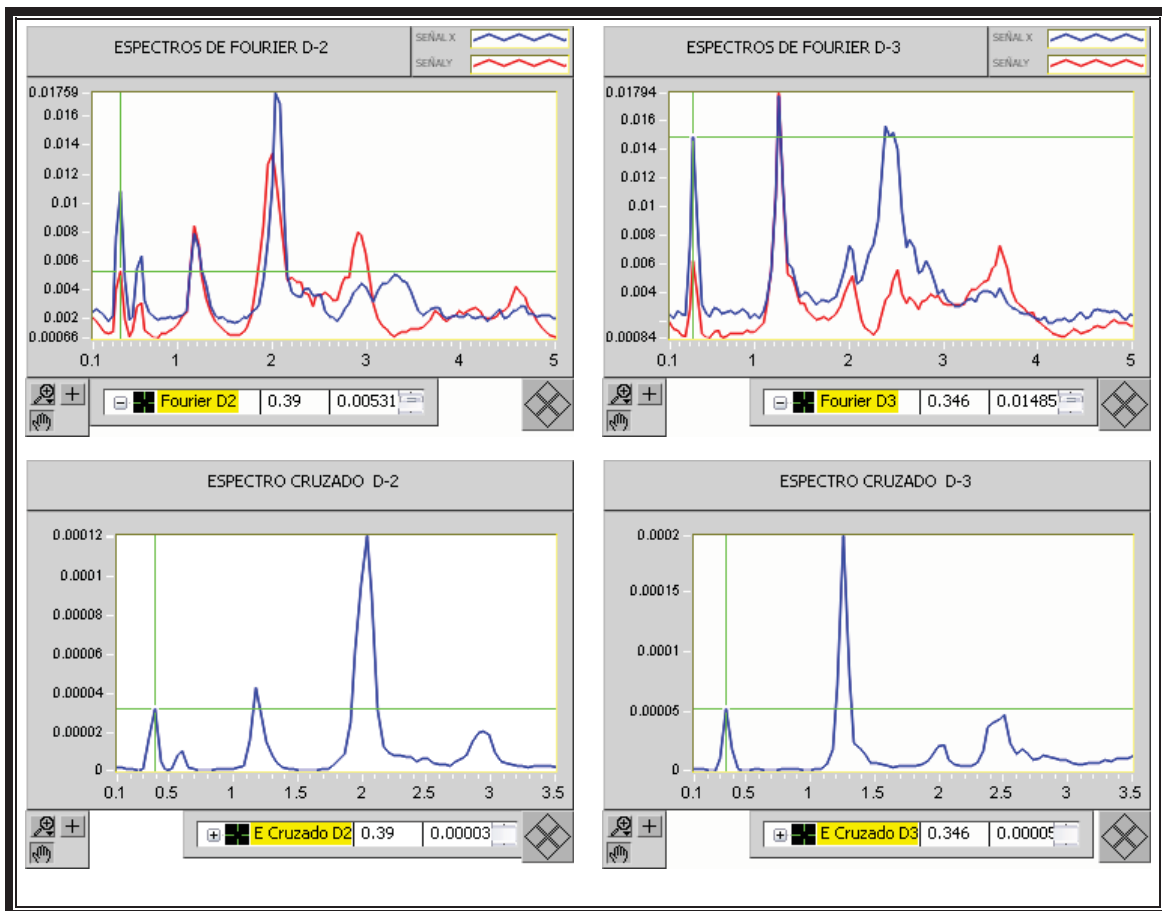


Figura 4.19. a) Análisis de señales representativo, Espectros de Fourier y espectro cruzado.



