



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO
DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS
DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
IRVING OLEA EFIGENIO

TUTOR:
M. I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., DICIEMBRE DE 2020



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. MAURO P. NIÑO LÁZARO
Secretario: M. I. VICTORIANO A. GALLEGOS SUÁREZ
Vocal: M. I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ
1 er. Suplente: DR. MARCOS M. CHÁVEZ CANO
2 do. Suplente: M. I. MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ VEGA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

M. I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

FIRMA

*A mi hijo: Irving de Jesús
Por ser mi principal fuente de motivación en la vida.*

*A mis padres: Leonel y Beatriz
Por su eterno apoyo.*

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante la realización de mis estudios de posgrado.

Agradezco especialmente a mi tutor, el M. I. Octavio García Domínguez, así como también a cada uno de los miembros del jurado asignado, por haber dedicado su valioso tiempo en la revisión y comentarios realizados a este trabajo.

Así mismo, agradezco y reconozco a todos aquellos maestros que contribuyeron a mi formación académica, debido a sus invaluable consejos y conocimientos que, en todo momento, procuraron siempre transmitir de la mejor manera posible.

Índice

Capítulo 1

Introducción

1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3	JUSTIFICACIÓN	3
1.4	OBJETIVOS Y ALCANCES	3

Capítulo 2

Generalidades: Estructuras dentro del sector industrial en México

2.1	ANTECEDENTES	5
2.2	ESTRUCTURAS INDUSTRIALES	6
2.3	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	8
2.4	NORMATIVIDAD DE REFERENCIA	9

Capítulo 3

Pruebas de medición de vibraciones y monitoreo de salud estructural

3.1	ANTECEDENTES	11
3.2	INSTRUMENTACIÓN ESTRUCTURAL	11
3.2.1	<i>Instrumentos de medición</i>	12
3.2.2	<i>Registro y procesamiento de los datos</i>	14
3.3	TIPOS DE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES	15
3.3.1	<i>Pruebas de vibración ambiental</i>	16
3.3.2	<i>Pruebas de vibración forzada</i>	16
3.4	MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL (MSE)	17
3.4.1	<i>Definiciones</i>	17
3.4.2	<i>Aplicaciones y estrategias de implementación</i>	18
3.4.3	<i>Comentarios adicionales</i>	20

Capítulo 4

Fundamentos del análisis de señales

4.1	ANTECEDENTES	22
4.2	TIPOS DE DATOS Y SUS CARACTERÍSTICAS	23
4.3	ANÁLISIS DE FOURIER	26
4.3.1	<i>Transformada de Fourier</i>	26
4.3.2	<i>Funciones de densidad espectral</i>	28
4.3.3	<i>Consideraciones adicionales</i>	32
4.4	DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS ESTRUCTURALES	38
4.4.1	<i>Frecuencias naturales de vibración</i>	38
4.4.2	<i>Formas modales</i>	39
4.4.3	<i>Amortiguamiento estructural</i>	40

Capítulo 5

Aplicación del caso de estudio

5.1	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	44
5.2	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS	46
5.3	DISEÑO DEL ARREGLO DE MEDICIÓN	48
5.4	PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE SEÑALES	51
5.4.1	<i>Obtención de los registros de medición</i>	51
5.4.2	<i>Herramienta virtual empleada para el análisis de señales.....</i>	54
Capítulo 6		
Análisis e interpretación de los resultados		
6.1	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	55
6.1.1	<i>Frecuencias naturales de vibración.....</i>	55
6.1.2	<i>Formas modales.....</i>	63
6.1.3	<i>Amortiguamiento estructural.....</i>	65
6.2	RESULTADOS ANALÍTICOS	69
6.2.1	<i>Concepción del modelo de análisis</i>	69
6.2.2	<i>Frecuencias naturales de vibración.....</i>	72
6.2.3	<i>Formas modales.....</i>	72
6.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	74
Capítulo 7		
Evaluación de los efectos de las vibraciones en Estructuras Industriales		
7.1	ANTECEDENTES	78
7.2	PROCESO DE EVALUACIÓN	78
7.3	LÍMITES Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	81
7.4	NORMATIVIDAD APLICABLE.....	81
7.4.1	<i>Criterios psicológicos</i>	81
7.4.2	<i>Criterios en la calidad de operaciones</i>	86
7.4.3	<i>Criterios de integridad estructural.....</i>	91
7.5	EVALUACIÓN DE LA SERVICIABILIDAD ANTE VIBRACIONES DEL CASO DE ESTUDIO.....	93
7.5.1	<i>Límites psicológicos</i>	93
7.5.2	<i>Límites de calidad de operaciones.....</i>	94
Capítulo 8		
Conclusiones y recomendaciones		
8.1	CONCLUSIONES	99
8.2	RECOMENDACIONES.....	101
Referencias		102

Anexos

Anexo A. Espectros de Fourier, funciones de transferencia, fase y coherencia de los registros obtenidos a partir de las pruebas de mediciones de vibración ambiental realizadas a la Estructura del Reactor.

Resumen

El presente trabajo trata sobre el estudio de la respuesta y determinación de las propiedades dinámicas que describen el comportamiento de la llamada “Estructura del Reactor”, la cual es una estructura metálica no convencional de tipo industrial, con casi 30 años de antigüedad, destinada como plataforma de operación y mantenimiento terrestre de un gran tanque vertical a presión instalado en su interior. Dicha estructura pertenece a una de las plantas de proceso que conforman una refinería localizada en la zona norte del país.

La estructura fue instrumentada y sometida a diferentes pruebas de vibración de carácter ambiental con el fin de estimar sus propiedades dinámicas efectivas, a saber: frecuencias y formas naturales de vibración, además de sus fracciones modales de amortiguamiento crítico. Los registros obtenidos por medio de dichas pruebas fueron analizados tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, empleando técnicas de análisis espectrales convencionales, comúnmente conocidas como técnicas de identificación de sistemas.

Las propiedades dinámicas estructurales obtenidas experimentalmente, serán comparadas contra las teóricas originales obtenidas analíticamente, mediante la elaboración de un modelo matemático concebido en el programa comercial de cómputo SAP2000, vr.18.0.1 (CSI, 2018). Las diferencias encontradas, permitirán evaluar la severidad del deterioro existente en el sistema estructural en estudio, debido principalmente al avanzado nivel de corrosión que exhiben sus elementos resistentes; situación que, ha venido agravándose con los años, desde su construcción.

Por otra parte, se analiza también el efecto de las vibraciones medidas en la estructura y su influencia perjudicial tanto en los usuarios como en los equipos contenidos dentro de la misma, bajo diferentes criterios de aceptación plasmados en la normativa internacional especializada. Los resultados muestran vibraciones anómalas que afectan la actividad de los usuarios y que pueden llegar incluso, a ocasionar posibles fallas en el equipo electromecánico existente.

Finalmente, con base en los resultados encontrados, se realizan las recomendaciones a seguir, con el fin de restaurar y mitigar las deficiencias que pudiesen poner en peligro al usuario, equipo y/o diversos contenidos alojados dentro de la misma estructura, para lo cual esta fue originalmente concebida; procurando en todo momento la salud e integridad del sistema estructural *per se*.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El sector industrial en México, así como en otros países en vías importantes de desarrollo, es considerado parte fundamental del motor de toda economía y, particularmente en nuestro país, el sector energético y petroquímico, juegan un papel predominante en el crecimiento y desarrollo de la nación; prueba de ello es que, en la actual administración federal, según lo indicado en el Plan Nacional de Desarrollo (PND 2019-2024, 2019), se contempla la construcción de una refinería completamente nueva, además de la reconfiguración, modernización y rehabilitación del resto de las instalaciones existentes de este tipo en todo el país.

Debido a ello y dada la particularidad y trascendencia de este tipo de proyectos de infraestructura, resulta de vital importancia el desarrollo de estructuras industriales que permitan la operación de manera continua de dichas instalaciones, aún después de la ocurrencia de algún evento intenso (sismos, huracanes, explosiones, etc.); salvaguardando en todo momento al personal, equipos y/o diversos contenidos alojados en ellas, para lo cual, dichas estructuras son originalmente concebidas.

Dentro de este contexto, el empleo de técnicas de instrumentación y monitoreo estructural constituyen sin duda, una efectiva y valiosa herramienta en el estudio de la respuesta e inspección de la salud y/o deterioro estructural de tan importantes instalaciones; ya que, este tipo de técnicas, permiten al especialista la posibilidad de obtener información acerca del comportamiento que exhiben las estructuras antes, durante y después de ser afectadas en cualquier tipo de evento, detectar oportunamente condiciones inadecuadas que pudiesen comprometer al correcto funcionamiento del sistema, además de tomar acciones preventivas o correctivas según sea el caso.

Aunque actualmente en la práctica de la ingeniería en México, el uso de este tipo de herramientas se ve fuertemente limitado debido a su costo relativamente elevado, se espera que el constante avance tecnológico pronto ayude a disminuir los obstáculos presentes de esta índole. Por lo pronto, será necesario promover en mayor medida, proyectos de instrumentación y monitoreo estructural; sobre todo en aquellos sistemas estructurales más representativos de nuestra práctica, incluyendo no solo el estudio de las edificaciones urbanas convencionales, sino también a aquellas estructuras que resultan ser poco usuales pero de gran importancia, como lo son las estructuras industriales.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Lo anterior, posee grandes ventajas como la elaboración de modelos analíticos verdaderamente representativos de las características y condiciones físicas reales de las estructuras, calibrando dichos modelo de análisis, con la ayuda de la información y resultados obtenidos a partir de los estudios experimentales de este tipo; evaluando el nivel de seguridad de las mismas, desde un punto de vista reglamentario y, de así requerirse, proveer del reforzamiento necesario para satisfacer los requerimientos normativos correspondientes.

Por otra parte, cabe mencionar que, cuando se cuenta con estructuras instrumentadas, existe la posibilidad de enriquecer el conocimiento acerca de la forma en la que se desempeñan los diferentes tipos de sistemas estructurales ante acciones de diversa intensidad, por lo cual, se contribuye de manera importante a establecer las pautas, criterios y consideraciones mínimas requeridas para el análisis y diseño racional de las estructuras; tomando como referencia las investigaciones realizadas y experiencia acumulada producto de estudios tanto nacionales como internacionales. Sin embargo, se aclara que solo las investigaciones locales, lograrán identificar sus principales características y efectos particulares en zonas de alto peligro sísmico y/o potencial eólico en nuestro país.

Así pues, la instrumentación de las estructuras y el monitoreo dinámico de las mismas, son técnicas de suma importancia en la ingeniería estructural, consolidándose de apoco, como una valiosa herramienta en la evaluación integral de la salud estructural, sobre todo en aquellas estructuras de gran importancia en las que se requieren diseños con un alto grado de seguridad. Por ello, el empleo de dichas técnicas, permiten tomar todo un conjunto de decisiones racionales, con la finalidad de reducir costos elevados o pérdidas tanto económicas, sociales o ecológicas, producto de posibles comportamientos anómalos del sistema, que bien pudiesen ser identificados de forma oportuna con la implementación de tan eficientes tecnologías actualmente disponibles.

1.2 Planteamiento del problema

Debido a la gran importancia que posee el funcionamiento ininterrumpido de todas aquellas estructuras civiles existentes o nuevas que pretenden ser proyectadas dentro de un complejo industrial, surge la necesidad de evaluar la seguridad y condiciones operacionales en las que estas comúnmente se encuentran. Lo anterior, a pesar de los diferentes eventos naturales a los que dichas estructuras pudiesen estar sometidas, además de las condiciones adversas de exposición a los ambientes altamente agresivos, los cuales son ocasionados generalmente, por los diferentes tipos procesos que se llevan a cabo dentro esta clase de instalaciones

Aunado a lo anterior, es común observar el deterioro acelerado de este tipo de estructuras en la industria; ya que frecuentemente se presentan importantes problemas de corrosión, infiltraciones, desperfectos y derrames de líquidos en ellas, comúnmente producidas por el mal estado de los equipos existentes, marchas forzadas en la operación de los mismos, además de programas de mantenimiento deficientes, inadecuados e inoportunos.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

En este sentido, la problemática particularmente tratada en el presente trabajo es que, la llamada “Estructura del Reactor”, perteneciente a una de las plantas de proceso dentro de una refinería localizada en la zona norte del país, ha manifestado con los años, indicios de daño evidente, producto del avanzado nivel de deterioro por corrosión en sus principales elementos resistentes; generando con ello, dudas acerca de su adecuado comportamiento bajo condiciones normales de servicio, además de un posible e inadecuado desempeño ante acciones futuras de diseño.

Por esta razón, se plantea el uso de técnicas de instrumentación y pruebas de vibración ambiental, con la finalidad de identificar y evaluar las condiciones en las que opera dicho sistema estructural y con ello, determinar la mejor política, estrategias o conjunto de acciones a seguir para dar solución a esta problemática. Adicionalmente, se evalúa el efecto de las vibraciones medidas en la estructura, desde el punto de vista del confort de los usuarios y los posibles daños que estas generan al equipo electromecánico existente instalado en su interior.

Los datos experimentales utilizados para el desarrollo del caso tratado, fueron tomados del estudio realizado por Ayala y García (2015), los cuales corresponden a las diferentes campañas de medición e inspecciones *in situ* que fueron llevadas a cabo sobre dicha estructura. A partir de esta información, se hicieron los análisis y desarrollo numérico que se presenta en esta tesis.

1.3 Justificación

El presente trabajo de tesis pretende documentar ampliamente los resultados obtenidos acerca del estudio de la respuesta e identificación de las propiedades dinámicas que describen el comportamiento de una estructura industrial, a partir de pruebas de medición de vibraciones y, servir como un antecedente en la evaluación de la integridad y seguridad de estructuras similares; ya que, como se ha mencionado, son pocos los estudios realizados de esta índole, tanto en México como en otros países y son menos aún, los estudios que tratan a tan particulares estructuras.

Por otra parte, se sabe de la necesidad de evaluar el comportamiento de sistemas estructurales propios y representativos de la práctica de la ingeniería civil mexicana, sobre todo, cuando se trata de evaluar las condiciones extremas de operación dentro de ambientes sumamente agresivos como en el caso de aquellas estructuras civiles pertenecientes a grandes complejos industriales; mismas que, han sido señaladas como prioritarias dentro de los objetivos y estrategias nacionales.

1.4 Objetivos y alcances

Genérico:

Este trabajo de tesis dirige sus esfuerzos al estudio del comportamiento dinámico de estructuras industriales, por medio del empleo de pruebas de medición de vibraciones como parámetro de una íntegra evaluación de la salud estructural; pretendiendo servir como una referencia en trabajos futuros para la evaluación de estructuras similares.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Particularmente, en este trabajo se busca:

- Determinar experimentalmente mediante datos de pruebas de vibración ambiental, las propiedades dinámicas que caracterizan el comportamiento de la “Estructura del Reactor” y realizar un análisis comparativo con aquellas obtenidas de manera analítica.
- Estudiar el efecto de las vibraciones en la estructura y su posible influencia perjudicial tanto en los usuarios como en los equipos contenidos dentro de la misma.
- Con base en los resultados encontrados, evaluar la magnitud del daño o deterioro presente en los principales elementos resistentes del sistema estructural y realizar las recomendaciones que permitan tomar las acciones necesarias para solventarlo.

Capítulo 2

Generalidades: Estructuras dentro del sector industrial en México

2.1 Antecedentes

La industria o sector industrial es aquel que se refiere a toda aquella actividad económica o conjunto de operaciones con fines productivos y de explotación en serie de materias primas. Ejemplos de instalaciones pertenecientes a este sector, son como los mostrados en la siguiente figura Fig. 2.1. Recordar que, los diferentes sectores de producción que establecen la base económica de cualquier nación, suelen clasificarse en tres grandes grupos, a saber: el sector primario o agropecuario, el sector secundario o industrial y, finalmente el sector terciario o de servicios. Cada nación apuesta firmemente por uno u otros de estos sectores, en función de los recursos propios con los que dispone, además de las políticas públicas y estrategias de desarrollo adoptadas según sea su conveniencia.

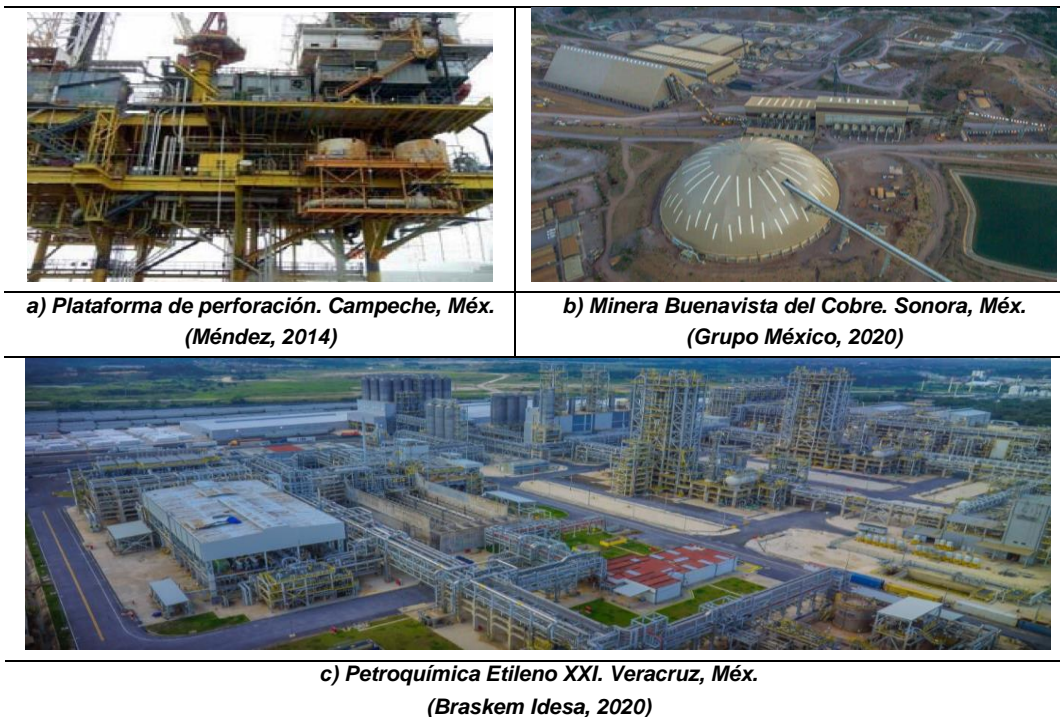


Fig. 2.1. Ejemplos de instalaciones industriales existentes en México

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Particularmente en México, desde los inicios de la industrialización durante la época del porfiriato, han estado presentes importantes actividades económicas relacionadas con la minería, siderurgia e hidrocarburos. Dichas actividades económicas persisten hoy en día y se conjuntan con otras actividades de la presente época como las referentes al sector energético, automotriz, textil, manufactura, etc.; todas ellas pertenecientes al llamado sector secundario o industrial, un histórico detonador del desarrollo y bienestar social. En la imagen anterior (Fig. 2.1), son mostrados algunos ejemplos de importantes complejos industriales que actualmente operan en nuestro país, en donde es posible observar una pequeña muestra de la enorme variedad y evidente diversidad en la tipología de dichas instalaciones, así como en los principales elementos que las componen, producto de las diferentes necesidades y procesos que en estas se llevan a cabo.

Dentro de este contexto y atendiendo al alcance de los trabajos desarrollados en este trabajo, se enfatiza la importancia que tienen todas aquellas estructuras pertenecientes y relacionadas sector industrial en México, mismas que, históricamente han sido pocas veces exploradas, estudiadas y/o documentadas; en contraste con aquellas estructuras urbanas convencionales, las cuales han sido objeto de múltiples estudios realizados por la ingeniería estructural en nuestro país.

2.2 Estructuras industriales

Expuesto lo anterior, se define entonces a las estructuras industriales como todos aquellos sistemas estructurales que directamente se relacionan, pertenecen o que se encuentran ubicadas dentro de una instalación, planta o cualquier otro tipo de complejo industrial activo. Las principales características que definen a este tipo de estructuras es que son, en su mayoría, sistemas cuya configuración geométrica y estructuración, difieren sustancialmente de aquellas estructuras de edificaciones urbanas convencionales; ya que estas primeras, son concebidas principalmente para dar soporte a equipos mecánicos de toda índole, servir de apoyo a diversas líneas de conducción eléctrica o de fluidos, almacenamiento de máquinas, productos y todo tipo de contenidos, además de ofrecer el acceso al mantenimiento y operación de los mismos.

Por tanto, existirá una gran variedad de estructuras de este tipo y su configuración estará fuertemente limitada por la trayectoria, forma y tamaño de las diversas máquinas o equipos que pretenden ser instalados en ellas, además de que, en muchas ocasiones, es común que se presenten limitaciones importantes en cuanto a espacios disponibles para ejecuciones y maniobras de trabajo, interferencias con sistemas de tuberías y ductos enterrados, cimentaciones de equipos o estructuras existentes, entre muchas otras más.

Conviene señalar que, actualmente se reconoce una clasificación formal de este tipo de estructuras, encaminadas a realizar un mejor estudio del comportamiento y diseño racional de las mismas, las cuales están contenidas dentro de las recomendaciones y criterios de diseño establecidos en publicaciones como las del Manual de Diseño de Obras Civiles MDOC-DS-2015 (CFE, 2015) de la Comisión Federal de Electricidad, CFE; mismo que, ante la falta de reglamentación local existente, forma parte de los códigos y normas de referencia aplicables al análisis y diseño de este tipo de estructuras (inciso 2.4).

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Al respecto, en la sección 3.4.2 del MDOC-DS-2015 (CFE, 2015), se clasifica a las estructuras industriales en tres diferentes tipos (fig. 2.2), en función de su tamaño y uso:

Tipo industrial I

“Son todas las estructuras que por su dimensionamiento cubre grandes claros. La longitud de la estructura suele ser la dimensión característica de la construcción, tales como almacenes y/o bodegas, talleres y casas de máquinas.”

Tipo industrial II

“Estructuras que dan soporte a tubería o líneas de conducción. Son aquellas estructuras que tanto en longitud como en altura estarán definidas por la dirección y trayectoria de una tubería o el dimensionamiento de un equipo, como el caso de racks de tuberías.”

Tipo industrial III

“Estas estructuras dan soporte a equipos industriales, cuyas dimensiones estarán definidas por las dimensiones de los mismos, los accesos o los lugares para maniobras. Estos pueden ser calderas, recuperadores de calor, transformadores o turbinas, torres de enfriamiento y tanques horizontales.”

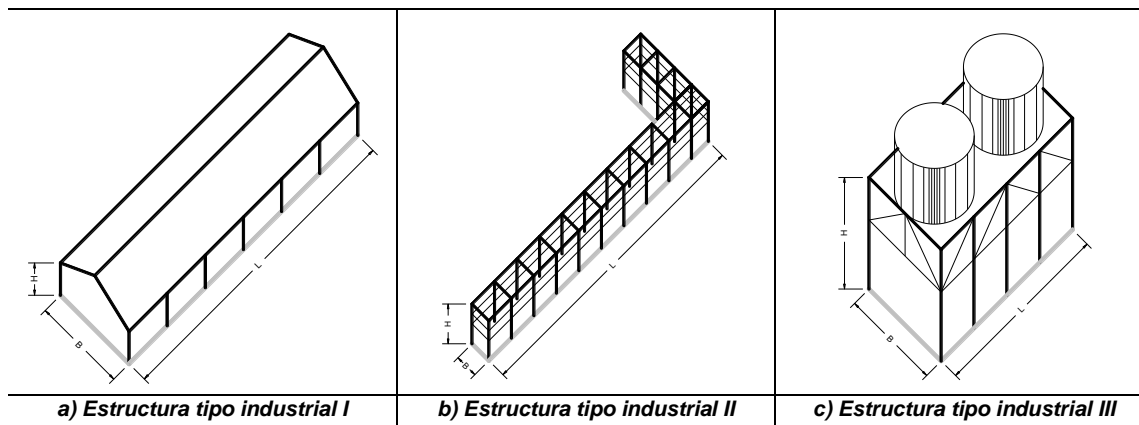


Fig. 2.2. Clasificación de estructuras industriales
(Adaptado del MDOC-DS-2015 CFE, 2015)

Conviene señalar que en el presente trabajo de tesis, se hará especial énfasis en aquellas estructuras industriales pertenecientes al sector petroquímico y de refinación en México, ya que los trabajos desarrollados en este documento, se refieren al estudio del comportamiento y evaluación estructural mediante pruebas de medición de vibraciones de carácter ambiental, realizadas a una estructura metálica de tipo industrial, que funge como plataforma terrestre de operación y mantenimiento llamada “Estructura del Reactor”, misma que se localiza dentro de una instalación refinera ubicada al norte del país.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

2.3 Operación y mantenimiento

A la fecha, existen solo seis refinерías activas en México, además de una completamente inhabilitada y una más que se encuentra actualmente en etapa de construcción (tabla 2.1). Sin embargo, fue necesario el transcurso de tiempo de alrededor de cuatro décadas desde la última refinерía construida en el país, para que se contemplase la concepción de una totalmente nueva; misma que se encuentra dentro de estrategias de crecimiento y políticas públicas adoptadas en el actual Plan Nacional de Desarrollo (PND 2019-2024, 2019). Esto hace evidente la poca frecuencia con que se realizan este tipo de proyectos y resalta la particularidad e importancia de los mismos.