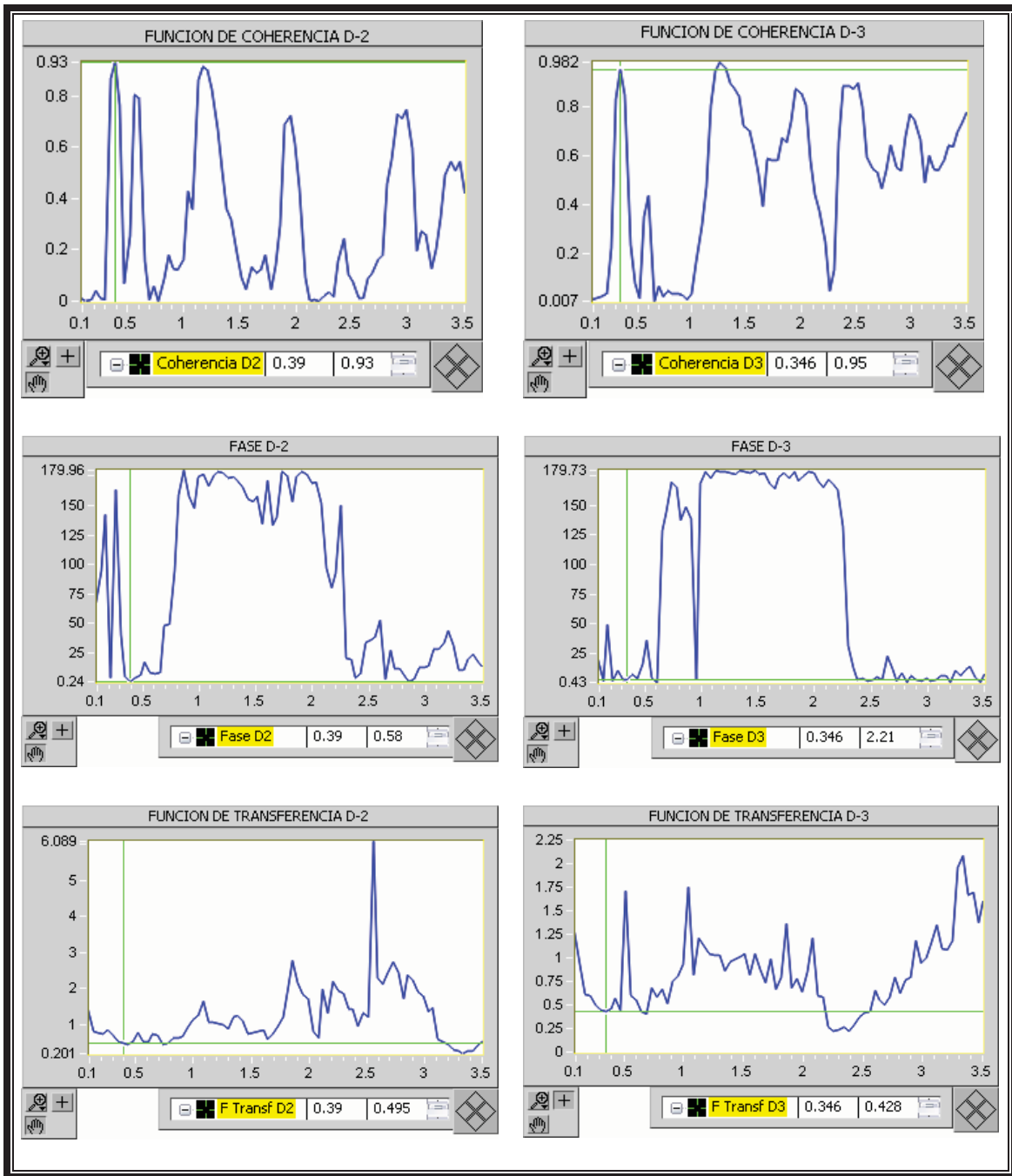


Figura 4.19. Análisis de señales representativo, coherencias, fases y función de transferencia.

En lo que se refiere a torsión, los registros obtenidos de instrumentar esquinas opuestas en la azotea del edificio permitió obtener señales particularmente francas donde tanto coherencia como fases no dejan lugar a dudas sobre la frecuencia a 0.583 [Hz] (periodo de 1.715 s), como puede observarse en la *fig.* 4.20.

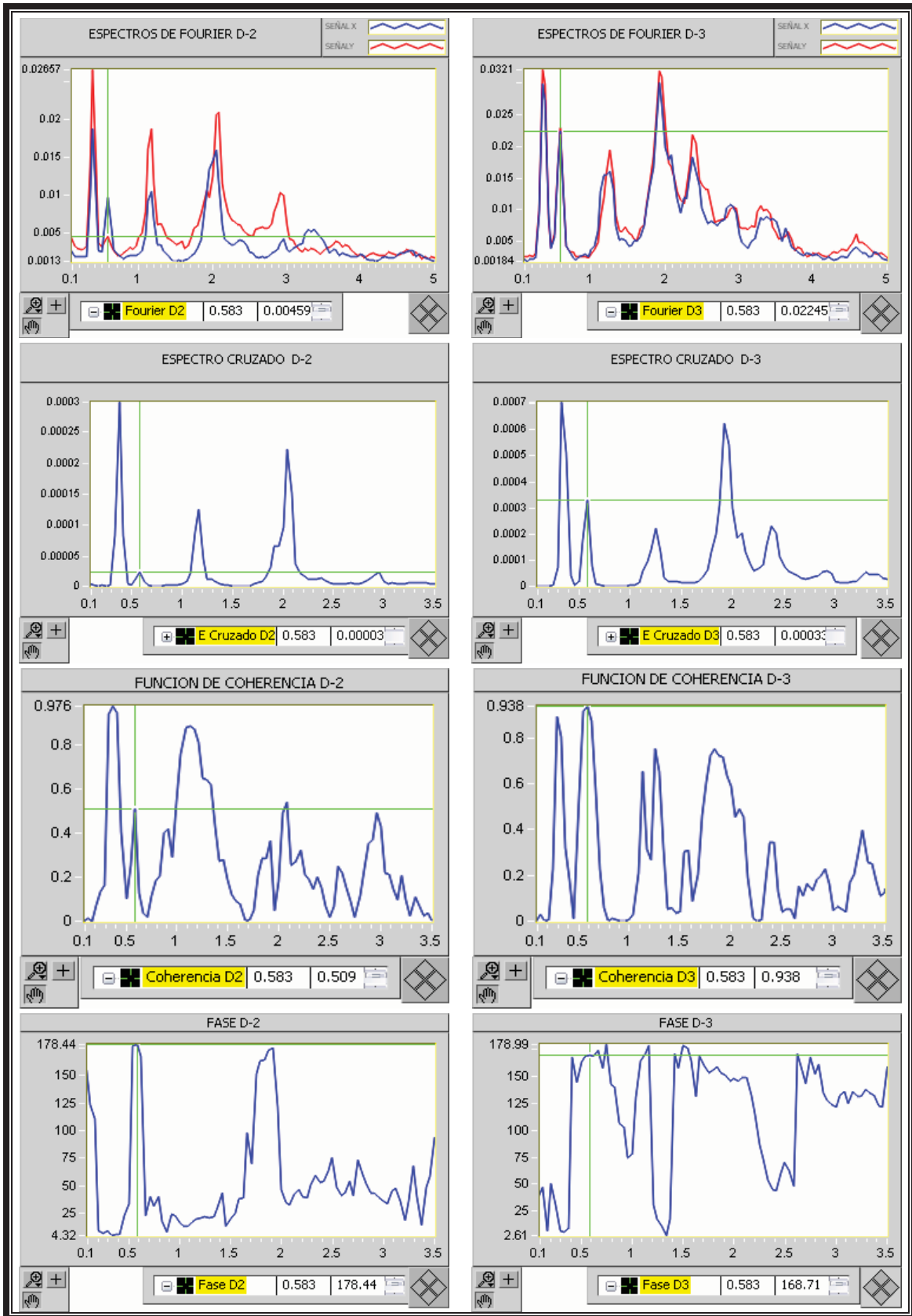


Figura 4.20. Análisis de Fourier representativo para la frecuencia de 0.583 Hz en torsión.

De forma similar que en el edificio *Reforma 116*, los valores de frecuencias identificadas, indican que se presenta un acoplamiento en los movimientos del edificio, producto de la asimetría que le induce el cubo de servicios. En la *fig.4.21*, se presentan las formas modales identificadas para el edificio, en sus 2 direcciones ortogonales, que en realidad corresponden a las proyecciones de la forma modal tridimensional sobre estas direcciones.