Es de interés mencionar que, la infraestructura con la que dispone el actual sistema nacional de refinación se ha erguido desde principios de siglo pasado, iniciando con la expedición del decreto de expropiación que funda a Petróleos Mexicanos en 1938 y que le permiten hacerse de instalaciones existentes como la refinерía “Francisco I. Madero”, cuyas actividades datan del año de 1914, así como el operar y administrar el resto de las instalaciones posteriores a esta.

Tabla 2.1. Reseña: Infraestructura del Sistema Nacional de Refinación en México

Refinería		Nombre	Ubicación	Capacidad (Mbd) ¹
Núm.:	Año			
1	1914	"Francisco I. Madero"	Cd. Madero, Tamps.	250
2	1946	"18 de marzo" ²	Azcapotzalco, CMX.	100
3	1950	"Ing. Antonio M. Amor"	Salamanca, Gto.	245
4	1956	"Gral. Lázaro Cárdenas del Río"	Minatitlán, Ver.	185
5	1976	"Miguel Hidalgo"	Tula de Allende, Hgo.	315
6	1979	"Ing. Héctor R. Lara Sosa"	Cadereyta, NL.	275
7	1979	"Ing. Antonio Dovalí Jaime"	Salina Cruz, Oax.	330
8	-	"Dos Bocas" ³	Pto. Dos Bocas, Tab.	340

Fuente: Elaboración propia con datos PEMEX (2020) y SENER (2020), sitios web oficiales.

¹ - Miles de barriles diarios.

² - Inhabilitada. Cierre de operaciones en 1991.

³ - Actualmente en construcción.

Ante este panorama, resulta evidente que son pocas las instalaciones existentes de este tipo en el país y que muchas de ellas operan desde mediados del siglo pasado, en contraste con los países más desarrollados como Estados Unidos (que cuenta con alrededor de 150), China (con más de 50) o Rusia y Japón (con más de 30 cada uno); por lo que resulta crucial el preservar un adecuado estado de conservación de nuestras instalaciones, en aras de minimizar su inminente deterioro.

En este sentido, será importante establecer adecuados programas de mantenimiento e inspección a las estructuras destinadas a formar parte de dichos complejos. Estos deberán programarse de tal forma que resulten ser oportunos y eficientes al momento de tomar acciones preventivas en favor de la salud y seguridad de dichas estructuras.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Debido a ello, uno de los principales mensajes contenidos dentro de este trabajo se dirige a fomentar acciones idóneas de conservación y mantenimiento de cualquier tipo de estructura, así como de sus principales instalaciones y/o contenidos alojados en ellas; empleando en medida de lo posible, todo un conjunto de diversas e innovadoras técnicas y tecnologías que, permitan en todo momento, el monitoreo continuo de las estructuras con fines de la evaluación de su salud e integridad estructural; minimizando el riesgo de su falla e impacto económico y social.

2.4 Normatividad de referencia

Los lineamientos que rigen al diseño de estructuras industriales, particularmente aquellas relacionadas con el sector petrolero, no están cubiertos íntegramente por ningún código de diseño, reglamento o normativa nacional alguna (Vázquez *et al.*, 2014). Sin embargo, conviene señalar que existe todo un conjunto de publicaciones nacionales e internacionales, como los mostrados en la siguiente tabla 2.2, las cuales establecen las recomendaciones y criterios mínimos de diseño que deben cumplirse y que frecuentemente son utilizados en la práctica profesional ante la falta de una adecuada reglamentación local existente o normatividades afines aplicables en el país.

Tabla 2.2. Normatividad de referencia

Normas de referencia	
Pemex	
NRF-053-PEMEX-2014	Sistemas de Protección Anticorrosiva a Base de Recubrimientos.
NRF-065-PEMEX-2014	Recubrimiento a Base de Concreto a Prueba de Fuego en Estructuras y Equipos.
NRF-137-PEMEX-2012	Diseño de Estructuras de Acero Terrestres.
NRF-138-PEMEX-2012	Diseño de Estructuras de Concreto Terrestres.
NRF-139-PEMEX-2012	Soportes para Tubería - Diseño.
NRF-159-PEMEX-2013	Cimentación de Estructuras y Equipos.
Nacionales	
MDOC-DS-2015	Manual de diseño de Obras Civiles, Capítulo 3 – Diseño por Sismo.
MDOC-DV-2008	Manual de diseño de Obras Civiles, Capítulo 4 – Diseño por Viento.
RCDF-2019	Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.
Internacionales	
ACI 318-19	Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.
AISC-2017	Steel Construction Manual, 15th Edition.
ASCE 7-16	Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.

Publicaciones nacionales, como las recomendaciones contenidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles MDOC-DS-2015 (CFE, 2015) y MDOC-DV-2008 (CFE, 2008) de la Comisión Federal de Electricidad, así como las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 2019), ofrecen efectivos criterios y lineamientos que rigen el diseño de diversos tipos de estructuras; por lo cual, históricamente han sido referentes y ampliamente utilizados en la práctica profesional mexicana.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Además, existen estándares internacionales ampliamente utilizados, como aquellos publicados por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 2016), el Instituto Americano de Construcción en Acero (AISC, 2017) y el Comité 318 del Instituto Americano del Concreto (ACI 318, 2019), por mencionar algunos; los cuales proveen requisitos mínimos relacionados con las acciones y criterios de diseño aplicables a varios tipos de estructuras.

Por su parte, PEMEX en conjunto con sus organismos subsidiarios, cuenta también con una amplia gama de documentos de carácter oficial, que requieren ser aplicados al diseño de estructuras dentro de sus propias instalaciones, cuya principal finalidad es la de unificar los criterios de la ingeniería realizada dentro de sus propios proyectos, recopilando múltiples criterios establecidos en diferentes normas de aplicación, por lo cual no suelen ser documentos técnicamente especializados en la materia, pero sí de observancia obligatoria y general en el tratamiento de sus propias estructuras.

Así pues, el conjunto de reglamentos, manuales, normas y similares enlistados en la anterior tabla 2.2, muestran solo algunas de las publicaciones tanto nacionales e internacionales de mayor recurrencia en el medio; sin embargo, debido a su naturaleza en la incompatibilidad de su uso, se aclara que el empleo en conjunto de dichos códigos de diseño, deberán ser utilizados con cierta discreción o mesura y, tener siempre presentes las consideraciones particulares bajo las cuales se establecen dichas recomendaciones.

Capítulo 3

Pruebas de medición de vibraciones y monitoreo de salud estructural

3.1 Antecedentes

La instrumentación de estructuras es una actividad que naturalmente ha venido de menos a más, adquiriendo gran importancia en años recientes, debido al constante desarrollo tecnológico que exhiben los diferentes equipos y métodos experimentales empleados, impulsados a su vez, por la constante necesidad de evaluar y monitorear todos aquellos sistemas estructurales nuevos o existentes que así lo requieran; por lo que cada vez se consolidan como mejores técnicas económicamente factibles y confiables en su aplicación.

Dentro de un contexto histórico, cabe mencionar que en México, la instrumentación estructural se inicia desde mediados del siglo pasado, con algunas de las pruebas de mediciones realizadas en la Torre Latino Americana; sin embargo, a pesar de la importancia de evaluar el comportamiento de nuestros propios sistemas estructurales y efectos de sitio particulares, desafortunadamente, al ocurrir el sismo de septiembre de 1985, no se contaba con ningún edificio instrumentado en todo el país (Murià Vila *et al.*, 1997).

Hoy en día, se reconoce el hecho de que es necesario un mayor fomento, desarrollo y empleo de este tipo de técnicas, puesto que la instrumentación permanente de estructuras en el mundo sigue siendo sumamente limitada. Muestra de ello es que actualmente, son menos de treinta los edificios instrumentados en nuestro país, localizados casi en su totalidad en la Ciudad de México, mientras que en otras zonas del territorio son prácticamente inexistentes; en contraste con algunos países como Estados Unidos y Japón, los cuales cuentan con cientos de ellos (Murià Vila, 2007).

3.2 Instrumentación estructural

Por sí misma, la instrumentación estructural contempla la utilización de todo un conjunto de técnicas y herramientas cuyo objetivo principal se enfoca en la observación, medición, registro y análisis de datos experimentales que permiten describir el comportamiento dinámico de cualquier sistema o fenómeno físico existente.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Particularmente, el monitoreo dinámico y estudio de los registros de vibraciones ante movimientos que van desde bajas hasta grandes intensidades, permiten conocer la respuesta real de las estructuras instrumentadas, ya sea antes, durante o después de la ocurrencia de cualquier tipo de evento, así como el estimar las propiedades dinámicas de las mismas, utilizando procedimientos comúnmente conocidos como técnicas de identificación de sistemas. Dichas técnicas constituyen sin duda, una valiosa herramienta en el campo de la ingeniería estructural, permitiendo evaluar el comportamiento dinámico de diversos sistemas, ofreciendo a su vez, alternativas que influyen directamente en la toma de decisiones en favor de la salud y seguridad de las estructuras.

3.2.1 Instrumentos de medición

A continuación, se describen brevemente algunos de los equipos o instrumentos de medición comúnmente utilizados, así como las principales características que los definen; ya que estos, son finalmente los dispositivos o mecanismos por medio de los cuales se recolectan los datos experimentales necesarios para su eventual análisis. Su selección, dependerá del parámetro físico del sistema estructural que pretende ser estudiado, además de las estrategias de medición y monitoreo estructural que se adopten para ello, utilizando enfoques de mediciones tanto globales como locales; los cuales, serán descritos más adelante con mayor detalle (inciso 3.4.2).

Deformímetros eléctricos

Son dispositivos utilizados para medir deformaciones y se basan en el efecto producido por los cambios de resistencia eléctrica del material que se componen, al verse modificada su longitud. Los deformímetros, extensómetros o galgas extensométricas, se conforman básicamente de una serie de finos hilos metálicos (lámina) comprendida entre dos capas protectoras de resina epóxica, cuyas mediciones se realizan en la longitud efectiva del dispositivo y de forma paralela a su orientación.

Transductores de respuesta

En esencia, un transductor o transductor de respuesta es cualquier dispositivo capaz de transformar una fuente de energía en otra (e.g., energía eléctrica a mecánica y viceversa), en proporción a la magnitud del fenómeno físico observado (Bendat y Piersol, 2010). Los transductores de respuesta comúnmente utilizados son capaces de registrar parámetros tales como fuerza, desplazamientos, sonido, temperatura, entre otros.

Acelerómetros y similares

El acelerómetro permite registrar la aceleración absoluta de un sistema en movimiento. Se aclara que, aunque en su mayoría suelen ser equipos complejos y sofisticados, el elemento básico de un acelerómetro y equipos similares de velocidad o desplazamiento, es un transductor de respuesta; el cual, en su forma más simple, resulta en un sistema masa-resorte-amortiguador de un solo grado de libertad (1 GDL), cuya respuesta se mide proporcionalmente al movimiento de entrada en el aparato.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Los acelerómetros y equipos similares (fig. 3.1), se caracterizan principalmente por su frecuencia natural de operación (f_n) y fracción de amortiguamiento crítico (ζ), que por lo general son de hasta $f_n = 50\text{Hz}$ y $\zeta = 70\%$ para los equipos digitales más modernos, lo que permite que el instrumento realice registros del movimiento con el menor exceso de distorsión posible (Chopra, 2012).

Sensores de fibra óptica y otros

Finalmente, cabe mencionar que, en la actualidad, existe también una amplia gama de productos a base de sensores de fibra óptica, comúnmente denominados como: instrumentos de nueva generación. Ejemplo de ello son dispositivos tales como piezómetros, sensores de deformación, desplazamiento, aceleración, temperatura, etc., los cuales, funcionan con base en un principio de reflexión de la luz que viaja a través de cables blindados hasta llegar a consolas de procesamiento. Dichos instrumentos poco a poco han manifestado mayor presencia en el campo de la ingeniería e instrumentación, ofreciendo una adecuada estabilidad en las mediciones e inmunidad a radio frecuencias y ruido electromagnético, como sus principales ventajas; sin embargo, su uso al día de hoy sigue siendo sumamente restringido, ya que estos, suelen ser generalmente, mucho más frágiles y costosos que los equipos convencionales de medición anteriormente mencionados.

Expuesto lo anterior, resulta evidente que el panorama de instrumentos de medición con los que se dispone actualmente es relativamente amplio, por lo que, en un adecuado e íntegro proyecto de instrumentación, los ingenieros responsables deberán seleccionar los diversos equipos y sensores de medición que mejor se adapten a sus necesidades; así como también, valorar las principales ventajas y desventajas que cada uno de ellos ofrecen.

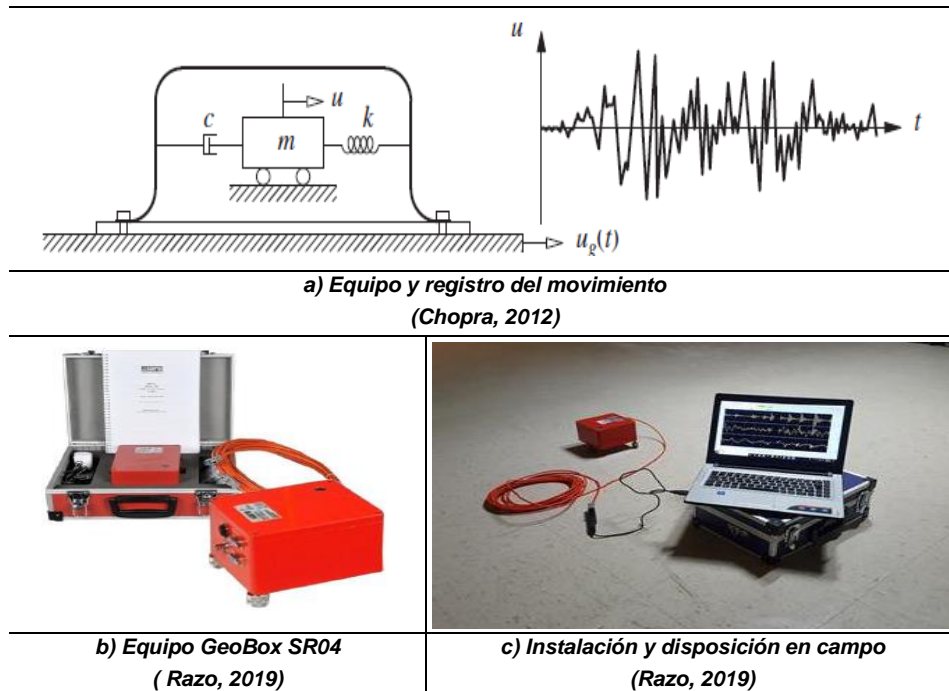
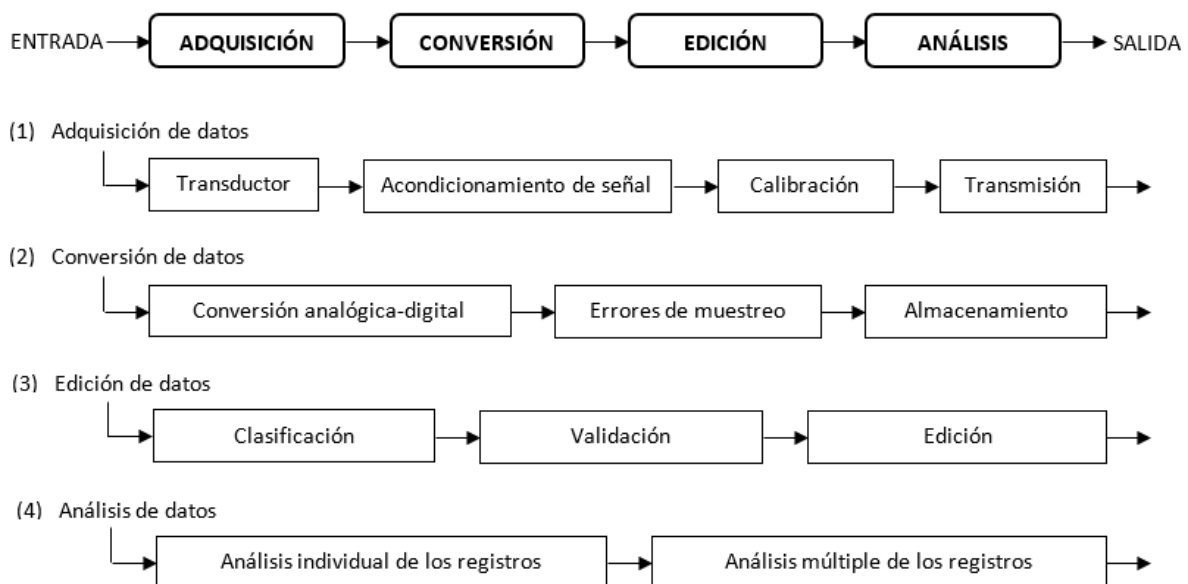


Fig. 3.1. Equipo de medición de vibraciones y registro del movimiento. Ejemplos conceptual y real

3.2.2 Registro y procesamiento de los datos

Por otra parte, las principales características de la colección de datos que conforman los registros experimentales obtenidos mediante los equipos anteriormente mencionados, serán detalladas más adelante en este mismo trabajo (inciso 4.2); mientras tanto, es importante mencionar que, dichos registros pueden ser obtenidos en formatos tanto analógicos (continuos) como digitales (discretos). Generalmente, y en cualquiera que sea el caso, analizar directamente la información dada por cualquiera de estos equipos resulta prácticamente imposible, por lo cual, los datos recabados, requerirán la aplicación de procedimientos especiales y tratamientos previos a ser utilizados para su análisis definitivo.

Al conjunto de operaciones necesarias que abarca desde la obtención de los datos hasta la disposición final para su análisis, se conoce como: *adquisición y procesamiento de datos*. Dichas operaciones se dividen comúnmente en cuatro categorías principales (Bendat y Piersol, 2010): (1) Adquisición, (2) Conversión, (3) Edición y (4) Análisis, como se muestra en la siguiente fig. 3.2.



**Fig. 3.2. Secuencia en la adquisición y procesamiento de datos
(Adaptado de Bendat y Piersol, 2010)**

Adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos se refiere a la forma en la que estos son obtenidos. El proceso inicia desde el elemento transductor, que caracteriza la señal del fenómeno físico medido para posteriormente ser calibrada y acondicionada (restauración, amplificación y filtrado); finalmente, la señal se transmite por medio de cables, de forma inalámbrica o bien, por una combinación de ambas formas hacia consolas o dispositivos de almacenamiento.

Conversión de datos

Adicionalmente, cuando así sea requerido, un dispositivo convertidor análogo digital (ADC) deberá ser utilizado para digitalizar el registro o señal original; esto es, migrar de una señal continua de valores incontables a una serie de valores discretos. De esta forma, se favorece el manejo y almacenamiento de la información, así como la programación, operación y análisis de los mismos, teniendo siempre en cuenta, los errores inherentes asociados a la frecuencia de muestreo o intervalos de tiempo elegidos en el proceso de migración del formato.

Edición de datos

Por otra parte, previo a su edición definitiva, es importante procurar una inspección detallada de los datos experimentales anteriormente recolectados; que permitan, en una primera instancia, ser adecuadamente clasificados, para posteriormente, ser validados mediante la identificación de posibles datos o elementos anómalos y, por último, depurarlos en caso de ser necesario.

Análisis de datos

Finalmente, el registro definitivo de los datos es analizado ya sea de forma individual o conjunta, mediante técnicas conocidas como de identificación de sistemas; las cuales, permiten normalmente la realización de su estudio vía funciones de correlación o bien, mediante el empleo de funciones de densidad espectral (Bendat y Piersol, 1993). Esto es:

- a) Funciones de correlación $R_{xx}(\tau)$, empleadas comúnmente como una medida de similitud entre datos, mediciones en sus tiempos de retraso y detección de periodicidades.
- b) Funciones de densidad espectral $S_{xx}(f)$, las cuales definen la composición frecuencial de los datos recabados, permitiendo identificar diversas fuentes de ruido y energía contenidos en sus registros, así como determinar e incluso predecir, las principales cualidades o rasgos característicos que definen el comportamiento de diversos tipos de sistemas.

3.3 Tipos de pruebas de medición de vibraciones

Una vez descritas las principales características de los instrumentos de medición y la forma en la que estos adquieren la información necesaria para su posterior tratamiento, resulta conveniente señalar que el monitoreo de vibraciones en sistemas estructurales es comúnmente clasificado en función de la magnitud y tipo de excitación que obra sobre dichos sistemas. Si bien existen muchas formas de clasificar a las pruebas de medición de vibraciones en estructuras, tales como: naturales (viento, sismo, oleaje) o artificiales (mesa vibradora), estacionarias (osciladores mecánicos) o transitorias (explosiones), periódicas (senoidales, secuencias de pulsos) o aleatorias, entre otras (González Alcorta, 1989); se distingue ordinariamente a dos tipos de estas pruebas: (1) Vibración ambiental y (2) Vibración forzada.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

La principal diferencia entre estos dos tipos de pruebas radica en los niveles de excitación que obran sobre el sistema estructural; siendo las primeras, aquellas en las que se producen las más bajas amplitudes, a tal grado que pueden llegar incluso, a ser imperceptibles a la respuesta y sensibilidad humana; en contraste, con las pruebas de vibración forzada, en las cuales se inducen niveles de excitaciones y demandas mucho mayores que las anteriores.

3.3.1 Pruebas de vibración ambiental

Las pruebas de vibración ambiental, son métodos experimentales basados en pequeños niveles de excitación que consisten en medir las vibraciones que se presentan en las estructuras producto de diversas fuentes de carácter ambiental, tales como: las producidas por el tránsito de vehículos, el paso de las personas o usuarios, el flujo del viento, entre otras (Murià Vila y González Alcorta, 1995). En ellas, se considera que las estructuras son excitadas en todos sus modos naturales de vibración por igual, tratando tanto a la fuente de excitación externa incidente sobre el sistema, así como al movimiento o respuesta de este mismo, como fenómenos que describen un proceso de naturaleza estocástica; por lo cual, su estudio y aplicación se basan en los principios del análisis estadístico de las muestras o registros obtenidos, tal y como se mencionará más adelante.

Puesto que la vibración ambiental estructural resulta ser una prueba no destructiva y prácticamente poco invasiva, es importante mencionar que, una de las mayores ventajas que ofrece su empleo es, sin duda, la no interferencia con las actividades cotidianas del inmueble instrumentado; además de ser un método relativamente simple y rápido en su ejecución, ya que el realizar pruebas de este tipo, requiere de tan solo unos cuantos minutos de duración, dependiendo de las necesidades, complejidades y características propias del sistema estructural a instrumentar.

Debido a lo anterior, las pruebas de vibración ambiental son los métodos de mayor recurrencia en el medio para el monitoreo de movimientos en estructuras, permitiendo la determinación experimental de sus principales características dinámicas, tales como: frecuencias y formas naturales de vibración, fracciones modales de amortiguamiento crítico, efectos de su interacción con el suelo, etc., y con ello, proporcionar información relevante acerca del comportamiento elástico de los sistemas; lo cual resulta conveniente en la validación de los criterios de análisis y diseño convencional de los mismos, así como en la selección y evaluación de las diferentes técnicas de rehabilitación o reforzamiento, estableciéndose como un parámetro primordial en el cuidado de la salud y seguridad estructural.