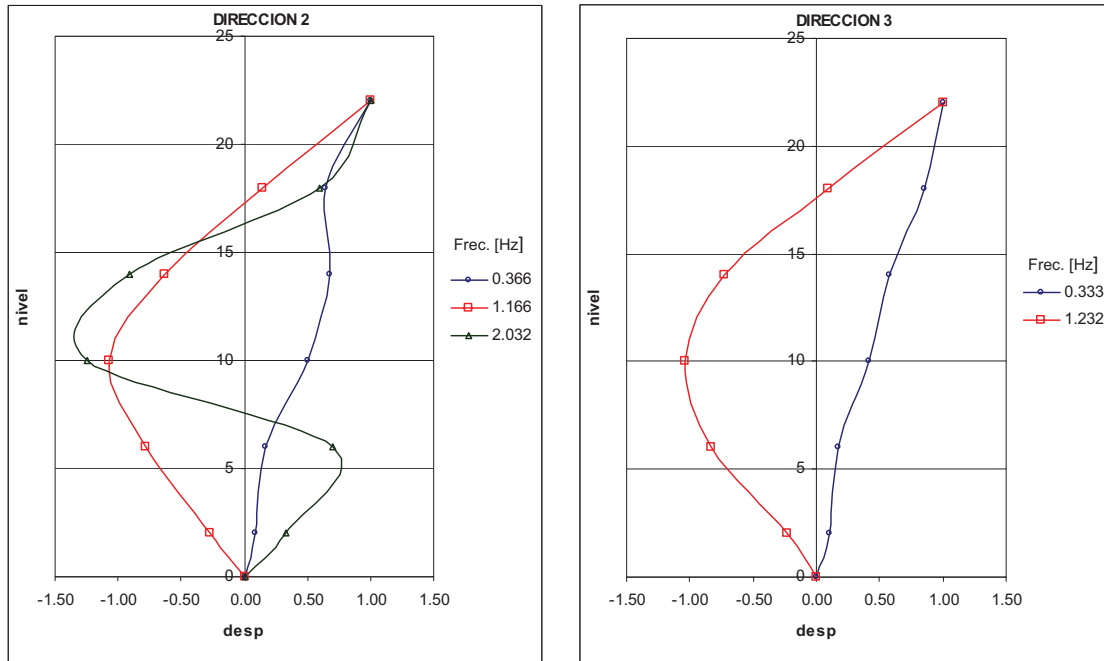


Figura 4.21. Formas modales identificadas.

En resumen se tienen los siguientes valores de periodo:

- ✦ Dirección paralela a Reforma (dirección 2)
  - 2.732 seg. (0.366 Hz) primer modo
  - 0.858 seg. (1.166 Hz) segundo modo
  - 0.492 seg. (2.032 Hz)tercer modo
  
- ✦ Dirección perpendicular a Reforma (dirección 3)
  - 3.003 seg. (0.333 Hz) primer modo
  - 0.812 seg. (1.232 Hz) segundo modo
  
- ✦ En torsión
  - 1.715 seg. (0.583 Hz)

Debido a que esta estructura es un tanto más esbelta en comparación con la de *Av. Reforma 116* (aunque guardan similitudes), los espectros de Fourier lucen un mayor contenido de frecuencias con espectros ligeramente más definidos y niveles de coherencia relativamente alto, excepto tal vez para el nivel 6 e inferiores. Sin embargo, en lo que respecta a las fases, estas se distribuyen de forma escalonada formando amplios rangos donde se dificulta establecer con certeza la forma modal

asociada a algunas frecuencias dentro de dichos rangos, motivo por el cual el número de formas modales identificadas fue menor, además de que la configuración de estas presenta cierta falta de uniformidad (quebres bruscos), cuestión que se asocia al tipo de instrumentación empleada, que no permite conocer de forma simultánea (en todos los niveles) el movimiento que presenta el edificio y solo hace factible recrear de forma aproximada la deformada.

Los amortiguamientos calculados, reflejan un sistema estructural uniforme en ambas direcciones presentando valores en torno al 6.4% y muy cercano al esperado 5%, lo cual se puede atribuir a la escasa existencia de elementos externos en el sistema estructural, donde el único factor visible que modifique esta condición es la presencia de dos pequeños muros de concreto en la periferia del anexo posterior al edificio que conforma el núcleo de ascensores.

**4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

Edificio	Sistema estructural		Zona geotécnica RCDF	Nº de niveles	Periodos [s]	
	Longitudinal	Transversal			Longitudinal	Transversal
Exconasupo	Muros de concreto reforzado en la periferia del edificio.	Marcos de concreto reforzado a base de columnas y losa reticular con refuerzos a base de diagonales de acero	En el limite entre las zonas II y III a	23	1.96	3.37
Insurgentes sur 1931	Marcos de concreto reforzado a base de columnas y losa reticular con la presencia de un muro de concreto que ocupa el 100% de uno de los ejes externos, mientras en el eje externo opuesto presenta muros y diagonales de (acero o concreto) abarcando un 75% de su superficie.	Marcos de concreto reforzado a base de columnas y losa reticular con la presencia de un muro de concreto que ocupa el 100% de la superficie en uno de los ejes externos.	Zona I	20	1.203	2.427
Reforma 116	Marcos formados por vigas y columnas de acero con la participación de un núcleo lateral de concreto (robusto).		Zona III b	20	2.174	2.174
Reforma 51	Marcos formados por vigas y columnas de acero con la participación de un núcleo lateral de concreto (esbelto).		Zona III b	22	2.732	3.003

Edificio	Nº de modos identificados		Amortiguamientos para las frecuencias fundamentales		Ts	Relacion Periodo/Nº de Niveles		Relacion Periodo/Amortiguamiento		Diferencia entre periodo empirico (Nº niveles/10) y experimental	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal		Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Exconasupo	2	3	5	11	1.1	8.52%	14.65%	0.39	0.31	-17.35%	31.75%
Insurgentes sur 1931	3	3	9.6	5.8	0.7	6.02%	12.14%	0.13	0.42	-66.25%	17.59%
Reforma 116	3	3	9	8.2	2	10.87%	10.87%	0.24	0.27	8.00%	8.00%
Reforma 51	3	2	6.4	6.4	2	12.42%	13.65%	0.43	0.47	19.47%	26.74%

De los resultados obtenidos para estos cuatro edificios es notable la participación de los muros en los sistemas estructurales ya que contribuyen al incremento en rigidez lateral y por tanto a la modificación del periodo de vibrar respecto al estimado empíricamente. Sin embargo, es indudable que la presencia de los muros afecta directamente al nivel de amortiguamiento que puede llegar a desarrollarse durante un evento sísmico. De los casos analizados, se pudo observar que el método propuesto por Kawasumi y Shima arroja resultados de mayor consistencia en la medida que se tenga un espectro de potencia bien definido, como fue el caso del edificio *Exconasupo*, donde se obtuvieron valores importantes de amortiguamiento, precisamente por la presencia de muros.

En cuanto al sitio de desplante de los edificios se observa un ligero incremento del periodo para suelos blandos, lo cual resulta evidente debido a la menor rigidez que ofrece el suelo respecto a la correspondiente a suelos más firmes, aunque esto también depende de las características de su sistema estructural. Es de interés mencionar que los únicos edificios sensiblemente parecidos en su sistema estructural fueron los ubicados en Reforma.

Un aspecto notorio es que en las señales obtenidas en sitios de desplante con suelo firme, estuvieron más afectadas por ruido, por lo que la correlación entre los equipos de medición colocados en pisos superiores y del sótano arroja, en la mayoría de los casos, coherencias muy bajas, sin embargo, fue posible conocer el comportamiento dinámico de la estructura.

Se observó que en algunos casos el periodo del suelo establecido en las NTC y el medido experimentalmente del edificio, pueden encontrarse próximos entre si (*Reforma 116*), por lo que debe analizarse el efecto de interacción suelo-estructura en los modelos matemáticos, a fin de evaluar con mayor profundidad su comportamiento.

Se puede observar que la diferencia de periodos obtenidos experimentalmente contra los empíricos en función del numero de niveles, se encuentra dentro de un rango del 8 a 31 %, aumentando este valor conforme existen diferencias significativas de estructuración, ya sea por la adición de elementos rigidizantes como muros y diagonales como es el caso *Exconasupo* e *Insurgentes* o bien la esbeltez geométrica en planta del edificio como sería *Reforma 51*.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en este trabajo se observó que las propiedades dinámicas varían en función de las características y participación de los elementos estructurales y no estructurales del sistema para resistir cargas laterales. Adicionalmente, se identificó que las propiedades dinámicas pueden variar por efecto del nivel o amplitud de los desplazamientos inducidos a la estructura, obviamente asociados a las características y fuente de la excitación, (vibración ambiental o vibración forzada). Así, en el caso *Exconasupo*, estructura en la que se registraron varios temblores, la calidad de sus resultados puede considerarse mejor que el caso del edificio de Insurgentes No 1931 con el cual presenta similitudes estructurales.