3.3.2 Pruebas de vibración forzada

Por su parte, las pruebas de vibración forzada son aquellas en las que se efectúa la medición de la respuesta estructural, comúnmente por medio de fuentes de excitación mecánica o artificial perfectamente conocidas y controladas, tales como: gatos hidráulicos, grúas, martillos de impacto, osciladores mecánicos, mesa vibradora, entre otras. Debido a ello, su aplicación es normalmente mucho más restringida que las anteriores, puesto que se requiere de una mayor inversión de recursos para llevarlas a cabo, además de la interrupción temporal de las operaciones del inmueble.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

La ventaja de este tipo de pruebas es, que permiten conocer el comportamiento de las estructuras a niveles de esfuerzo mucho mayores de los que comúnmente se exhiben en vibración ambiental, más aún, cuando se trata, por ejemplo, de fuentes naturales de excitación como las producidas en los intensos eventos sísmicos. Las mediciones realizadas a partir de la ocurrencia de dichos eventos, suelen ser clasificadas por separado, sin embargo, para su análisis, bien pueden tratarse como vibraciones del tipo forzado, cuyos efectos pueden llegar a provocar grandes demandas y respuestas inelásticas en las estructuras, permitiendo el estudio de su comportamiento hasta la posible manifestación de su colapso. Estas últimas, requieren de una instrumentación permanente, ya que la ocurrencia de sismos intensos es poco frecuente, por lo cual, se necesita de una inversión todavía mayor de recursos en tiempo y costo para su ejecución.

Es importante mencionar que, tanto las pruebas de vibración ambiental como de vibración forzada, han sido ampliamente discutidas y críticamente comparadas en diversos estudios tanto nacionales como internacionales, muestra de ello, son publicaciones como las realizadas por: Trifunac (1972), Futch (1978), Murià Vila y González (1995), Murià Vila *et al.* (2000), Murià Vila *et al.* (2004), Clinton *et al.* (2006), Henao *et al.* (2014), etc., en donde las diferentes técnicas utilizadas para cada caso particular de estudio, ofrecen generalmente resultados adecuados y consistentes entre sí.

Por otra parte, en estos y muchos otros estudios más, se resalta el hecho de que los parámetros dinámicos obtenidos experimentalmente, no son un invariante absoluto del sistema, ya que muestran ser sensibles a la magnitud de la excitación, incluso aún, sin exhibir un daño estructural aparente. Dichas variaciones no están bien definidas y comprendidas del todo, sin embargo, sugieren atribuirse principalmente a la participación y reacomodo de elementos no estructurales, efectos de interacción suelo-estructura, flexibilidad del diafragma de piso, efectividad en las juntas constructivas, la combinación de una o más de las anteriores, etc.; por lo que, un aspecto importante para la comunidad ingenieril y las buenas prácticas en general es, valorar los alcances y limitaciones que ofrecen cada una de estas pruebas, teniendo en cuenta que diversas fuentes e inconsistencias estarán comúnmente presentes y con ello, favorecer la correcta interpretación de los resultados.

3.4 Monitoreo de la salud estructural (MSE)

3.4.1 Definiciones

Las pruebas de medición de vibraciones anteriormente mencionadas, constituyen a penas uno de los tantos aspectos que engloban un proceso conocido como: monitoreo de la salud estructural. El Monitoreo de la Salud Estructural (MSE) o Structural Health Monitoring (SHM) en inglés, aunque no es un concepto totalmente novedoso, es un término cada vez más utilizado en las últimas décadas para describir a todo un conjunto de acciones y sistemas implementados en aras de preservar la integridad y funcionalidad de un sistema estructural. Conviene mencionar que, el campo del MSE es bastante amplio y su aplicación no es exclusiva de la ingeniería civil, puesto que es de interés en diversas áreas de la ingeniería como la mecánica y aeronáutica; debido a ello, existe una gran variedad de puntos de vista en su significado y no hay una definición consensuada del término.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Farrar *et al.* (2001), por ejemplo, definen al MSE como un proceso que implica la inspección de un sistema estructural en el tiempo, realizando mediciones continuas o periódicas de su respuesta dinámica por medio de diferentes herramientas que permitan determinar su estado y condiciones actuales o futuras. Por su parte, Aktan *et al.* (2001), describen al MSE como el diagnóstico y pronóstico de la forma en la que se desempeña un determinado sistema estructural, manteniendo su funcionalidad en cada uno de sus estados límite. Finalmente, Brownjhon (2007), menciona que el MSE es la implementación de un sistema de monitoreo continuo, cuyo propósito es asistir e informar oportunamente al usuario acerca del comportamiento que guardan las estructuras bajo cambios graduales o repentinos en su estado.

Se puede decir entonces que, varios autores concuerdan en que el MSE no es una actividad aislada, sino más bien un proceso holístico de continua inspección en el tiempo que, permite evaluar el comportamiento de un sistema estructural y con ello, determinar si una estructura posee la capacidad para desempeñar las funciones para la cual fue originalmente concebida.

3.4.2 Aplicaciones y estrategias de implementación

A continuación, se identifican los casos y motivos en los cuales el monitoreo estructural es normalmente requerido (Brownjhon *et al.*, 2004; Brownjhon, 2007):

- a) Evaluación post-sísmica de la integridad estructural.
- b) Seguridad y comportamiento de estructuras afectadas por trabajos externos.
- c) Validación de las técnicas de rehabilitación y modificaciones en estructuras existentes.
- d) Evaluación de sistemas novedosos de construcción.
- e) Inconvenientes en el funcionamiento e indicios de daño evidente.
- f) Monitoreo con fines de investigación, retroalimentación en los procesos de diseño, etc.

Si bien en su forma más simple, el MSE recurre a evaluaciones cualitativas acerca del estado y condiciones que guarda un determinado sistema estructural (*e.g.*, inspección visual de agrietamientos, deformaciones, desprendimientos, deterioro, etc.); cabe mencionar que, dependiendo del uso e importancia de la estructura, deberán implementarse mejores programas de seguimiento y monitoreo, que resulten ser adecuados conforme a las necesidades del proyecto y, que pueden llegar inclusive, a ser ordenados por leyes o mandatos de carácter obligatorio.

Al respecto, el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 2019) en su artículo 165, señala que, deberán ser instrumentadas permanentemente estructuras como las pertenecientes al grupo A y subgrupo B1, localizadas en zona de lago tipo III y aquellas que posean más de 15 m de altura o 3,000 m² de superficie construida; sin embargo, conviene mencionar que las formas, propósito y disposición final de los resultados, son poco claros hasta el momento. Por su parte, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-2020, 2020) en su apéndice B, solo recomiendan el monitoreo dinámico en sistemas equipados con disipadores de energía, con fines de inspección en su comportamiento, pretendiendo así, el monitoreo de sistemas constructivos relativamente novedosos dentro de la ciudad; aunque existe aún mucha ambigüedad al respecto.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Las disposiciones anteriores, en conjunto con las nuevas Normas Técnicas Complementarias para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones (NTC-RSEE-2017, 2017), constituyen un primer intento en regular la operación, estado actual y mantenimiento de las estructuras urbanas existentes. Disposiciones legales como estas, son sin duda, escasas en nuestro país y existe todavía, mucho trabajo por realizar al respecto.

Por otra parte, en cuanto a las estrategias adoptadas en la realización de proyectos de seguimiento y monitoreo de la salud estructural (fig. 3.3), se distinguen normalmente a dos grandes grupos: estrategias de monitoreo global y monitoreo local. Generalmente, dichos enfoques de aplicación proporcionarán diferentes tipos de información y, con ello, la implementación de consideraciones especiales para efectos de su análisis.

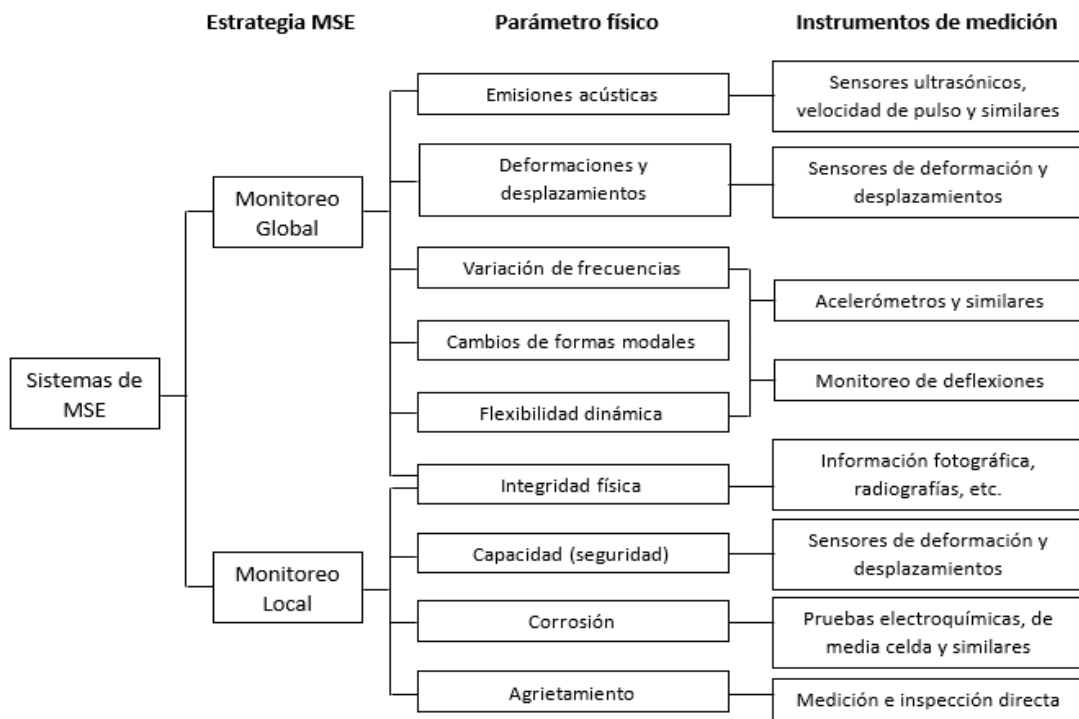


Fig. 3.3. Monitoreo de la Salud Estructural: Estrategias de implementación (Chen, 2018)

Las estrategias de monitoreo global, por ejemplo, son normalmente elegidas cuando la accesibilidad a zonas o partes específicas de una estructura se encuentran, por algún motivo, restringidas; para ello, el acelerómetro es quizás, el instrumento de mayor conveniencia para medir la respuesta del sistema estructural. Mediante los registros de aceleración obtenidos, es posible, como ya se ha mencionado con anterioridad, determinar los parámetros que gobiernan el comportamiento dinámico del sistema estructural. Por su parte, se recurre a las estrategias de monitoreo local, cuando se requiere la evaluación de un área o elemento estructural en específico. Debido a que son complementarias entre sí, resulta deseable entonces, que se adopten ambas estrategias de monitoreo en conjunto (lo cual rara vez se hace); recurriendo en primera instancia al monitoreo global del sistema y con ello, identificar las posibles zonas de comportamiento anómalo, las cuales deberán ser estudiadas con mayor nivel de detalle, por medio de métodos de monitoreo locales.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Pese a la importancia de ambas estrategias, únicamente el enfoque global del monitoreo estructural ha sido el modelo de mayor recurrencia en el medio para evaluar la seguridad de las estructuras, cuya premisa básica se centra en los cambios de la respuesta dinámica del sistema, debido a la posible existencia de daño en sus elementos resistentes; sin embargo, es importante mencionar que, con las herramientas y metodologías actualmente disponibles, resulta prácticamente imposible identificar daño con exactitud a niveles en demasía específicos, nivel elemento o similares.

Se aclara que, en su forma más general, el daño es definido como los cambios introducidos en un sistema cualquiera (materiales, geometría, etc.), afectando de manera adversa a su comportamiento actual o futuro. Además, existen también en la literatura especializada, diversos métodos de detección del mismo y, para evaluar su alcance y efectividad, se distinguen comúnmente los siguientes cuatro niveles de detección de daño (Rytter, 1993; Doebling *et al.*, 1998):

- Nivel 1: Detección. Determinar si existe o no, daño en la estructura.
- Nivel 2: Localización. Si existe daño, localizarlo.
- Nivel 3: Cuantificación. Evaluación de la severidad de daño.
- Nivel 4: Pronóstico. Determinar el tiempo de vida remanente de la estructura.

Al día de hoy, la identificación del daño basado en el monitoreo de vibraciones, empleando técnicas de análisis convencionales del tipo no paramétrico y similares a las que se utilizan en este trabajo, proporcionan, en el mejor de los casos, información relevante correspondiente a los niveles 1 (uno) y 2 (dos) de detección del daño; mientras que, el alcance del resto de ellos, recae en métodos analíticos específicos (*e.g.*, Escobar *et al.* 2001, 2005 y similares). Infortunadamente, no todos los métodos de monitoreo y de detección de daño cubren en su totalidad los cuatro niveles anteriormente mencionados, puesto que el campo continúa actualmente en desarrollo.

Se aclara además que, a pesar de su estrecha relación, debe evitar confundirse el proceso del MSE con alguno de los métodos de detección de daño existentes en la literatura; ya que el primero, como se ha mencionado, es un procedimiento integral, que continuamente capta y proporciona información relevante acerca del comportamiento de una estructura instrumentada, mientras que el segundo, consiste más bien, en un algoritmo o formulación matemática forjada a partir de los datos experimentales recolectados por el primero.

3.4.3 Comentarios adicionales

Expuesto el panorama anterior, resulta evidente que el MSE se establece de a poco, como una necesidad creciente en aras de preservar la integridad y funcionalidad de cualquier tipo de estructura instrumentada; promoviendo con ello, el primer y más básico de sus objetivos: salvaguardar la seguridad de vida al público usuario. Actualmente, pese a ser una disciplina relativamente emergente, el MSE ha alcanzado cierta madurez, sin embargo, debido al dinamismo y persistente avance tecnológico, este es un campo que constantemente se encuentra en desarrollo; por ello, existen aún, sin duda, ciertas áreas de oportunidad y mejora que deberán ser exploradas e implementadas a futuro, en favor de su crecimiento.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

A corto plazo, por ejemplo, no se espera que el MSE *per se*, tenga capacidad inherente para localizar, cuantificar y pronosticar daño con exactitud (Farrar y Lieven, 2007) y, aunque muchos equipos de investigación se encuentran actualmente progresando en esta área, todavía no es una realidad el obtener información confiable a nivel componente respectivamente. Por lo tanto, los objetivos empleando técnicas y estrategias de monitoreo a nivel global (e.g. pruebas de vibración ambiental, vibración forzada, etc.), son un tanto más realistas y dicho con franqueza, menos optimistas; centrándose por ahora, en la implementación de sistemas automatizados que provean de información confiable y oportuna, acerca del estado que guardan las estructuras.

Al respecto, se resalta el hecho de que el usuario necesita información, no datos. Por lo que el MSE debe evolucionar e ir mucho más allá de la simple recopilación y almacenamiento de datos, integrando, como se mencionó, sistemas de medición y control automatizados que faciliten el manejo de la máxima cantidad de estos, en un mínimo tiempo y, al menor costo posible; aunque para ello, deberán resolverse ciertos aspectos adicionales como: la eficiencia y consumo de energía de los instrumentos, autonomía, durabilidad de sus baterías, capacidad de almacenamiento, etc.

Así pues, a medida que la instrumentación estructural permanente con fines del MSE evolucione, lo hará integrando procesos holísticos de mayor complejidad, que le permitirán ofrecer una perspectiva íntegra acerca del estado que guardan las estructuras, realizando análisis y diagnósticos de forma rápida y certera, que resulten oportunos ante cualquier situación que comprometa o afecte de manera adversa a la integridad estructural, procurando inclusive, la seguridad de vida de operarios y/o usuarios dentro de la misma.

Capítulo 4

Fundamentos del análisis de señales

4.1 Antecedentes

La búsqueda de metodologías adecuadas que permitan realizar interpretaciones acertadas acerca de los registros o datos experimentales provenientes de estructuras instrumentadas, ha dado origen al desarrollo de procedimientos analíticos comúnmente conocidos como *técnicas de identificación de sistemas*; con las cuales, es posible determinar las propiedades dinámicas de un sistema físico cualquiera, a partir del estudio de los registros o señales en el dominio del tiempo y, principalmente, en la frecuencia (Ewins, 1986; Bendat y Piersol, 1993; Bendat y Piersol, 2010).

Para ello, resulta necesario determinar analíticamente, la forma en la que se encuentran relacionadas las diferentes señales de excitación o de entrada [$F(t)$ o $x(t)$], incidentes en el sistema particular en estudio, con las señales de respuesta o salida del mismo [$u(t)$ o $y(t)$], incluyendo desde luego, la inherente presencia de fuentes externas de ruido aleatorio dentro del proceso [$n(t)$], valiéndose normalmente, del estudio de modelos matemáticos característicos del comportamiento de *sistemas físicos ideales*; es decir, sistemas físicos lineales de parámetros constantes (fig. 4.1). Estos, comúnmente son analizados vía *funciones de correlación* o *funciones de densidad espectral*, tal y como se mencionó brevemente en párrafos anteriores de este trabajo (inciso 3.2.2).

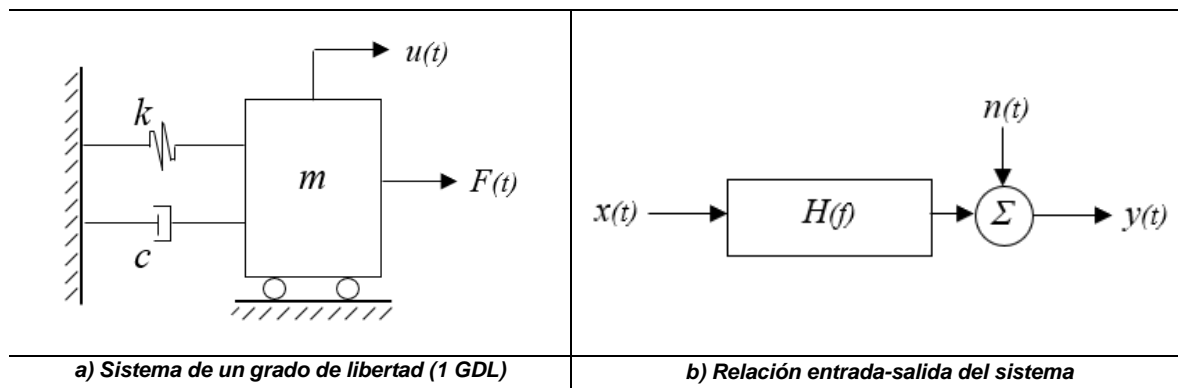
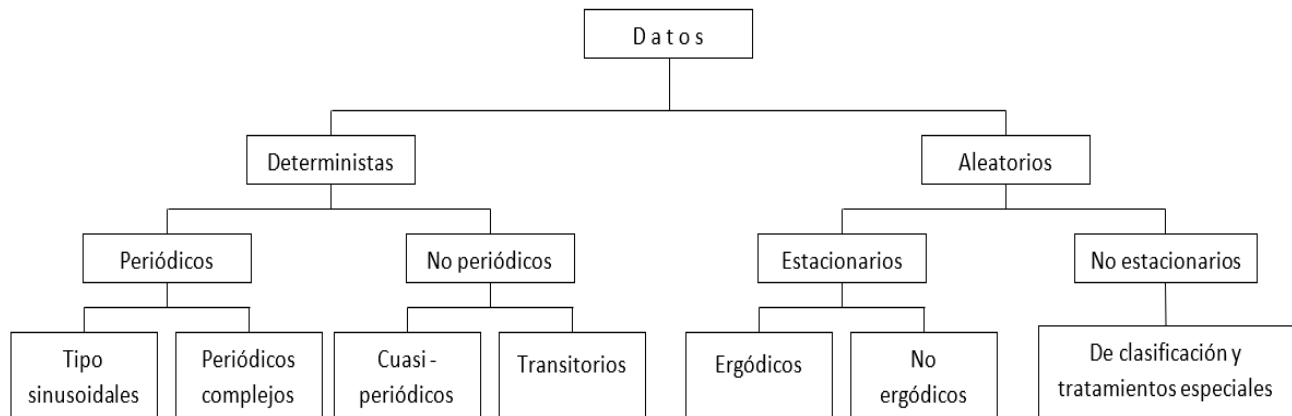


Fig. 4.1. Modelo de un sistema físico cualquiera: relaciones entrada-salida
(Adaptado de Bendat y Piersol, 2010)

4.2 Tipos de datos y sus características

El resultado de contar con una estructura instrumentada, la cual puede estar sujeta a cualquiera de las diferentes pruebas de medición de vibraciones anteriormente descritas, es la colección de una gran cantidad de información acerca del comportamiento de la misma; sin embargo, previo a discutir con más detalle los procedimientos y planteamientos comúnmente adoptados para su análisis, resulta indispensable conocer el tipo de datos con los que se dispone, así como el identificar sus principales características (Castelán, 2001).

Recordar que, todo fenómeno físico puede ser descrito por medio de observaciones experimentales, las cuales, conforman una serie de datos comúnmente representados en términos de una amplitud o cantidad física cualquiera (e.g. fuerza, aceleración, desplazamiento, etc.) contra el tiempo (variable independiente por excelencia). Al conjunto de esta serie de datos se conoce como *señal* o *registro*; cuyos datos, generalmente, pueden ser de naturaleza tanto determinista como aleatoria (fig. 4.2).



**Fig. 4.2. Clasificación del tipo de datos
(Adaptado de Bendat y Piersol, 2010)**

Los *datos deterministas* son aquellos que pueden describir un fenómeno físico de manera razonable por medio de relaciones o formulaciones matemáticas explícitas, por ejemplo, la deformación axial de una barra con propiedades y cargas conocidas, el movimiento oscilatorio de cuerpos rígidos como el mostrado en la figura anterior (fig. 4.1 a), la posición de un satélite en órbita rondando la tierra, etc.

Los *datos aleatorios* (no deterministas) describen al fenómeno físico observado únicamente por medio de principios probabilísticos y procedimientos estadísticos, debido a que cada una de las observaciones del fenómeno es única y no hay forma de predecir un valor exacto en un futuro o instante de tiempo determinado. Ejemplo de ello son los movimientos registrados en eventos sísmicos o de vibración ambiental, los cambios de temperatura durante el día, fuerza del viento, etc.

Dicha clasificación suele ser debatida en muchos casos, sin embargo, en términos prácticos, la decisión de clasificar los datos ya sea de forma determinista o aleatoria, radica en la habilidad de poder reproducirlos con exactitud razonable, por medio de experimentos idealmente controlados.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Para ilustrar algunos ejemplos del tipo de datos y sus características, considere un registro en el tiempo cualquiera $x(t)$ (fig. 4.3a), el cual puede ser representado por medio de una transformación matemática en el dominio de la frecuencia (inciso 4.3). Si dicho registro fuese una señal perfectamente sinusoidal, su representación en la frecuencia resultaría en un espectro discreto de única amplitud (fig. 4.3b), en cambio si esta fuese periódica compleja, su representación consideraría a más de un solo contenido armónico con múltiplos de su frecuencia fundamental (fig. 4.3c). En caso de ser una señal conformada por datos cuasi-periódicos, la única diferencia con respecto a la anterior será, que los componentes frecuenciales de dicho espectro no estarán relacionados exactamente de forma racional (fig. 4.3d). Por otra parte, si los datos no son el caso de ninguno de los anteriores, su representación en la frecuencia resulta ser de forma continua (fig. 4.3e), ya que es imposible obtener un espectro discreto de amplitudes en la frecuencia como en los casos anteriores, pudiendo existir incluso, cualquier combinación de las características anteriores.