Respecto al método empleado para obtener el coeficiente de amortiguamiento (*Kawasumi y Shima*), se observó que éste es sensible a la calidad del espectro de potencia empleado, el cual es función de las características y origen de la señal. Los espectros de potencia obtenidos de registros sísmicos, fueron de mayor calidad y, por tanto, arrojaron valores más representativos del coeficiente de amortiguamiento de un edificio, que los obtenidos de registros de vibración ambiental. Al respecto, se obtuvieron los mayores valores para estructuras de concreto, como es el caso de los edificios *Exconasupo* e *Insurgentes 1931*, mientras que los edificios de acero presentan valores de amortiguamiento cercanos a los recomendados en la literatura para estructuras (5%). Adicionalmente se pudo observar que se obtuvieron los mayores valores para sistemas que incorporan muros (*Exconasupo* e *Insurgentes 1931*), en relación a los que presentan en su mayoría marcos formados por vigas y columnas (*Reforma 51 y 116*).

La calidad de las señales y por lo tanto la confiabilidad de sus resultados se incrementó proporcionalmente con la flexibilidad del sistema estructural estudiado, particularmente para la identificación de modos superiores de vibrar, ya que los espectros de Fourier presentaron frecuencias bien definidas, como es el caso de los edificios de Reforma construidos en acero, aún y cuando se trató con registros obtenidos a partir de vibración ambiental.

Fue notorio que otro aspecto que juega un papel primordial, es la selección adecuada de los puntos de medición o, en su defecto, contar con una amplia colección de datos y arreglo de equipos, ya que de estos depende la concordancia para la correlación de señales entre los diferentes niveles, con objeto de determinar las frecuencias propias de vibrar de la estructura en las direcciones estudiadas. Para ello es deseable apoyarse en resultados preliminares de modelos analíticos sencillos y criterios empíricos, de modo que permita limitar el rango de frecuencias dentro del cual se localizaran las correspondientes a la estructura, a fin de reducir sustancialmente el proceso de análisis.

La determinación de propiedades dinámicas requirió no solamente del cálculo de los espectros de Fourier o de potencia, sino también, de otras funciones de correlación como son: la coherencia, fase, función de transferencia y el espectro cruzado, las cuales son indispensables y permitieron que la identificación de las frecuencias características de vibrar de los sistemas estructurales se llevaran a cabo de forma confiable.

En el análisis de las señales producto de la vibración ambiental se observó una mayor presencia de ruido, que dificultó la determinación de las frecuencias. Esta situación fue especialmente visible en la instrumentación realizada en niveles inferiores y próximos a los sótanos de los edificios, ya que aún y cuando forman parte del mismo cuerpo, los niveles de desplazamiento experimentados, son imperceptibles y extremadamente pequeños, incluso para los mismos equipos de medición; ello se refleja en algunos de los resultados presentados, como valores relativamente pequeños de coherencia.

Para el edificio de la *Exconasupo*, en el cual se contó con registros producto de vibración ambiental y también forzada (producida por sismos), se encontraron diferencias entre las propiedades dinámicas obtenidas, lo cual

se atribuye al nivel de desplazamientos experimentado por los elementos estructurales. A mayor desplazamiento en el sistema estructural se producirán mayores deformaciones en sus elementos que pueden ocasionar diferentes niveles de agrietamiento y en sismos fuertes hasta el deslizamiento relativo entre estas grietas. Al respecto se encontraron diferencias entre un 10 y un 25 % en el cálculo del periodo obtenido con vibración ambiental y sismos reales, siendo mayor el producido por estas últimas excitaciones.

En cuanto al sitio de desplante de los edificios se observa un ligero incremento del periodo para suelos blandos, lo cual resulta evidente debido a la menor rigidez que ofrece el suelo respecto a la correspondiente a suelos firmes, aunque esto también depende de las características de su sistema estructural, sin embargo, se hace evidente la necesidad de considerar los efectos de interacción suelo-estructura en estos edificios.