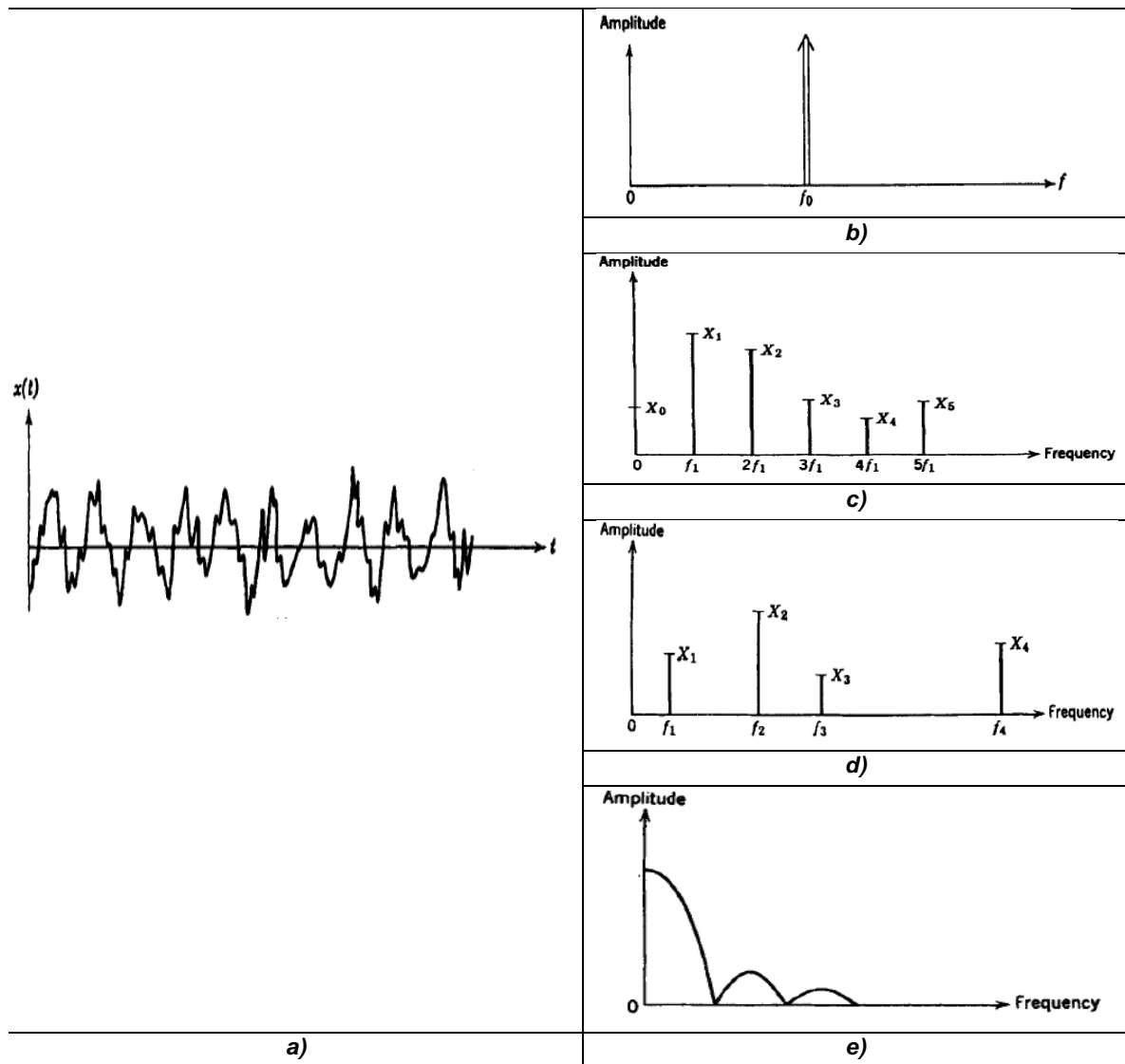
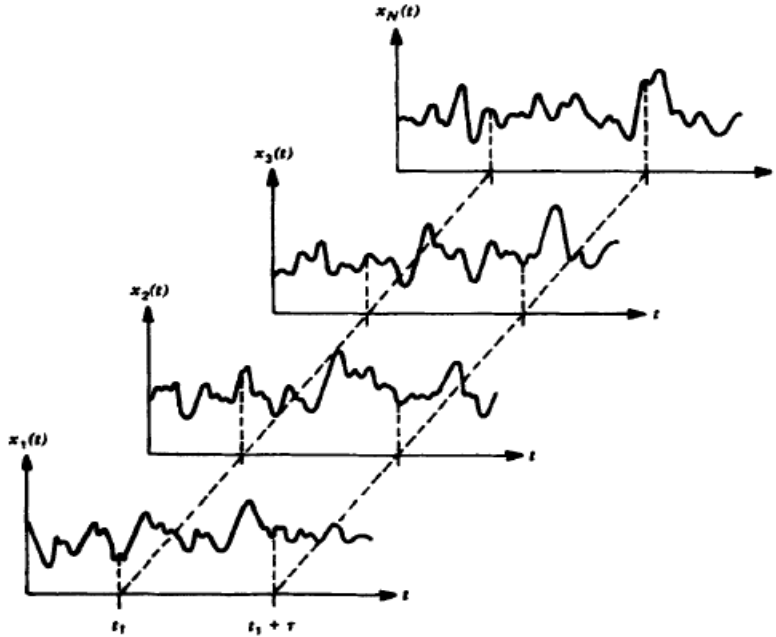


Fig. 4.3. Registro de datos en el tiempo considerando diferentes características

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Por otra parte, para definir un *proceso aleatorio* o *estocástico* $\{x_k(t)\}$ (fig. 4.4), como el que resulta de realizar pruebas de medición de vibraciones en estructuras, será necesario considerar a todo un *conjunto* o *ensamble* de *funciones individuales* o *registros muestra* $x_k(t)$. En tal caso, dicho proceso puede ser descrito mediante sus propiedades estadísticas promedio, es decir: valor medio, media cuadrática y función de autocorrelación (ec. 4.1 a 4.3), para cada instante de tiempo (t). Si estas propiedades permanecen constantes a lo largo del tiempo en ($t + \tau$), dicho ensamble de registros corresponderá a un proceso aleatorio *estacionario*; en caso contrario, será *no estacionario*.



**Fig. 4.4. Ensamble de registros en el tiempo definiendo un proceso aleatorio
(Bendat y Piersol, 2010)**

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \quad (4.1)$$

$$\psi_x^2(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2(t_1) \quad (4.2)$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1)x_k(t_1 + \tau) \quad (4.3)$$

Particularmente, se dice que un proceso aleatorio estacionario es además *ergódico*, únicamente cuando las propiedades estadísticas que describen a dicho proceso o ensamble $\{x_k(t)\}$, son iguales a las obtenidas a partir de una sola función o registro muestra individual $x_k(t)$; es decir: $\mu_x = \mu_x(k)$, $\psi_x^2 = \psi_x^2(k)$, $R_{xx} = R_{xx}(k)$. Consecuentemente, en un proceso aleatorio estacionario y además ergódico, bajo ciertas condiciones, es posible derivar la información estadística deseada del proceso, a partir de un análisis apropiado de un solo registro individual arbitrario; simplificación comúnmente adoptada en el análisis de señales estructurales e identificación de sistemas en general.

4.3 Análisis de Fourier

El análisis espectral de las señales o análisis de Fourier, es la principal herramienta en el estudio y aplicación de técnicas de identificación de sistemas. En esencia, dicho análisis consiste en la representación de una señal en el llamado *dominio de la frecuencia*, a partir de esta misma originalmente concebida en el *dominio del tiempo*; bajo el hecho de que, y solo con algunas muy pocas restricciones existentes en la literatura (condiciones de Dirichlet), las señales pueden ser determinadas a partir de una serie infinita de componentes o funciones trigonométricas senoidales y cosenoidales llamadas *armónicos*. La superposición de dichos componentes armónicos a diferentes amplitudes y frecuencias, dan como resultado el registro o señal original en el tiempo (fig. 4.5).

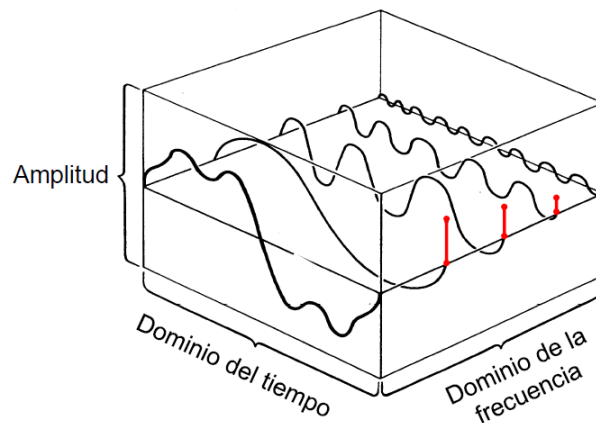


Fig. 4.5. Análisis espectral de una señal o registro cualquiera: representación gráfica (Murià Vila, 2019)

4.3.1 Transformada de Fourier

La formulación o algoritmo matemático utilizado, que permite trasladar una señal o registro de datos en el tiempo al dominio de la frecuencia, se conoce como *Transformada de Fourier (FT)*; la cual, en su forma compacta se define como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.4)$$

Donde:

$$j = \sqrt{-1}$$

$x(t)$: es la función en el tiempo de una señal dada.

$X(f)$: es la transformada de Fourier de dicha señal.

O bien, desarrollando la identidad $[e^{-j2\pi ft}]$ en la ecuación anterior, esta puede reescribirse como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi f t) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sen(2\pi f t) dt \quad (4.5)$$

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

De esta forma, es posible notar que la ecuación anterior resulta ser siempre una función compleja, compuesta por una parte real $Re[X(f)]$ y otra imaginaria $Im[X(f)]$, por lo que el *espectro de amplitudes de Fourier* o simplemente *espectro de Fourier* queda definido como:

$$|X(f)| = \sqrt{\{Re[X(f)]\}^2 + \{Im[X(f)]\}^2} \quad (4.6)$$

Análogamente, para el caso de señales discretas y de longitud finita de datos en el tiempo, se utiliza el algoritmo conocido como *transformada discreta de Fourier (DFT)*, cuya representación adopta la siguiente forma:

$$X_k = X(k, \Delta f) = \Delta t \sum_{n=1}^N x_n e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad k = 1, 2, 3 \dots, N \quad (4.7)$$

Cabe mencionar que el cálculo de la DFT involucra N^2 operaciones complejas, puesto que es necesario operar los N datos de la señal original para cada valor de frecuencia k , lo cual resulta demasiado laborioso. Sin embargo, un algoritmo mejorado conocido como *transformada rápida de Fourier (FFT)* o algoritmo de Cooley-Tukey, favorece una reducción sustancial del tiempo y proceso computacional de trabajo en aproximadamente $N(\log_2 N)$ operaciones complejas, para el caso particular en el cual los N datos de una señal resultan ser potencia de 2, decir: $N = 2^p$. Cuando esto no sucede, es necesario adicionar datos nulos al final de las señales o registros para cumplir con dicho requisito; tal aumento en la cantidad de datos no afectará los resultados dentro del proceso.

Por otra parte, es importante mencionar que el número de datos N utilizados para calcular la FFT, influirá directamente en la calidad y detalle de los espectros obtenidos (resolución); ya que este parámetro es sensible al tiempo de duración de la señal. Es decir, dada una señal en el tiempo construida a intervalos Δt igualmente espaciados, asociados a la frecuencia de muestreo f_s inherente a la capacidad del instrumento o equipo de medición adoptado, la resolución del espectro en la frecuencia se establece a partir del espaciado o intervalo de las mismas Δf ; esto es:

$$\Delta t = \frac{T}{N} = \frac{1}{f_s} \quad f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad \Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{1}{T} \quad (4.8)$$

Así como es congruente afirmar que, para una señal en el tiempo, a menor Δt , mayor resolución; para la misma señal en el dominio de la frecuencia, a menor Δf , mayor resolución. Nótese que, esta última mejora a mayor cantidad de datos N , o lo que es lo mismo, a mayor duración de la señal T . Al respecto, existen algunas recomendaciones para obtener resultados confiables en el cálculo de espectros de Fourier y demás cocientes espectrales (Murià Vila y González, 1995); en donde se sugiere el cómputo promedio de los mismos, a partir de seccionar las señales o registros entre 12 y hasta 40 tramos o ventanas de eventos, con una duración de al menos 20 veces el periodo fundamental del sistema estructural, además de cumplir con la relación $f_o/\Delta f \geq 10$, tratando de garantizar así, una resolución en frecuencia Δf congruente con la fundamental f_o de dicho sistema.

4.3.2 Funciones de densidad espectral

Habiendo definido a la transformada y espectro de Fourier, es necesario precisar a continuación el resto de las *funciones de densidad espectral*, conocidas comúnmente como *cocientes espectrales*; los cuales, analizados en conjunto, definen por completo al sistema estructural en estudio.

Espectro de potencia

El *autoespectro* o *espectro de potencia* se define como el producto de la transformada de Fourier por su conjugada compleja, o bien como el cuadrado del espectro de amplitudes de Fourier (ec. 4.9), siendo siempre este resultado, una función real de la frecuencia. Dicho espectro de potencia permite, al igual que el espectro de Fourier, determinar la composición frecuencial de una señal o registro de datos en el tiempo; sin embargo, dada su definición, representa incluso desde la cantidad o contenido energético de dicha señal, hasta la tasa de cambio de su valor medio cuadrático con la frecuencia.

$$S_{xx}(f) = X^*(f) X(f) = |X(f)|^2 \quad (4.9)$$

Donde:

$X(f)$: es la transformada de Fourier de una señal $x(t)$.

$X^*(f)$: es el conjugado complejo de $X(f)$.

Función de transferencia

Cualquier sistema físico lineal de parámetros constantes, puede ser descrito a través de la llamada *función de respuesta en la frecuencia*, conocida también simplemente como *función de transferencia*; la cual, define la relación dinámica existente entre las señales de entrada y salida de dicho sistema.

$$Y(f) = H(f) X(f) \quad (4.10)$$

Donde:

$X(f)$: es la transformada de Fourier de una señal o excitación de entrada $x(t)$.

$Y(f)$: es la transformada de Fourier de una señal o respuesta de salida $y(t)$.

$H(f)$: es la función de transferencia.

La relación anterior se obtiene a partir del cálculo de la transformada de Fourier de la siguiente integral de convolución (ec. 4.11), caso genérico de la comúnmente llamada integral de Duhamel; en la cual, $h(t - \tau)$ se define como la respuesta de un sistema sometido a un impulso unitario de excitación, por lo que $H(f)$ de la ecuación anterior (ec. 4.10), representa a esta misma, pero en la frecuencia.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (4.11)$$

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Así pues, la integral de convolución definida en la ecuación 4.11, se reduce a la simple expresión algebraica de la ecuación 4.10, de tal manera que la función de transferencia se obtiene a partir del cociente entre las señales transformadas de salida y entrada respectivamente, cuya representación se puede mostrar también en su forma polar compleja, de la siguiente manera:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = |H(f)| e^{-j\phi(f)} \quad (4.12)$$

De esta forma, se puede observar que dicha función de transferencia proporciona información relacionada no solo con el llamado *factor de ganancia* del sistema $|H(f)|$, sino que también, información referente al *ángulo de fase* $\phi(f)$ entre señales, el cual será definido posteriormente. Tal factor de ganancia, satisface importantes relaciones y es posible determinarlo a partir de los espectros de potencia $S_{xx}(f)$ y $S_{yy}(f)$ de las señales de entrada y salida respectivamente; es decir:

$$S_{yy}(f) = |H(f)|^2 S_{xx}(f) \quad (4.13)$$

$$|H(f)| = \left[\frac{S_{yy}(f)}{S_{xx}(f)} \right]^{1/2} \quad (4.14)$$

Esta última relación, graficada en un espectro de amplitudes contra la frecuencia, es comúnmente interpretada como una medida de la amplificación del movimiento entre las señales de entrada y salida de un sistema físico cualquiera, o lo que es lo mismo, un *factor de amplificación dinámico* del movimiento en la frecuencia.

Para visualizar este hecho de una mejor forma, considere al sistema de 1GDL de la figura 4.1 mostrado con anterioridad, cuya ecuación de movimiento se establece como:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F(t) \quad (4.15)$$

Recordar que, la respuesta $u(t)$ en el estado estacionario de tal sistema, debida a una fuerza armónica del tipo $F(t) = F_o \text{ sen } \omega t$, puede escribirse como (ec. 4.16). En donde R_d es el *factor de amplificación dinámico* de deformación, el cual relaciona la amplitud de deformación dinámica u_o sobre la estática $(u_{st})_o$ (ec. 4.17); mientras que ϕ es el *ángulo de fase*, cuya presencia implica siempre, un retraso en el tiempo de la respuesta con respecto de la excitación igual a $\phi/2\pi$ (ec.4.18).

$$u(t) = (u_{st})_o R_d \text{ sen}(\omega t - \phi) \quad (4.16)$$

$$R_d = \frac{u_o}{(u_{st})_o} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (4.17)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (4.18)$$

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Ahora bien, el hecho de analizar la respuesta del mismo sistema en el llamado dominio de la frecuencia, con $\omega = 2\pi f$, debe conducir necesariamente a la misma solución mostrada en las ecuaciones anteriores. Para ello, si se considera ahora a la fuerza externa como:

$$F(t) = 1e^{j\omega t} = 1(\cos \omega t + j \operatorname{sen} \omega t) \quad (4.19)$$

La respuesta $u(t)$ del sistema y sus respectivas derivadas, ante dicha excitación armónica de amplitud unitaria, pueden expresarse como (ec. 4.20); en la cual, $H(\omega)$ aún queda por determinar.

$$u(t) = H(\omega)e^{j\omega t}; \quad \dot{u}(t) = j\omega H(\omega)e^{j\omega t}; \quad \ddot{u}(t) = -\omega^2 H(\omega)e^{j\omega t} \quad (4.20)$$

Sustituyendo la ecuación anterior (ec. 4.20) en la ecuación de movimiento (ec. 4.15) resulta:

$$H(\omega)e^{j\omega t}(-\omega^2 m + j\omega c + k) = e^{j\omega t} \quad (4.21)$$

Cancelando el término $e^{j\omega t}$ en ambos lados de la ecuación anterior y despejando $H(\omega)$ se obtiene (ec. 4.22); la cual, se reescribe a su vez como (ec. 4.23), en donde: $\omega_n = \sqrt{k/m}$ y $\xi = c/2m\omega_n$.

$$H(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 m + j\omega c + k} \quad (4.22)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{k} \frac{1}{[1 - (\omega/\omega_n)^2] + j[2\xi(\omega/\omega_n)]} \quad (4.23)$$

Finalmente, el módulo de la función compleja anteriormente mostrada, puede expresarse de la siguiente forma (ec. 4.24); mientras que el ángulo de fase ϕ , se obtiene al relacionar tanto la parte real ($\operatorname{Re}[H(\omega)]$) e imaginaria ($\operatorname{Im}[H(\omega)]$) de dicha función (ec. 4.25). Esto es:

$$\frac{|H(\omega)|}{(u_{st})_o} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (4.24)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-\operatorname{Im}[H(\omega)]}{\operatorname{Re}[H(\omega)]} = \tan^{-1} \frac{2\xi(\omega/\omega_n)}{1 - (\omega/\omega_n)^2} \quad (4.25)$$

Nótese que, las ecuaciones de solución en el tiempo (ec.4.17 y ec. 4.18) son el equivalente a las ecuaciones de solución en el dominio de la frecuencia, con $\omega = 2\pi f$ (ec. 4.24 y 4.25); estas últimas, fueron nombradas previamente como factor de ganancia $|H(f)|$ y ángulo de fase $\phi(f)$ respectivamente (ec. 4.12). En otras palabras, estas cantidades describen de igual forma la respuesta del sistema físico analizado, pero en diferentes dominios.

Espectro cruzado de potencia

El *espectro cruzado de potencia* se define como el producto de la transformada de Fourier conjugada de una señal de entrada $x(t)$ por la transformada de Fourier de la señal de salida $y(t)$. Tal espectro cruzado representa un vínculo entre dichas señales y su cálculo es de suma relevancia puesto que, a partir de este, es posible definir al resto de las funciones de densidad espectral.

$$S_{xy}(f) = X^*(f) Y(f) = |S_{xy}(f)| e^{-j\phi_{xy}(f)} \quad (4.26)$$

Donde:

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

$Y(f)$: es la transformada de Fourier de una señal de salida $y(t)$.

$S_{xy}(f)$: es el espectro cruzado de potencia.

Ángulo de fase

El *ángulo de fase* entre dos señales representa el grado de sincronía existente en ellas, puesto que, al haber un ente de por medio entre la señal de entrada (excitación) y la señal de salida (respuesta) dentro del sistema analizado, existirá siempre una diferencia o retardo en el tiempo de sus llegadas, calculado normalmente en términos de un desfaseamiento o cantidad angular.

El ángulo de fase puede ser calculado a partir de la función de transferencia entre las señales de entrada y salida del sistema, tal y como se mostró anteriormente; sin embargo, también suele ser definido a partir del espectro cruzado de potencia (ec. 4.26), relacionando tanto su parte real e imaginaria, quedando definido de la siguiente manera:

$$S_{xy}(f) = A_{xy}(f) - jB_{xy}(f) \quad (4.27)$$

$$\phi_{xy}(f) = \tan^{-1} \frac{-\text{Im}[S_{xy}(f)]}{\text{Re}[S_{xy}(f)]} = \tan^{-1} \frac{B_{xy}(f)}{A_{xy}(f)} \quad (4.28)$$

Función de coherencia

Finalmente, otro de los parámetros necesarios para el análisis e identificación de sistemas es conocido como *función cuadrada de coherencia* o simplemente *función de coherencia* $\gamma_{xy}^2(f)$. La función de coherencia resulta ser adimensional en la frecuencia, presentando valores comprendidos únicamente entre 0 y 1, es decir:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f) S_{yy}(f)} ; \quad 0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1 \quad (4.29)$$

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Nótese que existe cierta analogía entre la función de coherencia (ec. 4.29) y las medidas de dependencia lineal comúnmente utilizadas en la estadística tales como el llamado *coeficiente de correlación* (ec.4.30); lo cual significa que, dicha función de coherencia permite estimar el grado de linealidad entre dos señales cualquiera, es decir: la entrada $x(t)$ y salida $y(t)$ del sistema.

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}; \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq 1 \quad (4.30)$$

Donde:

ρ_{xy} : coeficiente de correlación.

$C_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$: covarianza.

$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$: desviación estándar del registro o señal $x(t)$.

$\sigma_y = \sqrt{\sigma_y^2} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$: desviación estándar del registro o señal $y(t)$.

Así pues, para un modelo ideal bien definido, similar al mostrado en una figura anterior (fig. 4.1b) pero sin considerar fuentes externas de ruido, la función de coherencia será idéntica a la unidad para toda frecuencia existente, indicando una relación completamente lineal entre las señales de entrada y salida del mismo. Sin embargo, las coherencias obtenidas en la práctica suelen ser a menudo inferiores a la unidad, puesto que tales condiciones ideales no existen y se presentan alteraciones inherentes incluso, al proceso de medición dentro del sistema.

Al respecto, se destaca el hecho de que, si la función de coherencia es mayor a cero e inferior a uno, existirá por lo menos, una o más de las siguientes condiciones (Bendat y Piersol, 2010):

- a) Fuentes externas de ruido están presente en las mediciones.
- b) La relación entre las señales de entrada $x(t)$ y salida $y(t)$ del sistema no es lineal.
- c) La señal de salida $y(t)$ se debe a otras fuentes además de la señal de entrada $x(t)$.

Ante ello, debe tenerse en cuenta que, dichas fuentes externas de excitación o de ruido (e.g. equipo electromecánico, ruido instrumental, estructuras vecinas, etc.), e incluso posible comportamiento inelástico de sistemas a mayores demandas, pueden estar presentes en las señales o registros obtenidos; por lo que deberán ser siempre considerados a fin de evitar interpretaciones equívocas y/o estimaciones inadecuadas en los resultados.

4.3.3 Consideraciones adicionales

Se han descrito hasta ahora, las bases que permiten el cálculo de las funciones espectrales necesarias para realizar el análisis en la frecuencia de las señales o registros de datos obtenidos a partir de pruebas de medición de vibraciones; sin embargo, previo a mostrar su aplicación directa, es necesario considerar algunos aspectos primordiales que influyen directamente durante el proceso de cómputo de tales funciones o cocientes espectrales, los cuales serán detallados a continuación.

Capacidad de muestreo

Uno de los aspectos más importantes que influyen directamente en la obtención de los espectros en la frecuencia de las señales es sin duda, la *capacidad de muestreo* inherente al instrumento o equipo de medición utilizado. Y es que a pesar de que el teorema de muestreo establece que se puede construir una señal continua en el tiempo a partir de muestras discretas colectadas a intervalos regulares de tiempo igualmente espaciados Δt , pueden existir alteraciones importantes en ellas y en su contenido frecuencial si dicho intervalo de muestreo resulta no ser el adecuado.

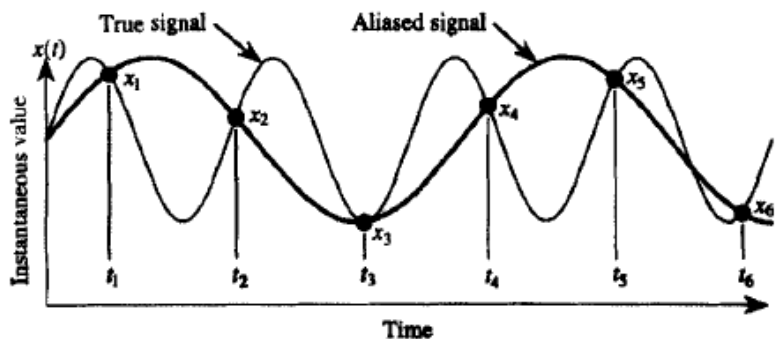
Recordar que, la relación entre el intervalo de muestreo Δt y su valor inverso, conocido como frecuencia de muestreo f_s , fue mostrada previamente en la ec. 4.8, misma que por conveniencia se repite a continuación:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.31)$$

Por otra parte, puesto que la mínima función periódica a detectar es aquella con periodo igual a $2\Delta t$, su valor inverso es conocido como *frecuencia de Nyquist* (ec. 4.32); la cual, se define como la máxima frecuencia que el instrumento de medición es capaz de registrar.

$$f_{Nyq} = \frac{f_s}{2} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (4.32)$$

En caso de que las señales muestreadas posean muy altos contenidos frecuenciales y el equipo de medición no sea apto para capturarlas, se producirán importantes fuentes de error, ejemplo de ello es el comúnmente conocido como *efecto alias* (fig. 4.6); el cual, conlleva confundir bajos componentes frecuenciales dentro de una señal, que bien pueden ser en realidad, componentes de frecuencias mucho mayores. Es por ello que, deberá procurarse en todo caso, que el contenido de frecuencias de las señales que estemos dispuestos a medir sea menor o cuando mucho igual, a la frecuencia de Nyquist reproducida por el instrumento de medición elegido.

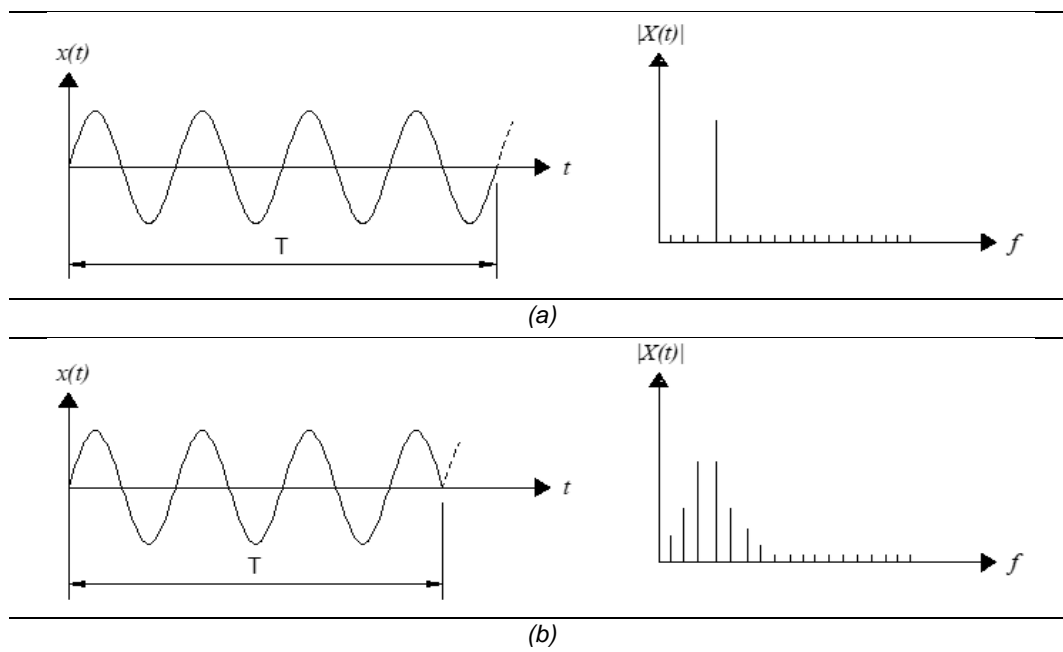


**Fig. 4.6. Efecto alias debido a un muestreo inadecuado de la señal
(Bendat y Piersol, 2010)**

Ventanas de atenuación

Las *ventanas de atenuación* son funciones preestablecidas y perfectamente conocidas, aplicadas directamente a las señales ya sea en el dominio del tiempo o la frecuencia, provocando con ello un cambio en su forma y/o espectro correspondiente. Tal proceso, conocido comúnmente como *tapering* en inglés, se aplica con la finalidad de eliminar la existencia de un fenómeno llamado *fuga espectral*; problema presentado como consecuencia directa de tomar registros con solo cierta longitud finita de datos en el tiempo, produciendo que la señales se corten abruptamente en formas de onda truncada.

El problema de fuga espectral se visualiza de mejor forma en la figura siguiente (fig. 4.7), en la cual dos señales sinusoidales se someten al mismo proceso de análisis. En el primer caso (a), la señal es perfectamente periódica en el tiempo T , lo que resulta en un espectro línea de única amplitud; mientras que en el segundo caso (b), existe una discontinuidad o truncamiento de la señal en su último ciclo, por lo que este queda incompleto y se traduce en un espectro que no indica la frecuencia específica del registro original. En tal caso, se dice que la energía se ha “fugado” o repartido en frecuencias cercanas a la fundamental de dicha señal o registro.



**Fig. 4.7. Longitud del registro y fuga espectral
(Ewins, 1986)**

Recordar que, la obtención del espectro de Fourier mediante sus transformadas, asumen que existe una señal continua en el tiempo de longitud infinita y periodo constante T ; es por ello que, en este último caso, la consideración de periodicidad no es estrictamente válida debido a la presencia de tal discontinuidad. Así pues, debido a que, para eliminar la fuga espectral, la señal registrada tendría que ser de longitud infinita en el tiempo (situación que es imposible de lograr), se recurre al empleo de ventanas de atenuación que minimizan la magnitud de las discontinuidades en los límites de cada periodo, haciéndolas poco partícipes en sus espectros y solventando con ello dicha problemática.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Se destaca el hecho de que, en el análisis de señales existen varios tipos de ventanas de atenuación, siendo las más conocidas las llamadas ventana rectangular, de Hanning y de Hamming (fig. 4.8).

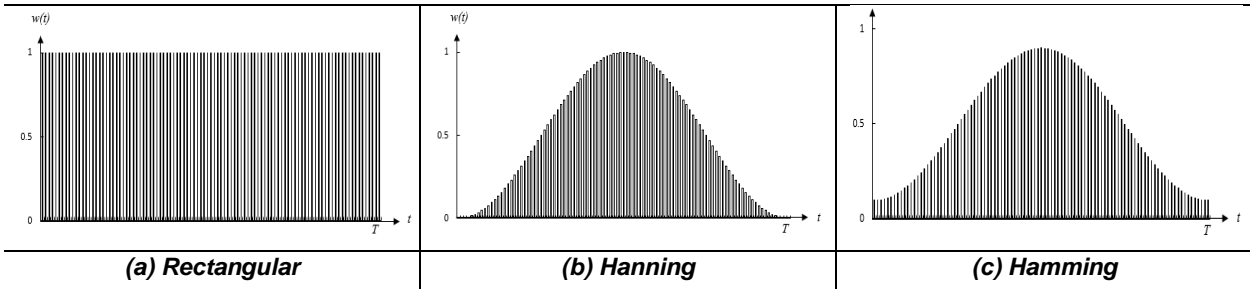


Fig. 4.8. Ventanas de atenuación

La ventana rectangular, de amplitud unitaria en el tiempo (fig. 4.8a), trunca la señal exactamente dentro de un intervalo de tiempo finito T ; y, debido a que esta no afecta de ninguna forma a la señal original en estudio, su uso es limitado, puesto que presenta la mayor cantidad de fuga espectral.

$$w(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{otro} \end{cases} \quad (4.33)$$

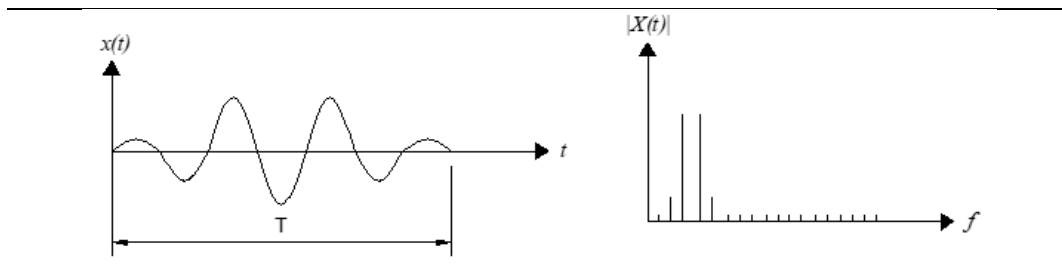
Por su parte, la ventana de Hanning, cuya forma es similar al medio ciclo de la función coseno (fig. 4.8b), es la de mayor recurrencia en el medio, y está definida a partir de la siguiente ecuación:

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 - 0.5\cos(2\pi t/T) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{otro} \end{cases} \quad (4.34)$$

Finalmente, la ventana de Hamming, cuya forma se asemeja a la anterior ventana de Hanning, constituye una versión modificada de esta última, con la particularidad de no acentuarse hasta el valor nulo en sus extremos (fig. 4.8c). Esta última ventana se define como:

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 - 0.46\cos(2\pi t/T) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{otro} \end{cases} \quad (4.35)$$

En la siguiente figura (fig. 4.9) se muestra un ejemplo del efecto de una de las ventanas (Hanning) aplicado al registro anteriormente mostrado (fig.4.7b), y su influencia en el espectro correspondiente. Los resultados en la frecuencia mejoran, por lo que tal proceso deberá ser siempre implementado.



**Fig. 4.9. Efecto de la ventana de Hanning aplicada al registro anterior
(Ewins, 1986)**

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Filtros

Finalmente, otro de los aspectos importantes a considerar dentro del proceso del análisis de señales es el filtrado de las mismas. Y es que, el hecho de aplicar *filtros* a una determinada señal, puede deberse a varias razones, ya sea el aislamiento o eliminación de particulares componentes periódicos dentro de una señal, o bien, como una medida anti-alias previo a la manipulación de datos. Particularmente, cuando se trata de pruebas de mediciones realizadas a estructuras civiles (edificios, por ejemplo), se requiere identificar las frecuencias naturales y modos de vibración que mayormente contribuyen a su respuesta dinámica, restringiendo para ello, la banda de frecuencias de análisis en un rango determinado de valores, lo cual es posible lograr mediante el filtrado de sus señales.

Ahora bien, es importante mencionar que únicamente existen dos tipos de filtros: los analógicos y los digitales; comúnmente reservándose los primeros a especialistas en la materia, puesto que requieren del uso de técnicas avanzadas para su aplicación, mientras que el segundo tipo de estos, son los de mayor uso y alcance en el medio, debido a que la gran mayoría de los registros de datos provenientes de cualquier tipo de instrumento de medición, ocurren naturalmente en forma digital, haciendo posible su programación, flexibilidad en su adecuación y de fácil alcance a los usuarios.

Los filtros digitales pueden ser aplicados tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia. Particularmente, los filtros realizados en este último dominio, corresponden a multiplicar la transformada de Fourier del registro original $x(t)$ por una función de respuesta en la frecuencia $h(f)$ (similar al caso del cálculo del cociente espectral $H(f)$, descrito anteriormente) del filtro deseado; cuyo resultado final será la transformada de Fourier de una nueva señal o registro filtrado $x_F(t)$.

$$X_F(f) = h(f) X(f) \quad (4.36)$$

Donde:

$X(f)$: es la transformada de Fourier de la señal original $x(t)$.

$X_F(f)$: es la transformada de Fourier de la nueva señal filtrada $x_F(t)$.

$h(f)$: es el filtro, el cual puede tomar diferentes valores según sea el tipo que se requiere aplicar.

De esta forma, los tipos de filtros digitales son clasificados dependiendo del rango de frecuencias que eliminan o permiten pasar; y aunque si bien no existen filtros ideales, es decir, filtros capaces de eliminar por completo una banda determinada de frecuencias, sin distorsión alguna del resto de las componentes, se distingue comúnmente a los siguientes tres tipos (fig. 4.10):

- a) Filtro paso-bajas.
- b) Filtro paso-altas.
- c) Filtro paso-banda.

Estos, comúnmente operan directamente sobre los espectros en la frecuencia, sin alterar el contenido de sus fases, definiendo la magnitud de la función del filtro $h(f)$ de la siguiente manera:

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

a) Filtro paso-bajas. Permite el paso a las bajas frecuencias, hasta la frecuencia máxima de corte:

$$h(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^{2N}}} \quad (4.37)$$

b) Filtro paso-altas. Permite el paso a las altas frecuencias, desde de la frecuencia mínima de corte:

$$h(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{min}}{f}\right)^{2N}}} \quad (4.38)$$

c) Filtro paso-banda. Permite el paso a frecuencias, entre las frecuencias mínima y máxima de corte:

$$h(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f^2 - f_{min}f_{max}}{f(f_{max} - f_{min})}\right)^{2N}}} \quad (4.39)$$

Donde:

f_{max} : Frecuencia máxima de corte, hasta la cual, se permite el paso del contenido de amplitudes.

f_{min} : Frecuencia mínima de corte, desde la cual, se permite el paso del contenido de amplitudes.

N : Número de polos que caracterizan el filtro, cuyo valor comúnmente recomendado es cuatro (Taborda, 2003).

Es importante mencionar que, conforme este último valor aumenta, el filtro se volverá cada vez más pronunciado en su zona de caída, pero con mayor incidencia de ruido dentro de la señal filtrada.

Este tipo de procedimientos de filtrado es comúnmente implementado en programas relacionados con el análisis de señales y sistemas, tales como DEGTRA vr.10.4 (Ordaz y Montoya, 1991) y/o PRISM vr.2.0.1 (Jeong *et. al.*, 2010); mismos que, han sido utilizados para efectos del desarrollo de este trabajo En las siguientes figuras fig. 4.10 y fig. 4.11 se muestran los diferentes tipos de filtros ideales, así como un ejemplo comparativo de uno de ellos, contra su comportamiento real.

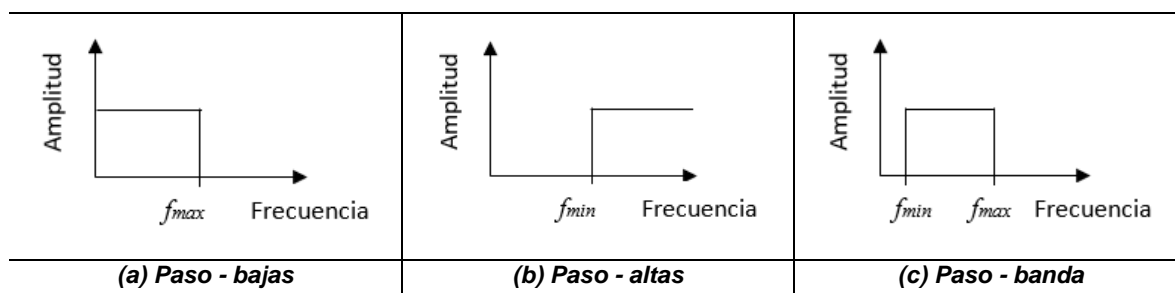
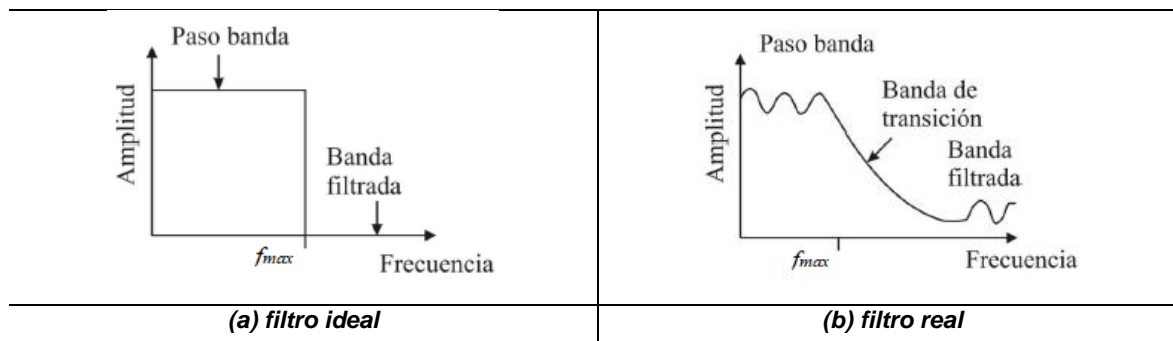


Fig. 4.10. Clasificación de filtros digitales ideales

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**



**Fig. 4.11. Ejemplo comparativo de uno de los tipos de filtro (paso-bajas): ideal contra real
(Murià Vila, 2019)**

4.4 Determinación de propiedades dinámicas estructurales

Con la aplicación de todos y cada uno de los conceptos anteriormente descritos, es posible identificar las principales características y propiedades dinámicas de cualquier tipo de sistema estructural que se tenga instrumentado, a saber: frecuencias naturales de vibración, formas modales y fracciones de amortiguamiento crítico asociados a estas. Dichas propiedades experimentales, constituyen uno de los parámetros más importantes dentro del proceso de evaluación de la salud estructural, el cual también fue descrito con anterioridad, favoreciendo además, la elaboración de modelos analíticos verdaderamente representativos del estado y/o condiciones reales que guardan las estructuras, proporcionando de esta forma, resultados confiables en la estimación de su respuesta ante acciones de diversa intensidad.

Por su parte, para identificar adecuadamente las propiedades dinámicas estructurales, es preciso señalar que no basta con analizar únicamente los espectros de Fourier o de potencia de los registros obtenidos a partir del sistema estructural instrumentado, puesto que, podrían cometerse errores importantes debido a la presencia de ordenadas significativas pero, ajenas a las frecuencias naturales propias de la estructura en cuestión; por lo cual, deberá siempre recurrirse al estudio en conjunto de todas las funciones de densidad espectrales disponibles, haciendo uso de ellas, justo en la forma que mejor convenga, tal y como se describe a continuación.

4.4.1 Frecuencias naturales de vibración

Para poder identificar las frecuencias naturales de vibración del sistema estructural en estudio, se sugiere el siguiente procedimiento:

1. Deberán obtenerse primero, los espectros de Fourier y espectros de potencia correspondientes a las señales de cada uno de los niveles instrumentados. Así, las posibles frecuencias naturales del sistema, serán aquellas que normalmente presenten mayores amplitudes en los espectros mencionados, aunque tal y como se comentó en líneas anteriores, no todas las frecuencias de amplitud considerable, corresponderán necesariamente a las del sistema analizado.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

2. Para solventar esta incertidumbre, se deberá recurrir en seguida, al espectro de ángulo de fase, el cual, proporcionará información acerca del movimiento relativo entre los niveles instrumentados. De esta forma, si para una frecuencia dada se presentan valores de fase cercanos a 0° o 180° entre las señales provenientes de los niveles instrumentados, significará que tal frecuencia corresponderá a alguno de los modos naturales de vibración del sistema.

3. Finalmente, para validar este último hecho, es deseable que las mediciones de coherencia en cada una de las frecuencias naturales identificadas, produzcan magnitudes iguales o cercanas a la unidad; aunque se hace notar que, este podría no ser un aspecto necesariamente determinante, debido a las posibles fuentes de ruido externo incidentes dentro de las señales en estudio.

Por otra parte, conviene mencionar que, en la identificación de las propiedades dinámicas estructurales, las relaciones entrada-salida del sistema instrumentado, exhiben ordenadas máximas en los espectros de potencia y funciones de transferencia en aquellas frecuencias llamadas de resonancia f_r , y no en las frecuencias naturales sin amortiguamiento f_n . Por lo cual, el empleo de este tipo de técnicas se limita a los casos en donde se presenten bajos niveles de amortiguamiento (e.g. $\xi \leq 0.05$), situación en la que comúnmente se encuentran la mayoría de las estructuras civiles.

En tal caso, para sistemas estructurales que presenten valores pequeños de amortiguamiento, la frecuencia de resonancia en desplazamientos, por ejemplo, será aproximadamente igual a la frecuencia natural del sistema sin amortiguamiento, es decir: $f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2}$ (Chopra, 2012).

4.4.2 Formas modales

La obtención de las formas modales correspondientes a las frecuencias naturales anteriormente identificadas, se llevan a cabo en función de los movimientos relativos registrados entre los niveles o puntos determinados de la estructura en estudio. El éxito en su reproducción, dependerá en gran medida de la adecuada instrumentación del sistema, realizando mediciones en zonas o lugares estratégicos del mismo, que permitan obtener información confiable acerca de su comportamiento dinámico y, particularmente, en las frecuencias y modos naturales de vibración de interés.

Para definir las formas modales en traslación, por ejemplo, deberán estudiarse las señales de aquellos equipos de medición localizados en puntos cercanos a los centros de rigidez en los niveles de la estructura, de manera que los desplazamientos torsionales se minimicen. De esta forma, se sugiere proceder como se enuncia a continuación:

1. Obtener los espectros de función de transferencia, realizando el cociente de las señales de salida, (equipos colocados a mayores alturas), entre las señales de entrada (equipos colocados en niveles inferiores), de manera reiterada hasta llegar al nivel de piso. De esta forma, se busca que las configuraciones deformadas de vibración obtenidas, estén normalizadas con respecto a la amplitud del movimiento registrado en el nivel más alto que se tenga instrumentado.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

2. Posteriormente, deberá recurrirse al espectro del ángulo de fase, para determinar la forma en la que los niveles responden relativamente uno del otro. Es decir, si la respuesta registrada entre los niveles se encuentra en fase (ángulo de fase igual o cercano a 0°), las amplitudes que definen la forma modal ocurren con el mismo signo; en contraste, si se encuentran en fase opuesta (ángulo de fase igual o cercano a 180°), las amplitudes se definen con signo contrario.

3. Adicionalmente, será deseable que las coherencias medidas, sean iguales o cercanas a la unidad.

Por su parte, las formas modales en torsión, pueden encontrarse relacionando las señales de los equipos colocados en un mismo nivel, y que estén alejados a su vez, del centro de rigidez del mismo, en donde se espera que se obtengan las máximas amplitudes del movimiento. De forma similar al procedimiento anterior, se sugiere lo siguiente:

1. Obtener la función de transferencia entre dos puntos instrumentados en un mismo nivel, preferiblemente comenzando por los niveles superiores y hasta llegar a los más bajos según se tengan instrumentados.

2. Posteriormente se recurre al ángulo de fase. En este caso, será necesario que los puntos instrumentados en un nivel, presenten fase igual o cercana a 180° , garantizando con ello, la presencia de efectos torsionales en el sistema.

3. Una vez más, se deberán procurar coherencias cercanas o similares a la unidad; sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, es común que esto no siempre suceda.

En tal caso, resulta siempre ventajoso, contar con información alterna proveniente de modelos analíticos, puesto que, si las configuraciones modales son previamente conocidas, estas podrían servir de base en la elección de los puntos y niveles a instrumentar. Cabe mencionar que, como regla genérica, para definir el n -enésimo modo de vibración de una estructura ϕ_n , deberán ser necesarios al menos, n número de instrumentos igual a su orden (Castelán, 2001). Adicionalmente, deberán tomarse en cuenta diversas variables como la configuración geométrica en planta, altura total de la estructura, cambios notables en su masa o rigidez, etc., con el propósito de definir de la mejor manera posible, la cantidad de puntos instrumentados dentro de la misma (González, 1989).