Un aspecto notorio en las señales obtenidas en sitios de desplante con suelo firme, es la presencia de un nivel de ruido importante, por lo que la correlación entre los equipos de medición colocados en pisos superiores y del sótano arroja, en la mayoría de los casos, coherencias muy bajas, sin embargo, es posible conocer el comportamiento dinámico de la estructura concentrándose en las frecuencias que presentan alto grado de participación en los niveles superiores.

En las estructuras asimétricas (la mayoría de las que existen) los modos de vibrar traslacionales presentan acoplamiento entre las dos direcciones ortogonales definidas para su estudio, como es el caso de los edificios ubicados en paseo de Reforma, situación que se refleja en los espectros de Fourier, en los cuales suele aparecer la misma frecuencia pero con diferente amplitud. Al respecto, la mayor amplitud del espectro asociada a esa frecuencia, nos indica la dirección dominante del movimiento, por lo que se aconseja proponer diferentes arreglos para captar de manera clara la dirección libre de acoplamiento.

En otros sistemas donde la estructuración se asemeja fuertemente a un oscilador simple, como pueden ser tanques elevados, el acoplamiento entre modos puede manifestarse también en la dirección vertical y es difícil identificar las direcciones principales de rigidez para la colocación y orientación de los equipos de medición.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Los instrumentos virtuales como el desarrollado en este trabajo, son una herramienta poderosa para realizar el tedioso proceso y análisis de señales registradas en estructuras existentes para obtener sus propiedades dinámicas reales con objeto de evaluar su comportamiento ante sollicitaciones estáticas y/o dinámicas futuras, mostrando una gran flexibilidad para ser adecuados a las necesidades del caso en estudio. Además, conforme avanza el campo de análisis de señales, los instrumentos virtuales pueden adaptarse en forma modular al cuerpo principal de un programa para implementar nuevas utilerías o herramientas que faciliten la obtención de resultados más completos.

La aplicación de estos instrumentos no es exclusivamente en edificios, otro tipo de estructuras en las que también se ha probado la utilidad para el análisis de señales, aunque no se incluyen en los alcances de este trabajo pero que son relevantes de comentar, han sido graderías en estadios, los cuales están formados por un conjunto de marcos con voladizo conectados por medio de elementos prefabricados que integran las gradas. De estas estructuras se ha observado que el nivel de aceleración inducido por los espectadores puede ser extraordinariamente grande, inclusive superior a los de un sismo intenso similar a los registrados en la ciudad de México en un edificio de 20 niveles.

La determinación experimental de las propiedades dinámicas permite desarrollar modelos matemáticos más confiables para evaluar y monitorear el comportamiento dinámico de sistemas estructurales existentes ante diversas sollicitaciones presentes y futuras, sin embargo, si bien los resultados del estudio por *análisis de Fourier* sirven para definir la estructura a nivel global; para lograr una alta representatividad, se requiere mejorar la caracterización de la misma mediante el uso de algunas de las técnicas de exploración física presentadas en el

capítulo inicial, cuya selección dependerá de los objetivos y alcances establecidos por el ingeniero, medidos contra el factor económico. A este respecto, si tomamos en cuenta que según la reglamentación del Distrito Federal se debe asegurar periódicamente el sano estado de una estructura, debería tenerse en mente instalar sistemas permanentes particularmente en estructuras del tipo A.

En este trabajo se trató de hacer un esbozo completo acerca de las técnicas e instrumentos comúnmente empleados en el campo de la ingeniería civil para el monitoreo y supervisión de la seguridad estructural, no obstante este es un campo amplio y revolucionario sobretodo en países industrializados, tendiendo a desarrollar sistemas permanentes, compactos y autónomos, como los sistemas de fibra óptica, por lo cual, es conveniente para el interesado en el tema mantenerse actualizado sobre los avances en este campo de conocimiento.



## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- AFTAB M. "Guide lines for Structural Health Monitoring". ISIS. Canada. 2001.
- AFTAB M. "Structural Health Monitoring of Innovative". Canadian Civil Engineering Structures. ISIS. Canadá. 2002.
- AFTAB M; FARHAD A. "Proceedings of the First International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures". ISIS. Canada. 2002.
- AFTAB M; FARHAD A. "Proceedings of the second International Workshop on Structural Health Monitoring of Innovative Civil Engineering Structures". ISIS. Canada. 2004.
- AKTAN E; BERGMAISTER K; CATBAS N. "Development of a model health monitoring guide for major bridges". Federal Highway Administration, EUA. 2002.
- ALLVIEW. "Geosys AG". Terra Technology, Switzerland. 1995.
- ANAYA H. "Evaluación del comportamiento dinámico de un edificio de 20 niveles con base en propiedades dinámicas obtenidas analítica y experimentalmente". UNAM. México. 2007.
- AYALA G; GARCÍA O; CASTELÁN I. "Evaluación de la respuesta sísmica de un edificio alto con disipadores de energía, resultados teóricos contra mediciones instrumentales". UNAM. México. 2001.
- BARRERA H; PÉREZ H; SANDOVAL R. "La Carbonatacion en Edificios". Universidad de santiago de chile. Chile. 2003.
- BENDAT J; PIERSOL A. "Engineering applications of correlation and spectral analysis". John Wiley & Sons. EUA. 1993.
- BERGMAISTER K. "Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures". Austria. 2002.
- BISBY L; BRIGLIO M. "An introduction to structural health monitoring". ISIS. Canada. 2004.
- CARDEN P; FANNING P. "Vibration Based Condition Monitoring". SAGE. EUA. 2004.
- CASTELÁN I. "Determinación experimental de las propiedades dinámicas de un edificio reforzado con disipadores de energía". UNAM. México. 2001.
- CAWLEY P.; ADAMS R. "The location of defects in structures from measurements of natural frecuencies". Journal from strain analysis. EUA. 1979.
- CHAU T; LIANG Y. "Chemometrics, from basics to wavelet transform". John Wiley & Sons. EUA. 2004.

- DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. "Repair of Buildings Damaged by Earthquakes". United Nations. EUA. 1977.
- DOEBLING W; FARRAR C; PRIME M. "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics a literature review". Los Alamos. EUA. 1996.
- FAUNDEZ P; FUENTES Á. "Procesamiento Digital de Señales utilizando wavelets". UACH. Chile. 1995.
- GAVILAN C. "El uso de la transformada de Hilbert para el diagnostico de vibraciones". Revista Dyna, España 2007.
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo", Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, D.F. 2004.
- GRATAN K; MEGGITT B. "Optical Fiber Sensor Technology, Applications and Systems". Kluwer Academic. Holanda. 1999.
- HUANG C. S. HUNG S. L. "A wavelet-based approach to identifying structural modal parameters from seismic response and free vibration data". Universidad Nacional Chiao Tung. Taiwan. 2005.
- KAWASUMI H. Y SHIMA E., Some Applications of a Corrector Engineering Problems, III WCEE, Nueva Zelanda, Vol 2, II-298 a II-320. 1965.
- MÀNUEL A; BIEL D; PRAT J. "Instrumentación virtual, Adquisición, procesado y análisis de señales". Alfaomega, México, 2006.
- MÀNUEL A; DEL RÍO J. "LabVIEW 7.1, Programación Gráfica para el Control de Instrumentación". Ed. Thomson, España, 2005.
- MARTÍNEZ J; CASTRO M. "Análisis de la teoría de ondículas orientada a aplicaciones en ingeniería eléctrica: fundamentos". ETSI. España. 2002.
- NATIONAL INSTRUMENTS. "Empezando con LabVIEW". National Instruments Corporation. EUA. 2003.
- NATIONAL INSTRUMENTS. "LabVIEW Basics I Course Manual". National Instruments Corporation. EUA. 1999.
- NÚÑEZ P. "Aprendiendo a desarrollar proyectos académicos de bajo costo con labVIEW 8". National Instruments. México. 2006.
- PSENIKA B. "Procesamiento digital de señales". UNAM, México. 1995.
- ROMERO E. "Procesamiento digital de señales vibratorias mediante la Transformada Wavelet Packets". Universidad de Madrid. España. 2006.

- SUÁREZ L; MONTEJO L. "*Applications of the Wavelet Transform in Earthquake Engineering*". Universidad de Osaka, Japón. 2004.
- TA M. "*Natural frequencies and modal damping ratios identification of civil structures from ambient vibration data*". Universidad de Comte. Francia. 2006.
- VALDÉS S. "*Revisión de la seguridad estructural de un edificio ubicado en Avenida Paseo de la Reforma*". UNAM. México. 2005.