4.4.3 Amortiguamiento estructural

La fracción de amortiguamiento crítico ξ de un sistema estructural, suele obtenerse a partir de datos experimentales de medición, debido a que no es posible estimarle razonablemente de forma analítica para las estructuras reales en la práctica. Dicho parámetro es quizás, el más complejo de estimar con precisión, puesto que por sí solo, representa diversos mecanismos de disipación de energía, que van desde la posible apertura y cierre de microgrietas en estructuras de concreto, fricción entre las conexiones de acero, la influencia de elementos no estructurales, equipos, etc., presentándose a menudo, más de uno solo de estos al mismo tiempo (Chopra, 2012).

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Al respecto, algunos de los procedimientos experimentales utilizados para determinarle son:

- a) Decremento logarítmico
- b) Factor de amplificación dinámica
- c) Método de Kawasumi y Shima

Decremento logarítmico

Este método se establece a partir del estudio de los registros en vibración libre de una estructura (fig. 4.12); la cual, se somete bajo ciertas condiciones iniciales de desplazamiento $u_{(0)}$ y velocidad $\dot{u}_{(0)}$ predeterminadas (anulando a esta última por cuestiones de facilidad), dejándola vibrar libremente hasta alcanzar su reposo.

Así, si el decaimiento del movimiento de un sistema en vibración libre está controlado por $e^{-\xi\omega_n t}$, la relación existente entre las amplitudes de dos desplazamientos consecutivos, medidos en un lapso de tiempo t igual al periodo amortiguado del sistema $T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} = \frac{2\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}$, está dada por:

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} = e^{\xi\omega_n t} = e^{\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (4.40)$$

$$\delta = \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+1}}\right) = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cong 2\pi\xi \quad (4.41)$$

La ecuación anterior se conoce como *decremento logarítmico* δ ; la cual, para sistemas ligeramente amortiguados, puede aproximarse a $\delta \cong 2\pi\xi$, debido a que el término $\sqrt{1-\xi^2} \cong 1$; cuyo caso genérico, se extiende a intervalos de mediciones realizadas en j ciclos (ec. 4.42). Así, el nivel de amortiguamiento crítico del sistema ξ , se obtiene al despejarle de esta última ecuación (ec. 4.43).

$$\delta = \frac{1}{j} \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) \cong 2\pi\xi \quad (4.42)$$

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+j}}\right) \quad (4.43)$$

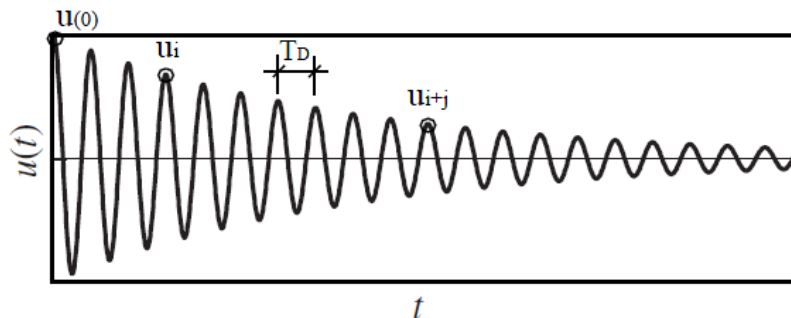


Fig. 4.12. Ejemplo del registro en vibración libre de un sistema sub-amortiguado

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Factor de amplificación dinámica

El método del *factor de amplificación dinámica* o *amplificación en resonancia*, se basa en el estudio de la respuesta en la frecuencia, caracterizada por medio del espectro de la función de transferencia que describe las relaciones entrada-salida del sistema (fig. 4.13).

Recordar que el factor de amplificación dinámica (FAD) en una frecuencia dada, se establece como:

$$FAD = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + [2\xi(\omega/\omega_n)]^2}} \quad (4.44)$$

Si la máxima amplitud del movimiento se presenta en relaciones de frecuencias excitación - sistema $\omega/\omega_n \cong 1$, sobre todo en aquellos sistemas que presentan bajos niveles de amortiguamiento, la ecuación anterior se reduce a:

$$FAD = \frac{1}{2\xi} \quad (4.45)$$

Por tanto, cuando se encuentra la condición resonante del sistema, el nivel de amortiguamiento será:

$$\xi = \frac{1}{2 FAD} \quad (4.46)$$

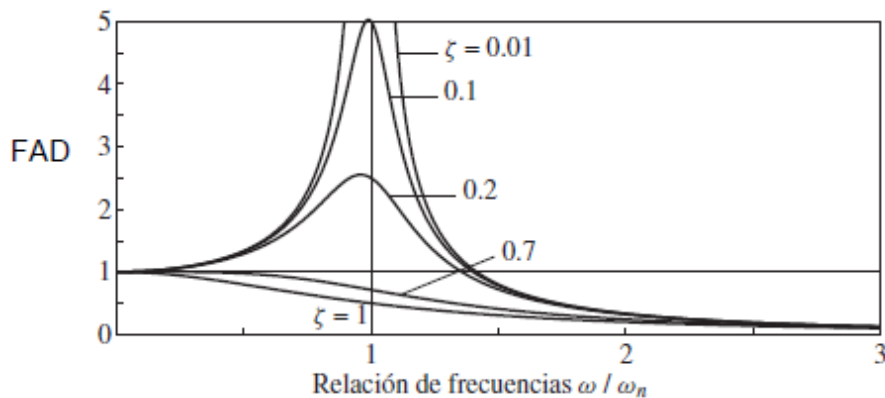


Fig. 4.13. Curva de respuesta en la frecuencia (Chopra, 2012)

Método de Kawasumi y Shima

La estimación de la razón del amortiguamiento crítico estructural empleando el método de Kawasumi y Shima (1965), se basa en el análisis de los espectros de potencia obtenidos a partir de las señales de la respuesta registrada proveniente de los sistemas instrumentados (fig. 4.14).

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

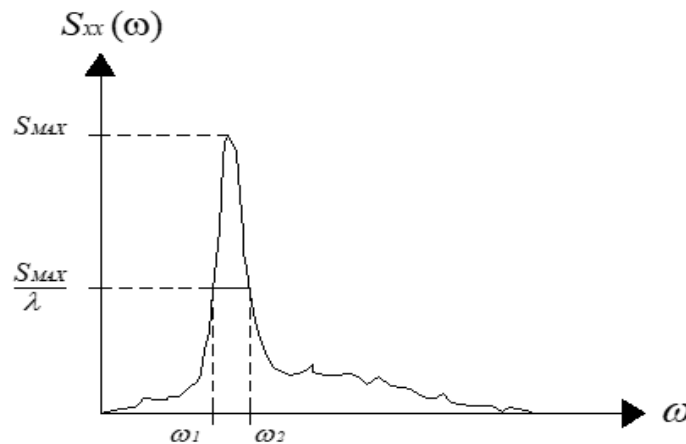
Su aplicación es de utilidad tanto en pruebas de medición de vibraciones ambientales como forzadas, requiriendo para ello, espectros de potencia bien definidos y con adecuada resolución; situación que, se logra inclusive, en mediciones de carácter ambiental, en donde se considera a las estructuras excitadas en todos sus modos naturales de vibración por igual, bajo condiciones de ruido blanco, es decir, señales aleatorias con múltiple contenido de frecuencias, cuyo espectro ideal es plano.

La descripción de la metodología es la siguiente:

1. Se obtiene el espectro de potencia de la señal de salida en la frecuencia natural de interés.
2. Se elige el parámetro λ (comúnmente $\lambda = 2$), el cual define el ancho de banda en estudio.
3. Se divide la amplitud máxima del espectro de potencia entre λ , identificando con ello, las frecuencias asociadas ω_1 y ω_2 al ancho de banda elegido.
4. Se determina el porcentaje de amortiguamiento crítico, conforme a las siguientes expresiones:

$$A = \left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 + \omega_1^2} \right) / \sqrt{\lambda - 1} \quad (4.47)$$

$$\xi = \frac{A}{2} \left(1 - \frac{3}{8} A^2 \right) \quad (4.48)$$



**Fig. 4.14. Fracción de amortiguamiento crítico empleando el método Kawasumi y Shima (1965)
(Adaptado de González Alcorta, 1989)**

Capítulo 5

Aplicación del caso de estudio

5.1 Descripción de la estructura

La estructura particularmente analizada en este trabajo es la llamada “Estructura del Reactor” (fig. 5.1); la cual, es una estructura metálica de tipo industrial, que funge como plataforma de operación y mantenimiento terrestre de un gran tanque vertical a presión instalado en su interior. Dicha estructura, pertenece a una de las plantas de proceso que conforman el complejo industrial de una refinería ubicada en la zona norte del país (Ayala y García, 2015).

Su sistema estructural está formado a base de marcos rígidos contraventeados de acero estructural, esto es, trabes, columnas y contraventeos verticales en ambas direcciones de análisis; mientras que, el sistema de piso está constituido por vigas y diagonales horizontales de acero contenidos en su plano, sobre los cuales a su vez, se apoya una rejilla dentada de acero estructural antiderrapante.



a) Isométrico. Vista general (Ayala y García, 2015)



b) Elevación. Fachada Este (Ayala y García, 2015)

Fig. 5.1. Estructura del Reactor

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Las medidas en planta del cuerpo principal son de 8.00m de ancho por 17.00m de largo (distancias medidas a ejes), mientras que, en altura, posee un total de 65.00m de alto, medidos a partir del nivel de piso terminado ($NPT \pm 0.000$), hasta su nivel tope de acero ($NTA + 65.000$) más alto. Una mejor referencia de la geometría general de dicha estructura, se observa en la fig. 5.4, la cual será presentada más adelante en este mismo documento.

A la fecha, la “Estructura del Reactor” cuenta con casi 30 años de antigüedad y, hacia el año de 2015, cuando se llevaron a cabo las mediciones e inspecciones realizadas *in situ*, esta exhibía un alto grado de deterioro por corrosión (fig. 5.2), debido principalmente a la exposición de agentes naturales propios de zonas costeras en la que dicha estructura se localiza, además de la exposición constante a derrames de líquidos, aceites y toda clase de elementos altamente agresivos derivados de los diferentes procesos químicos que se llevan a cabo dentro de la instalación a la que pertenece. Tal problema por corrosión se acentúa más aún, cuando las inadecuadas condiciones en las que operan los equipos alojados al interior de la estructura, además de la evidente situación de abandono y mantenimiento carente de la misma, ponen en duda su adecuado comportamiento, tanto en condiciones normales de operación o bien, ante acciones futuras de diseño.



a) *Contraventeos verticales y sus conexiones (Ayala y García, 2015)*



b) *Columnas principales y secundarias (Ayala y García, 2015)*

Fig. 5.2. Estructura del Reactor. Inspección del estado de conservación de sus elementos

5.2 Instrumentos de medición empleados

Los instrumentos o equipos de medición utilizados por los diferentes colaboradores que realizaron las campañas de mediciones y pruebas de vibración ambiental a mediados del año de 2014, fueron un total de 5 acelerómetros digitales modelo: SSA-320, marca: *Terra Technology*, con resolución de 12 bits, equipados a su vez con un *sensor triaxial* con capacidad de medición de hasta 1.0 g en cada una de las diferentes direcciones ortogonales de registro.

Los instrumentos o equipos de medición estuvieron conectados entre sí y fueron controlados por un equipo maestro que transmitió la señal del disparo de medición a través de cables blindados hacia el resto de los equipos, tratando de garantizar en lo posible, la medición simultánea de las señales registradas. Una vez concluida la prueba, los registros de aceleración que graban cada uno de los instrumentos, son guardados en un formato binario de extensión (.GSR) y almacenados en una memoria interna de estado sólido dentro de estos mismos.

Dicho lo anterior, se resumen a continuación las principales características de los instrumentos de medición empleados; los cuales, son como el que se muestra en la siguiente fig. 5.3.

Equipo E1 y E2. Ubicación: Niv. +43.200

- Marca: Terra Technology
- Modelo: SSA-320
- Sensor: Triaxial (3 canales de registro)
- Capacidad: 1.0 g
- Resolución: 12 bits
- Tipo de montaje: vertical
- Umbral de disparo: por software
- No. muestras por segundo: 100
- Tiempo de pre-evento: 5 s
- Tiempo de post-evento: 5 s

Equipo E3. Ubicación: Niv. +27.700

- Marca: Terra Technology
- Modelo: SSA-320
- Sensor: Triaxial (3 canales de registro)
- Capacidad: 1.0 g
- Resolución: 12 bits
- Tipo de montaje: vertical
- Umbral de disparo: por software
- No. muestras por segundo: 100
- Tiempo de pre-evento: 5 s
- Tiempo de post-evento: 5 s

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Equipo E4. Ubicación: Nivel de piso +0.000

- Marca: Terra Technology
- Modelo: SSA-320
- Sensor: Triaxial (3 canales de registro)
- Capacidad: 1.0 g
- Resolución: 12 bits
- Tipo de montaje: vertical
- Umbral de disparo: por software
- No. muestras por segundo: 100
- Tiempo de pre-evento: 5 s
- Tiempo de post-evento: 5 s

Equipo E5. Ubicación: Niv. +6.000

- Marca: Terra Technology
- Modelo: SSA-320
- Sensor: Triaxial (3 canales de registro)
- Capacidad: 1.0 g
- Resolución: 12 bits
- Tipo de montaje: vertical
- Umbral de disparo: por software
- No. muestras por segundo: 100
- Tiempo de pre-evento: 5 s
- Tiempo de post-evento: 5 s



Fig. 5.3. Equipo de medición SSA-320, Terra Technology (Ayala y García, 2015)

5.3 Diseño del arreglo de medición

Con ayuda de los instrumentos anteriormente descritos, se realizaron un total de 7 pruebas de medición de vibraciones de carácter ambiental a la denominada “Estructura del Reactor”, cada una de ellas, con una duración aproximada de entre 8 y 10 minutos de duración.

La posición de los instrumentos se muestra en las siguientes figuras (fig. 5.4 y fig. 5.5), la cual se determinó estratégicamente con la finalidad de detectar con claridad y de la mejor manera posible, el comportamiento global característico del sistema estructural en estudio; tomando en cuenta diversos factores y limitantes que estuvieron presentes tales como: la cantidad de equipos de medición disponibles, el número de niveles con los que cuenta la estructura, la disponibilidad de acceso a las zonas de medición, existencia de rejilla de apoyo en el sistema de piso, entre otros.

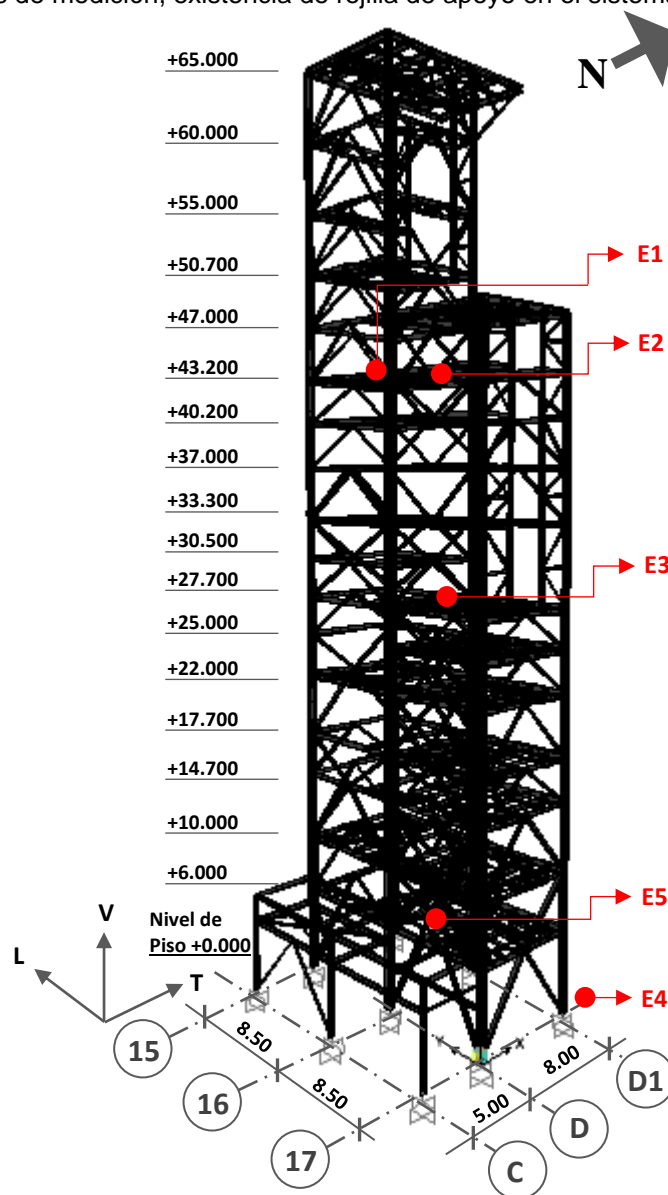
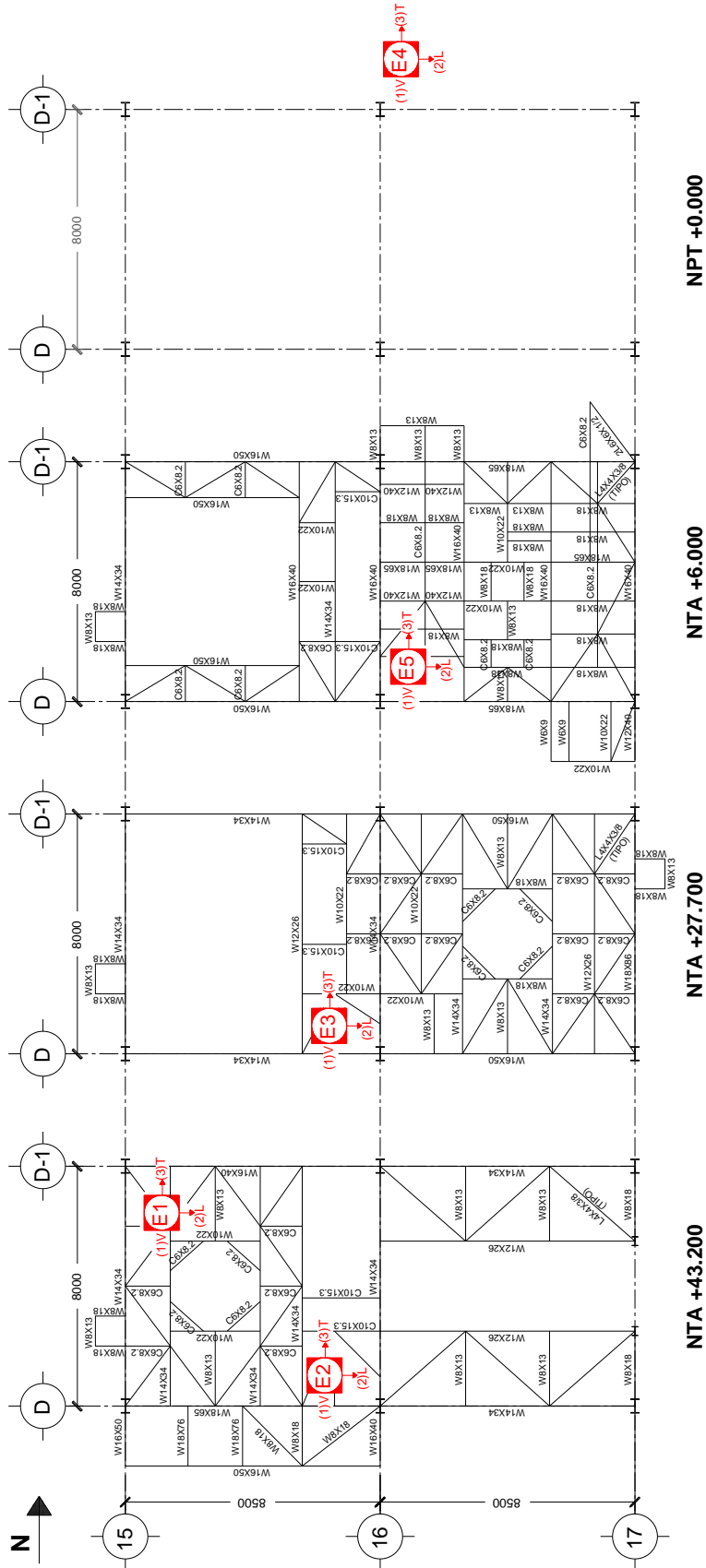


Fig. 5.4. Estructura del Reactor. Geometría e instrumentación

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES



NOMENCLATURA:

- (1)V: Componente vertical.
- (2)L: Componente longitudinal.
- (3)T: Componente transversal.
- E1 a E5: Número de equipo de medición.
- NPT: Nivel de piso terminado.
- NTA: Nivel top de acero.

Fig. 5.5. Localización de los equipos de medición

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

En esencia, la selección de los puntos de instrumentación de esta y cualquier otro tipo de estructura, se debe realizar con la finalidad de cubrir, en la medida de lo posible, el comportamiento dinámico global descrito a lo largo de toda la altura del sistema estructural, procurando nunca perder de vista el fenómeno de interés que pretende ser medido o estudiado.

Esto es, para la obtención de las frecuencias y configuraciones modales en traslación, los instrumentos de medición procuraron ser colocados en lugares cercanos a los centros de rigidez de cada nivel en la estructura, manteniendo siempre como referencia, el equipo colocado a una mayor altura (equipo E2), mientras que el resto de los equipos fueron colocados y distribuidos en los niveles intermedios disponibles (equipos E3 y E5), dejando finalmente un último equipo (equipo E4) colocado directamente sobre el terreno circundante.

Por su parte, para poder identificar las frecuencias y modos torsionales de vibración, se opta por colocar al menos dos instrumentos de medición en el nivel más alto que se tiene disponible a instrumentar (equipos E1 y E2), colocando el primer equipo (E1) relativamente distante del segundo (E2). Lo anterior con la finalidad de tener al menos uno de los equipos (E1) lo más alejado posible del centro de torsión (E2), ya que finalmente en este punto es en donde se espera que se registren los máximos desplazamientos o aceleraciones presentes en la estructura y que comúnmente las señales registradas por dichos equipos, ocurrirán siempre con sentidos opuestos entre sí.

Además, es recomendable tener siempre instrumentado por lo menos un punto de medición localizado directamente sobre el terreno de apoyo de la estructura en estudio (equipo E4), ya que, de esta forma, será posible definir la amplificación del movimiento presente desde la base de la estructura, hasta el punto más alto que se tenga instrumentado, así como poder definir la frecuencia o periodo dominante del sitio, además de posibles efectos de interacción suelo estructura.

Por último, es importante mencionar que, a pesar de no contar con la información de equipos de medición localizados en la parte más alta de la estructura como es normalmente recomendado, debido a las dificultades de acceso y limitantes anteriormente mencionadas y que resultan ser inherentes a estructuras industriales poco convencionales, como es el caso; se logra, a pesar de ello, identificar los parámetros principales que definen el comportamiento dinámico de la “Estructura del Reactor”, cuyos resultados serán discutidos más adelante.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

5.4 Procesamiento y análisis de señales

5.4.1 Obtención de los registros de medición

El proceso de la información registrada durante las 7 pruebas de medición realizadas a la “Estructura del Reactor” inició con el respaldo de los registros de aceleración obtenidos de cada uno de los 5 instrumentos de medición utilizados. De esta forma, se generaron un total de 35 registros de medición, los cuales a su vez, poseen información en 3 diferentes direcciones ortogonales, obteniéndose así, un total de 105 señales de aceleración en el tiempo.

En la siguiente tabla 5.1 se muestran los registros de aceleraciones obtenidos de cada uno de los equipos o instrumentos de medición empleados en las siete diferentes pruebas de carácter ambiental realizadas a la llamada “Estructura del Reactor”.

Tabla 5.1. Registros de aceleraciones

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del equipo de medición	Nombre del registro	Hora de inicio	Duración (s)
1	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03001	15:46:34	526
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03001	15:46:35	526
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03001	15:46:36	526
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03001	15:46:31	526
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03001	15:46:33	526
2	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03002	15:56:02	546
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03002	15:56:03	547
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03002	15:56:04	547
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03002	15:56:00	545
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03002	15:56:01	546
3	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03003	16:05:34	589
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03003	16:05:35	590
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03003	16:05:36	590
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03003	16:05:31	594
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03003	16:05:33	594
4	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03004	16:16:01	442
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03004	16:16:02	441
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03004	16:16:03	436
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03004	16:16:04	436
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03004	16:16:04	437
5	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03005	16:24:18	446
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03005	16:24:19	446
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03005	16:24:15	451
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03005	16:24:16	451
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03005	16:24:18	446
6	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03006	16:32:31	524
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03006	16:32:31	524
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03006	16:32:31	524
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03006	16:32:35	523
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03006	16:32:31	529
7	E1	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 15.	E1_03007	16:41:42	592
	E2	Plataforma nivel NTA +43.200. Eje 16.	E2_03007	16:41:43	592
	E3	Plataforma nivel NTA +27.700. Eje 16.	E3_03007	16:41:44	592
	E4	Estación campo. Nivel de piso +0.000.	E4_03007	16:41:45	274
	E5	Plataforma nivel NTA +6.000. Eje 16.	E5_03007	16:41:46	592

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Dichos registros o señales de aceleraciones, son como los que se muestran en la siguiente figura fig. 5.6, los cuales son guardados un formato binario de extensión *.GSR* que incluye información en 3 diferentes direcciones ortogonales; mismos que, son posteriormente recuperados, para su uso y edición en formato *ASCII*, asignándoles nombres relativos a las pruebas de mediciones realizadas, que incluyen las características de cada estación de medición, tales como: nombre del equipo, clave genérica del evento, número de prueba o disparo, orientación, etc.

Posteriormente, por medio del empleo de dichos registros de aceleraciones, fue posible evaluar tanto la respuesta en el dominio del tiempo de la estructura en condiciones normales de operación, así como identificar las propiedades dinámicas del sistema estructural, a saber: frecuencias naturales de vibración, formas modales de vibrar y cocientes de amortiguamiento crítico, empleando las técnicas de análisis espectrales en el dominio de la frecuencia anteriormente descritas.

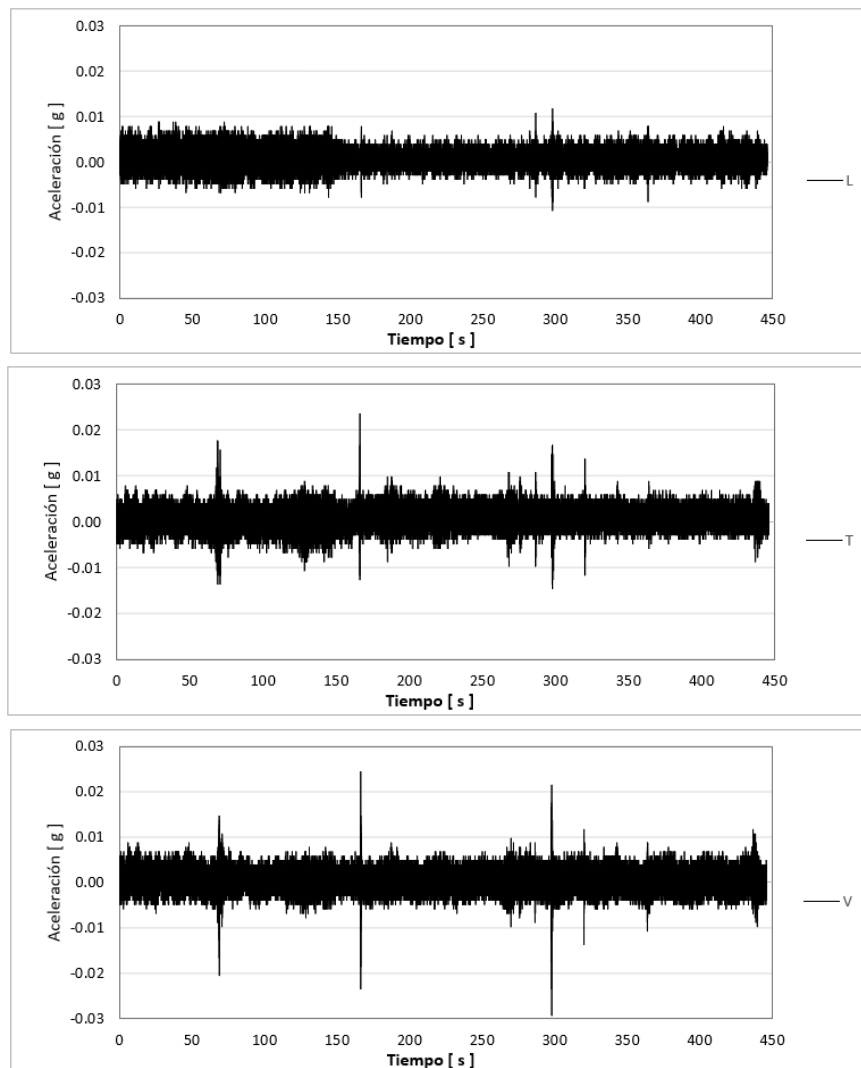


Fig. 5.6. Registro de aceleraciones: E1_03005.

Número de equipo (E1), clave general (03) y número de medición, prueba o disparo (005)

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

A continuación, se muestra un resumen de los valores máximos absolutos y valores medios cuadráticos (r.m.s. por sus siglas en inglés) del movimiento registrado en las diferentes pruebas de medición de vibraciones realizadas a la estructura en estudio (tabla 5.2 y tabla 5.3).

De los instrumentos de medición, se obtienen directamente los registros de aceleraciones; posteriormente, por medio de un proceso numérico de integración, es posible obtener los registros de velocidades y desplazamientos asociados. Lo anterior, se realiza mediante el empleo de programas de cómputo afines al tratamiento de señales y sistemas u otros similares; en este trabajo se hará uso del programa DEGTRA vr.10.4 (Ordaz y Montoya, 1991).

Conviene mencionar que, durante la obtención de dicha información, fue necesario incluir dentro del proceso, correcciones de línea base, necesarias para eliminar las líneas de tendencia o ajustar el corrimiento de los registros (línea de ceros); además de la utilización de diferentes procedimientos y tipos de filtrado, tales como filtros paso-banda, con los cuales se eliminaron frecuencias espurias asociadas a fuentes de ruido externo e instrumental, delimitando el total de las componentes frecuenciales de los registros originales, a frecuencias de interés cuyo rango de corte comprendió desde los 0.1 Hz y hasta los 20 Hz para el estudio de las frecuencias naturales del sistema analizado.

Tabla 5.2. Resumen de los valores máximos registrados

EQUIPO	NIVEL	A_{MAX} (m/s ²)			V_{MAX} (mm/s)			D_{MAX} (mm)		
		L	T	V	L	T	V	L	T	V
E1	+43.200	0.0954	0.1353	0.0825	2.2019	3.2212	2.8686	2.7945	4.0710	3.7045
E2	+43.200	0.0780	0.2841	0.3059	0.7945	3.8919	5.3643	0.8882	5.0944	3.7304
E3	+27.700	0.6212	0.4589	0.0062	4.5801	6.8328	0.4722	4.6027	2.1609	0.5596
E5	+6.000	0.1706	0.2178	0.0042	1.0970	2.4241	0.2362	1.3922	1.0846	0.2686
E4	+0.000	0.0180	0.0236	0.0291	0.1448	0.1947	0.3301	0.0557	0.0618	0.0656

¹ - Valores máximos absolutos del movimiento registrado.

² - Se incluye el número total de pruebas o disparos de medición.

³ - Se omiten aquellos pulsos de gran magnitud ocasionados por alguna eventualidad al momento del registro.

Tabla 5.3. Resumen de los valores medios cuadráticos (r.m.s.) registrados

EQUIPO	NIVEL	$A_{r.ms.}$ (m/s ²)			$V_{r.ms.}$ (mm/s)			$D_{r.ms.}$ (mm)		
		L	T	V	L	T	V	L	T	V
E1	+43.200	0.0540	0.0765	0.0467	1.2456	1.8222	1.6227	1.5808	2.3029	2.0956
E2	+43.200	0.0491	0.1785	0.1923	0.4994	2.4462	3.3717	0.5583	3.2020	2.3447
E3	+27.700	0.3904	0.2884	0.0039	2.8788	4.2947	0.2968	2.8930	1.3582	0.3517
E5	+6.000	0.1207	0.1540	0.0029	0.7757	1.7141	0.1670	0.9844	0.7669	0.1899
E4	+0.000	0.0128	0.0167	0.0206	0.1024	0.1377	0.2334	0.0394	0.0437	0.0464

¹ - Valores eficaces o raíz media cuadrática (r.m.s.).

² - Se incluye el número total de pruebas o disparos de medición.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

5.4.2 Herramienta virtual empleada para el análisis de señales

El análisis espectral de las señales producto de los registros de aceleración en el tiempo descritos anteriormente, se llevó a cabo mediante el uso del programa LabVIEW (National Instruments, 2018), el cual ofrece una plataforma con un ambiente de programación gráfico, destinado al análisis, control, medición y adquisición de datos. Los sistemas desarrollados mediante este programa, reciben el nombre de herramienta o instrumento virtual, los cuales generan aplicaciones de software cuya extensión se denomina (.vi).

En el presente trabajo, la herramienta virtual desarrollada por Castelán (2001), fue utilizada para el análisis y procesamiento de las señales. Dicha herramienta, permite procesar la información de los registros de aceleraciones obtenidos, mediante el análisis simultáneo entre pares de señales, estudiando los datos tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, a partir de técnicas de análisis espectrales convencionales que permiten la obtención de los espectros promedio de Fourier y demás cocientes o funciones de densidad espectrales necesarios para identificar las propiedades dinámicas del sistema estructural analizado.

En la siguiente figura (fig. 5.7), se muestra el panel de control y ambiente gráfico de la herramienta o instrumento virtual utilizado. Cabe mencionar que, dicha herramienta, ha sido revisada en repetidas ocasiones por profesionales de la práctica, investigadores y profesores que, han contribuido con su elaboración, optimización y mejora constante; por lo que se ha validado su uso y empleo, ofreciendo resultados confiables para el análisis de señales.

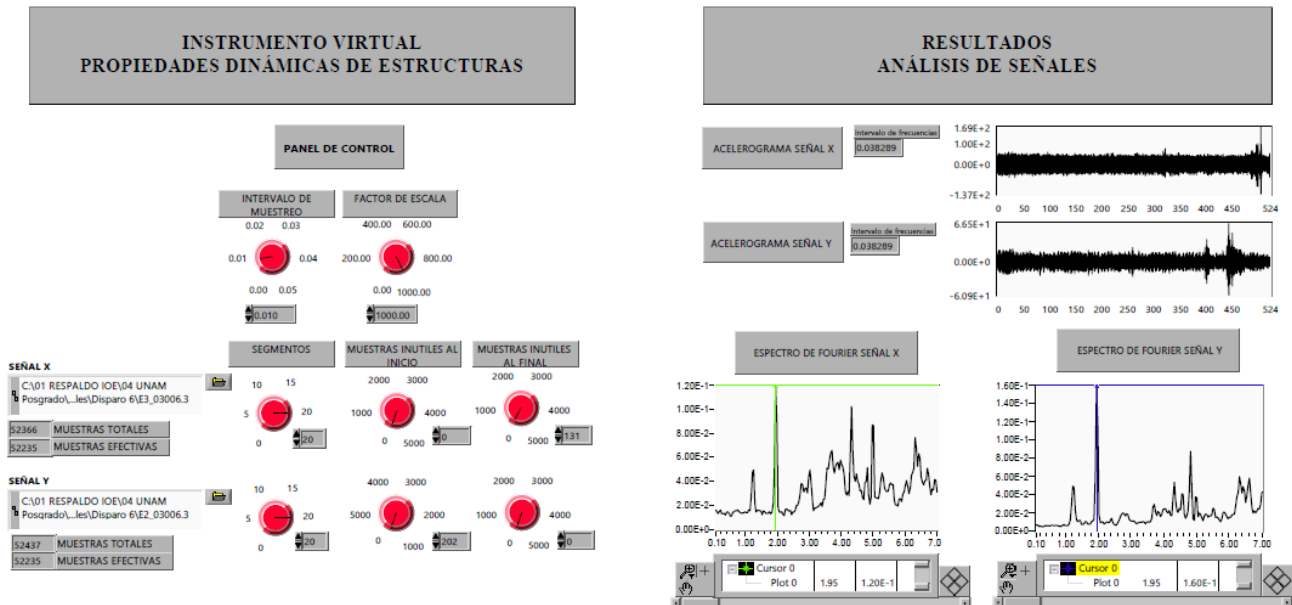


Fig. 5.7. Instrumento virtual para el análisis de señales desarrollado en LabVIEW (Castelán, 2001)

Capítulo 6

Análisis e interpretación de los resultados

6.1 Resultados experimentales

A continuación, serán mostrados los resultados obtenidos a partir del estudio de las señales o registros producto de las diferentes pruebas de medición de vibraciones de tipo ambiental que fueron realizadas a la llamada “Estructura del Reactor”. La estructura en cuestión, además de toda la información referente a la campaña de mediciones realizadas a esta, fueron descritas anteriormente.

Por su parte, para poder identificar las propiedades dinámicas del sistema estructural en cuestión, se emplearon técnicas de análisis espectrales convencionales, para determinar los espectros de promedio Fourier, así como el resto de las funciones de densidad existentes, derivados del análisis cruzado o estudio de correlación realizado entre pares de señales. Lo anterior, se realizó mediante la aplicación de las metodologías basadas en la teoría de procesos estocásticos y datos aleatorios (Bendat y Piersol, 2010).

6.1.1 Frecuencias naturales de vibración

En primer lugar, se obtendrán los espectros promedio de Fourier para cada uno de los registros de aquellos instrumentos localizados en la estructura y, superponiéndolos en un mismo gráfico, se logran identificar las posibles frecuencias naturales presentes en el sistema estructural, las cuales serán comúnmente, aquellas que presenten las mayores amplitudes o valores pico en los espectros correspondientes (fig. 6.1 y fig. 6.2). Sin embargo, se aclara que, solo el análisis de correlación existente entre las señales, permitirá definir cuáles de ellas verdaderamente corresponden a las frecuencias naturales de vibración propias del sistema estructural.

Por otra parte, es posible identificar también, la frecuencia dominante del sitio en cuestión; esto con la ayuda de los registros correspondientes al equipo de medición localizado directamente sobre campo libre (equipo E4). De tal forma que, de manera similar al procedimiento anteriormente descrito, se obtendrán los espectros de Fourier promedio, correspondientes a dicho instrumento (fig. 6.3 y fig. 6.4), además de la obtención de los cocientes espectrales obtenidos entre las componentes horizontales y verticales respectivamente, según la metodología desarrollada por Nakamura (1989), a fin de identificar adecuadamente la frecuencia dominante del terreno.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

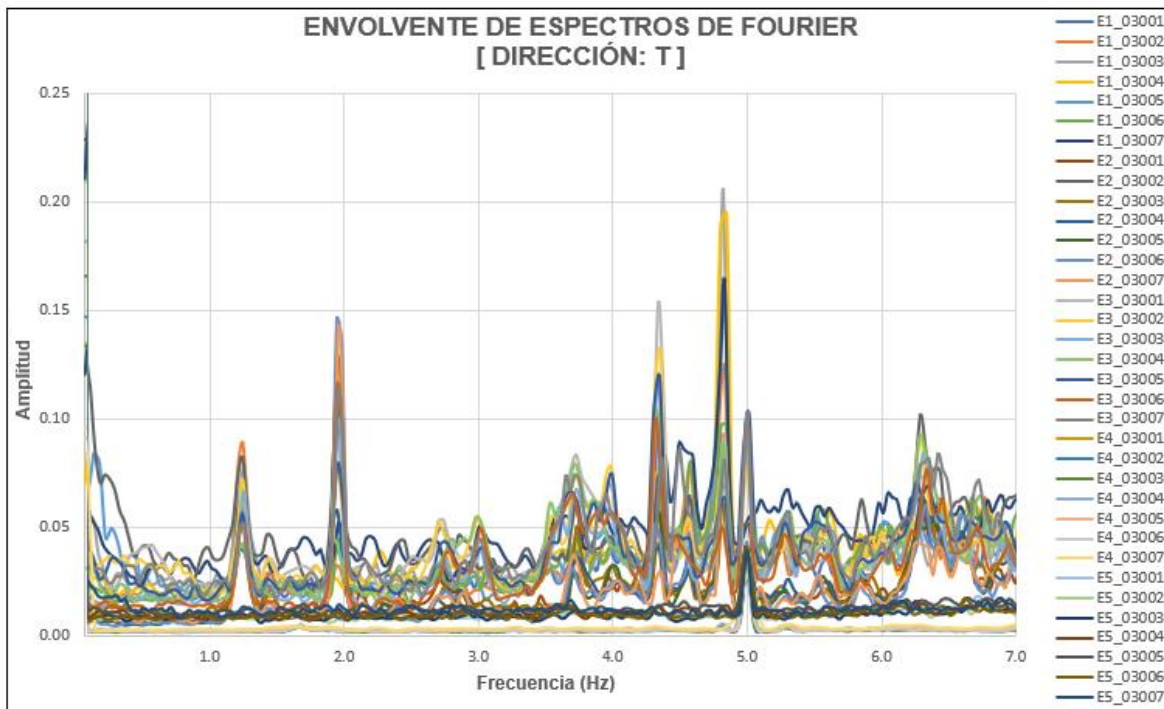


Fig. 6.1. Envoltente de espectros de Fourier. Dirección de análisis: T

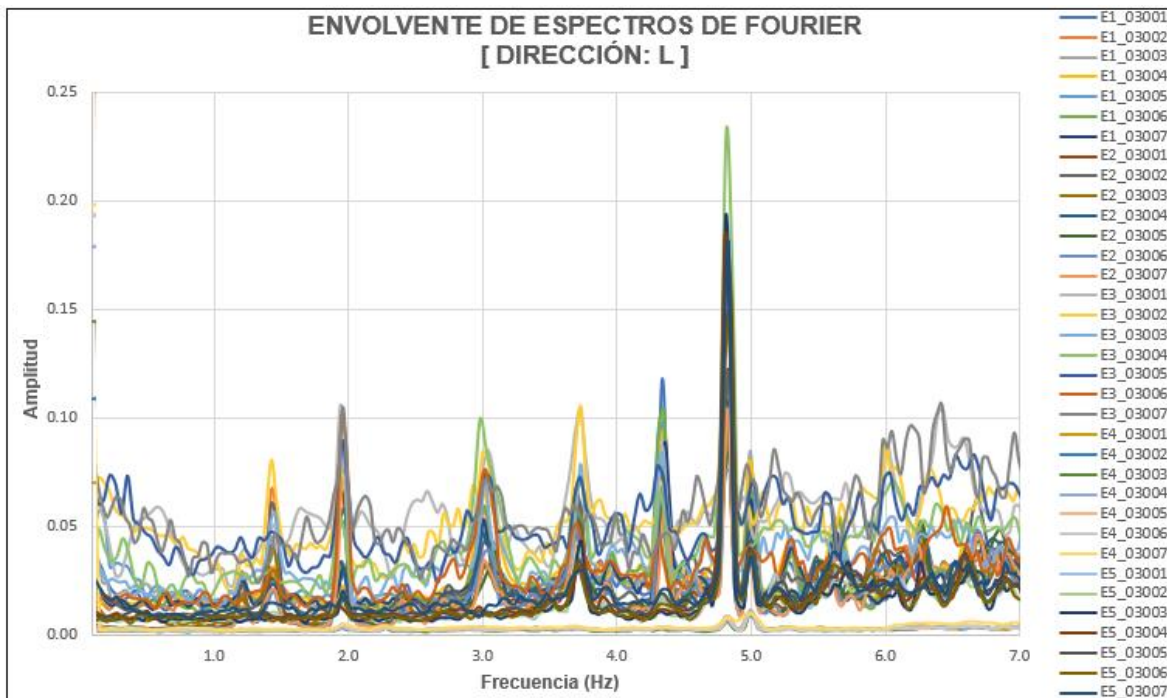
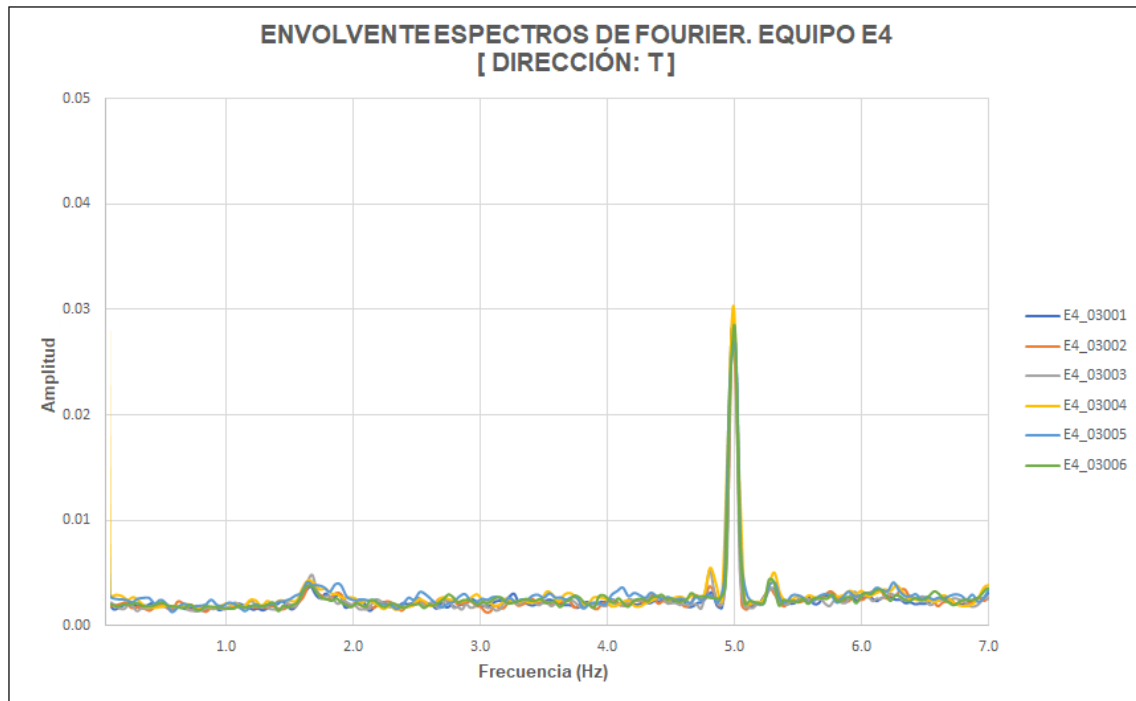
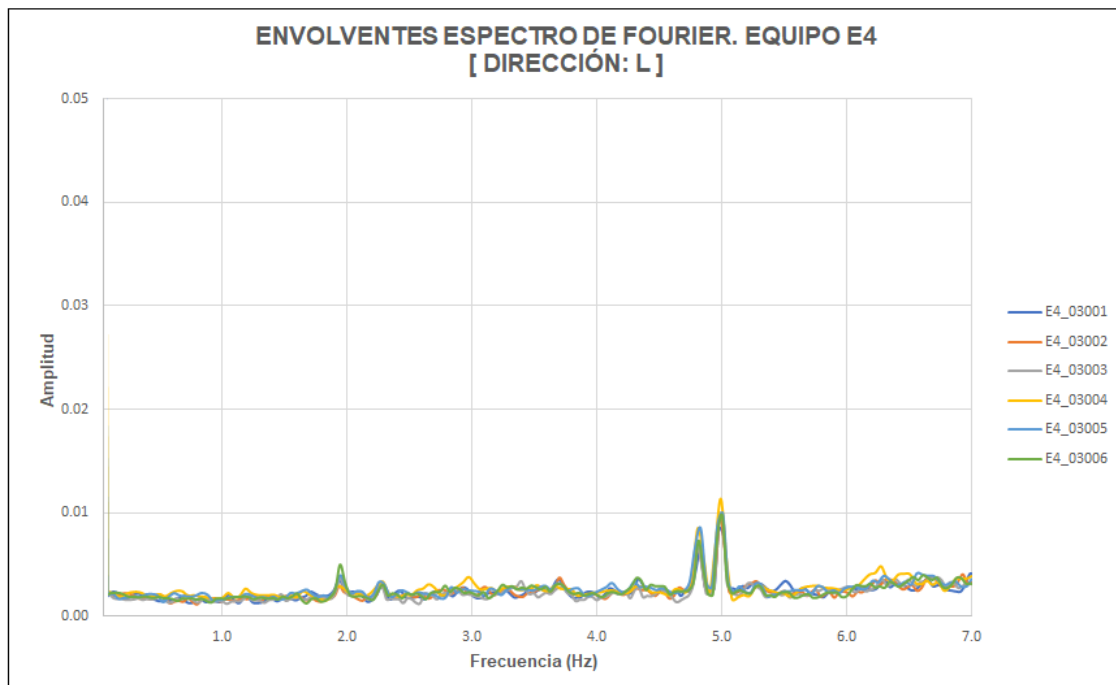


Fig. 6.2. Envoltente de espectros de Fourier. Dirección de análisis: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**



**Fig. 6.3. Envoltente de espectros de Fourier del Equipo E4. Estación de campo libre.
Dirección de análisis: T**



**Fig. 6.4. Envoltente de espectros de Fourier del Equipo E4. Estación de campo libre.
Dirección de análisis: L**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Así, las frecuencias naturales asociadas a los modos de vibración del sistema estructural que se lograron identificar mediante el análisis de correlación existente entre pares de señales, se resumen en la siguiente tabla (ver tabla 6.1); mientras que en otra tabla posterior (ver tabla 6.2), se muestran los resultados de los cocientes espectrales obtenidos para las frecuencias dominantes en cada dirección de análisis. Dichos cocientes espectrales son, como se dijo anteriormente, necesarios para la correcta interpretación de las propiedades dinámicas del sistema (ver fig. 6.5 a fig. 6.8).

Se aclara que, para observar en su totalidad los espectros de Fourier y cocientes espectrales obtenidos a partir del análisis de correlación existente entre pares de señales o registros en estudio, el lector deberá referirse al Anexo A “Espectros de Fourier, funciones de transferencia, fase y coherencia de los registros obtenidos a partir de las pruebas de mediciones de vibración ambiental realizadas a la Estructura del Reactor” incluido al final de este mismo documento.

Tabla 6.1. Resumen de las frecuencias naturales de vibración del sistema estructural identificadas

E S T R U C T U R A					T E R R E N O	
Modo de Vibrar	Descripción	Componente	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
Tx ₁	1° - Traslación	T	1.23 - 1.27	0.81 - 0.79	4.90 - 5.00	0.20 - 0.20
Ty ₁	1° - Traslación	L	1.42 - 1.46	0.70 - 0.68		
Tθ ₁	1° - Torsión	R	1.96 - 2.00	0.51 - 0.50		
Tx ₂	2° - Traslación	T	3.60 - 4.00	0.28 - 0.25		
Ty ₂	2° - Traslación	L	4.30 - 4.38	0.23 - 0.23		
Tθ ₂	2° - Torsión	R	2.96 - 3.05	0.34 - 0.33		
Tx ₃	3° - Traslación	T	/ - /	/ - /		
Ty ₃	3° - Traslación	L	/ - /	/ - /		
Tθ ₃	3° - Torsión	R	4.80 - 4.90	0.21 - 0.20		

Tabla 6.2. Análisis de correlación de las principales frecuencias naturales de vibración identificadas

Equipos	Modo de Vibrar	Componente	Frecuencia [Hz]	Fase [°]	Coherencia [adim]	Transferencia [adim]
E S T R U C T U R A						
E2 - E3	Tx ₁	T	1.23 - 1.27	3.7 - 1.7	0.86 - 0.86	1.04 - 0.92
E2 - E3	Ty ₁	L	1.42 - 1.46	0.7 - 6.1	0.76 - 0.72	0.74 - 0.69
E2 - E1	Tθ ₁	R	1.96 - 2.00	170.5 - 173.1	0.65 - 0.63	3.70 - 3.72
T E R R E N O						
E4 - E4	T _{SUELO}	T y L	4.90 - 5.00	-110 - -173	0.77 - 0.92	0.98 - 1.00

Notas:

1. Para una mejor referencia, ver geometría e instrumentación en las figuras: fig. 5.4 y fig. 5.5.

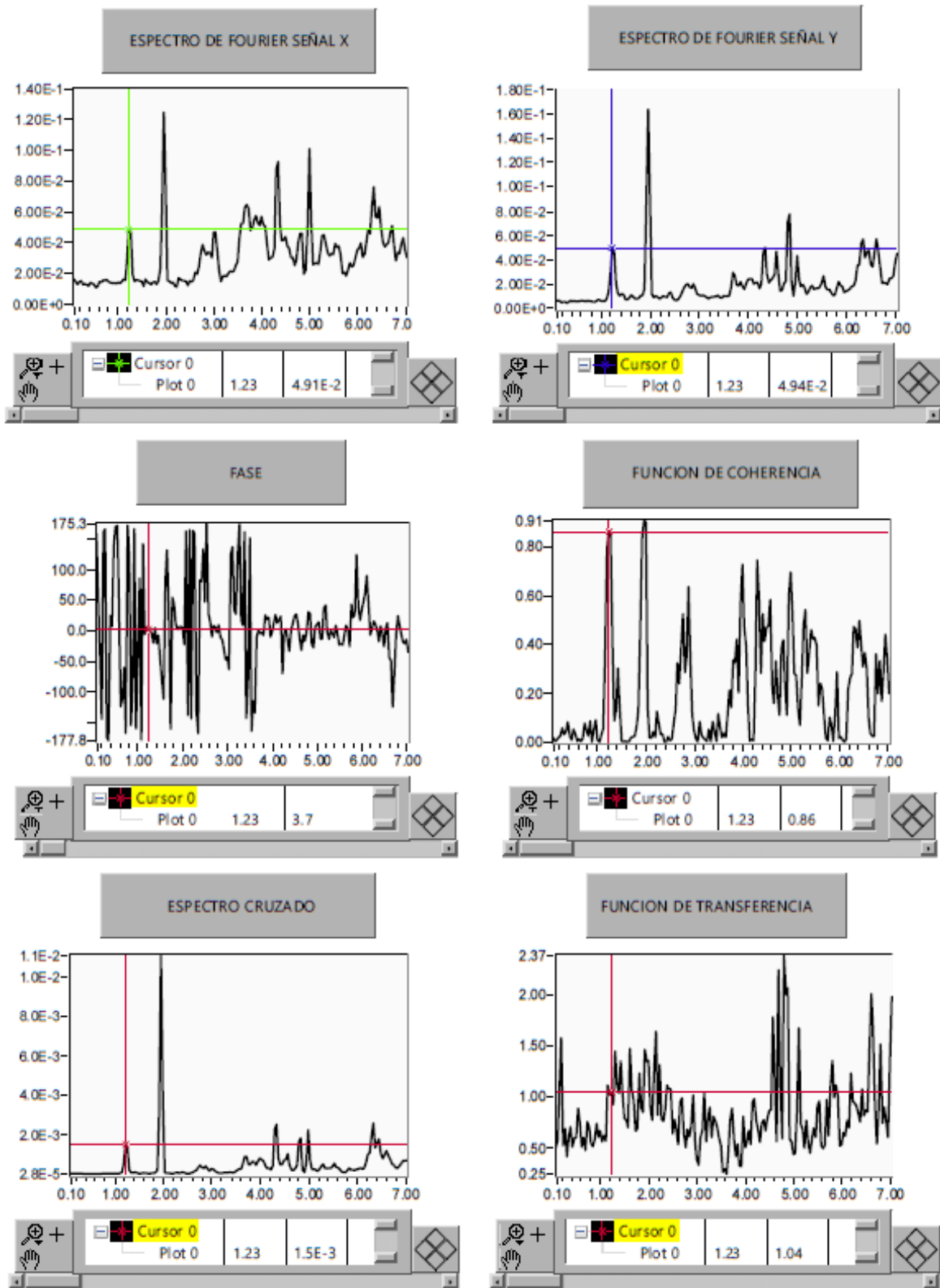
Nomenclatura:

T – Componente Transversal (menor dimensión en planta de la estructura, ver nota 1).

L – Componente Longitudinal (mayor dimensión en planta de la estructura, ver nota 1).

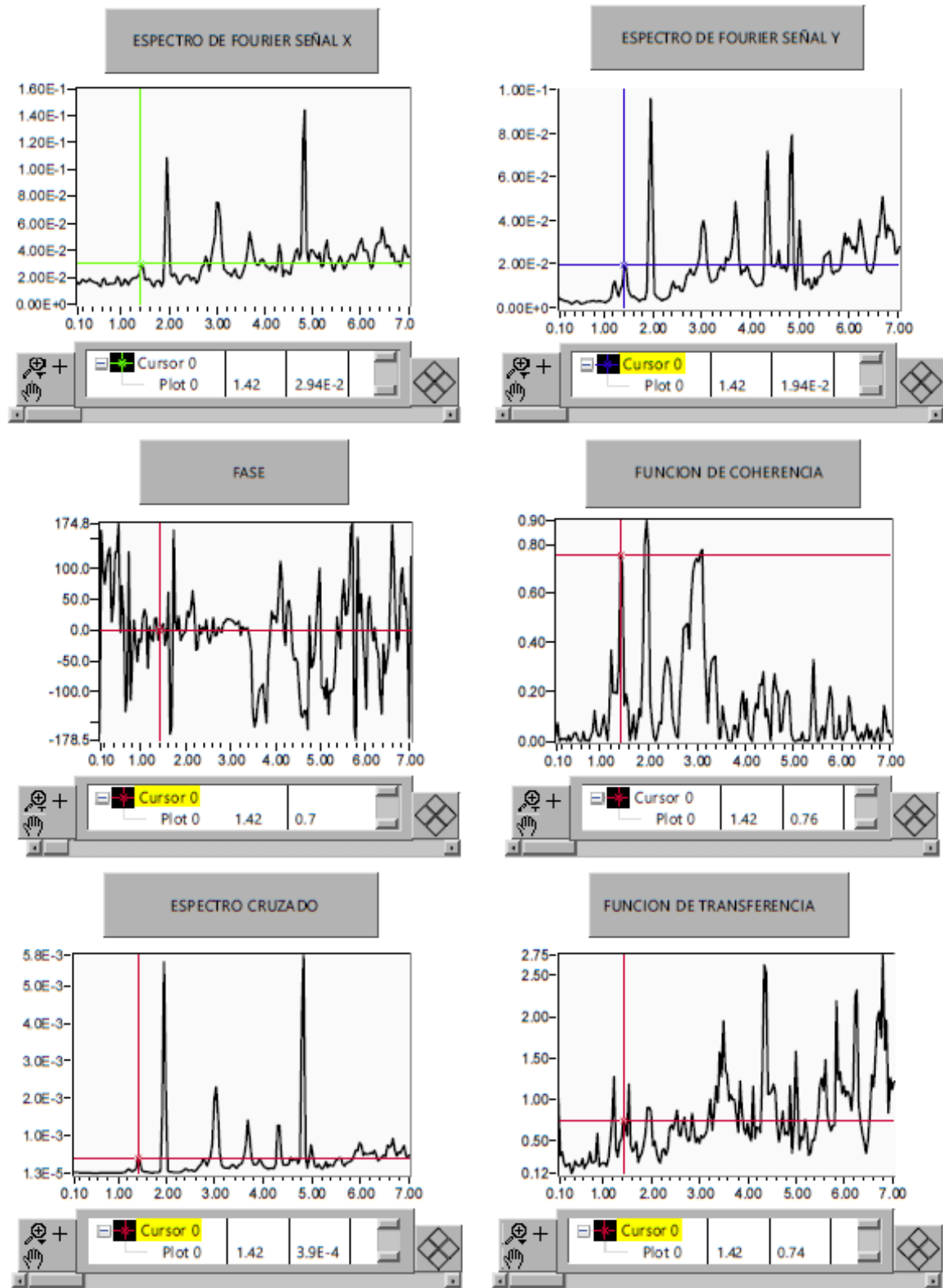
R – Componente Rotacional de Torsión.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**



**Fig. 6.5. Espectros de Fourier y cocientes espectrales. Medición: 6, equipos E2-E3, dirección: T.
Frecuencia en estudio: 1.23Hz – 1.27Hz**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**



**Fig. 6.6. Espectros de Fourier y cocientes espectrales. Medición 6, equipos: E2-E3, dirección: L.
Frecuencia en estudio: 1.42Hz – 1.46Hz**

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

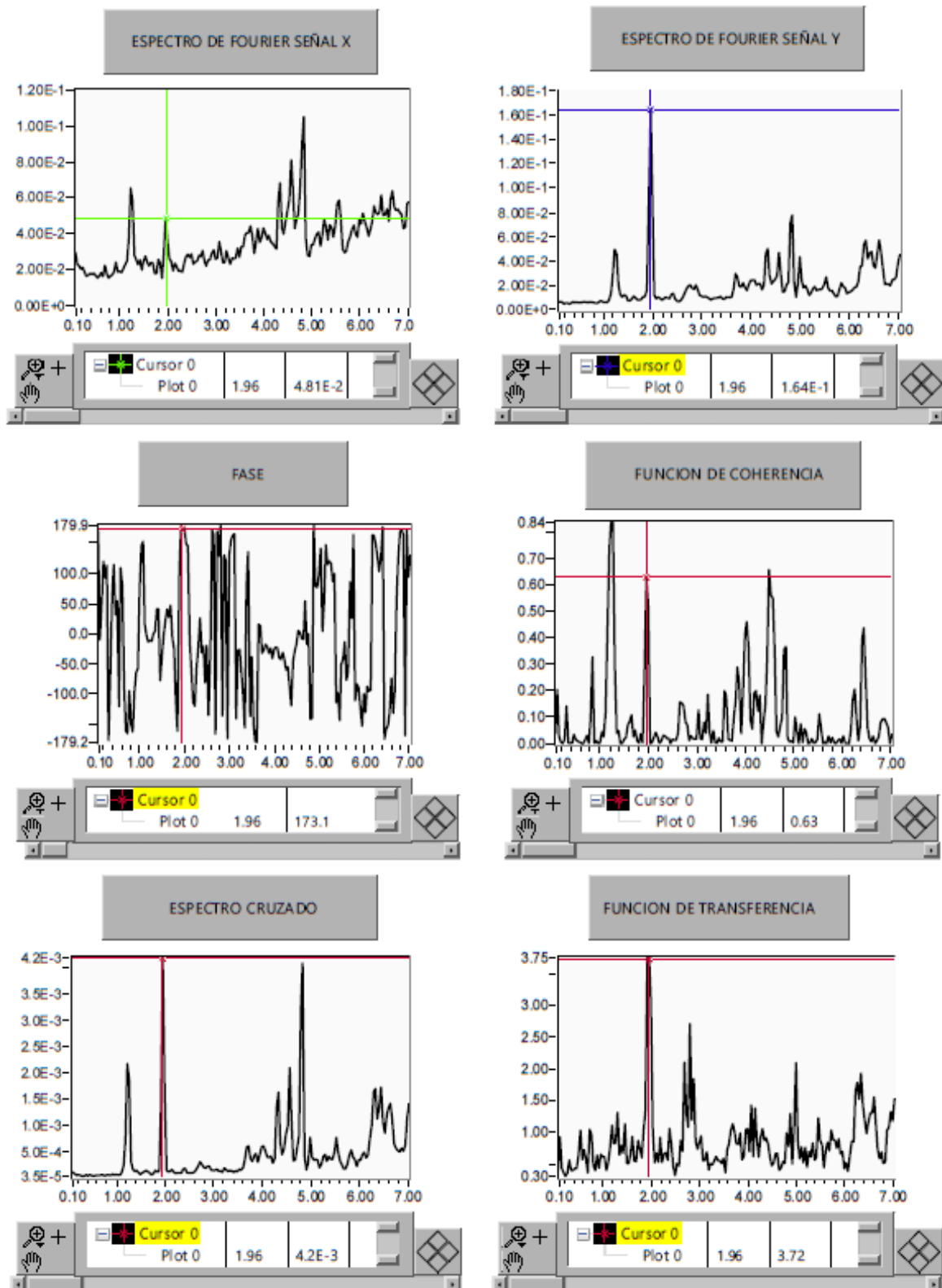


Fig. 6.7. Espectros de Fourier y cocientes espectrales. Medición 6, equipos: E2-E1, dirección: T.
Frecuencia en estudio: 1.96Hz – 2.00Hz

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

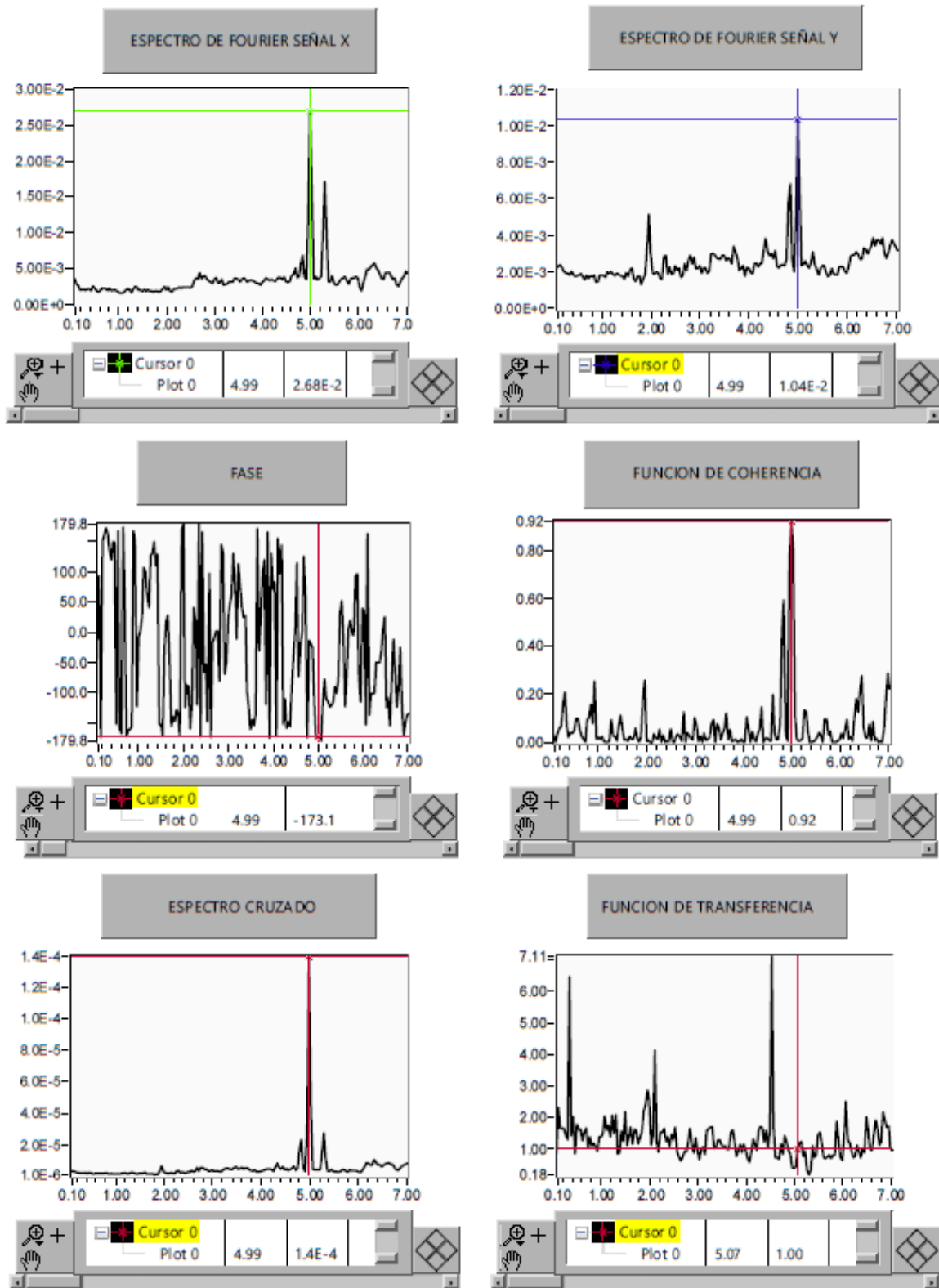


Fig. 6.8. Espectros de Fourier y cocientes espectrales. Medición: 6, equipo: E4, dirección: L/V.
Frecuencia en estudio: 4.90Hz – 5.00Hz

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

6.1.2 Formas modales

Para definir la configuración de las formas modales de vibración correspondientes a cada una de las frecuencias naturales anteriormente identificadas, primero se recurre al espectro de función de transferencia, el cual se obtiene mediante los cocientes de amplitudes entre los espectros de los equipos colocados a mayor altura, contra aquellos colocados en niveles inferiores, hasta llegar a nivel de piso. De esta manera, las formas modales estarán normalizadas con respecto a la amplitud registrada en el nivel más alto que se tenga instrumentado.

Posteriormente, se deberá conocer el espectro de fase del análisis cruzado de las señales, de tal forma que se determine la dirección en la que los niveles responden relativamente uno del otro. Esto es, si la respuesta registrada entre los niveles se encuentra en fase (ángulo de fase cercano a 0°), las amplitudes que definen la forma modal ocurren con el mismo signo; en contraste, si se encuentran en fase opuesta (ángulo de fase cercano a ±180°), las amplitudes se definen con signo contrario.

Cabe mencionar que, para definir adecuadamente la configuración de las formas modales en las que responde la estructura, será necesario seleccionar aquellas señales que dispongan de mejor calidad; ya que, en ocasiones, algunas de sus espectros no muestran amplitudes dominantes en las bandas de frecuencias de interés, lo cual se traduce en valores de fase poco adecuados, o bien, valores de coherencia relativamente bajos, sobre todo en las señales de equipos localizados a menores alturas.

**Tabla 6.3. Valores para el cálculo de formas modales.
Obtención de los dos primeros modos de vibración dominantes en traslación. Dirección T y L**

Modo	Compo- nente	Frec [Hz]	Espectro	Equipos			Transferencia Normalizada			
				E2 / E3	E2 / E5	E2 / E4	+43.200	+27.800	+6.000	+0.000
Tx ₁	T	1.23	Transferencia	1.04	11.45	30.44	1.00	0.96	0.09	0.03
			Fase	3.70	1.00	3.50				
			Coherencia	0.86	0.13	0.00				
Ty ₁	L	1.42	Transferencia	0.74	5.54	16.28	1.00	1.35	0.18	0.06
			Fase	0.70	11.90	-9.00				
			Coherencia	0.76	0.06	0.00				
Tx ₂	T	3.60	Transferencia	0.84	3.46	16.36	1.00	1.20	0.29	0.06
			Fase	1.50	-29.00	0.10				
			Coherencia	0.39	0.16	0.05				
Ty ₂	L	4.30	Transferencia	1.34	5.31	30.74	1.00	0.75	0.19	0.03
			Fase	18.10	-52.60	-3.00				
			Coherencia	0.49	0.21	0.25				

Con base en los valores presentados en la tabla 6.3, se observa que, para cada una de las frecuencias naturales en estudio, existen valores de coherencia generalmente bajos, sobre todo en aquellos equipos localizados a menores alturas o cercanos al nivel de piso. Sin embargo, los valores del espectro de fase y función de transferencia, sugieren ser adecuados y representativos para la determinación de las formas modales en cuestión.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Es importante mencionar que, si bien no se cuenta con la información completa para estimar con exactitud la configuración de las formas modales correspondientes, dado que los puntos instrumentados en la estructura resultan ser insuficientes para describir en su totalidad la configuración deformada en toda la altura del sistema (debido a las dificultades de acceso a las zonas de medición anteriormente mencionadas); se logra, a pesar de ello, construir en medida de lo posible, las formas modales dominantes en traslación de la estructura.

Esto es, con base en los valores obtenidos de la tabla anterior y su representación gráfica mostrada en la siguiente figura 6.9, se puede observar que, las frecuencias naturales identificadas para los primeros modos de vibración en la dirección "T" (1.23Hz) y "L" (1.42Hz) respectivamente, efectivamente corresponden a la configuración modal deformada típica de dichos modos. Sin embargo, en la definición de los segundos modos de las direcciones "T" (3.60Hz) y "L" (4.30Hz) respectivamente, dichas configuraciones deformadas parecen no corresponder a la forma modal buscada, ya que todo indica que el punto de inflexión que define el cambio de dirección en la respuesta del sistema, se encuentra localizado en una cota superior a la que dicha estructura se instrumentó. Ante esto, se aclara que dichas formas modales deberán ser complementadas y corroboradas, apoyándose del modelo analítico de la estructura en cuestión (inciso 6.2.3).

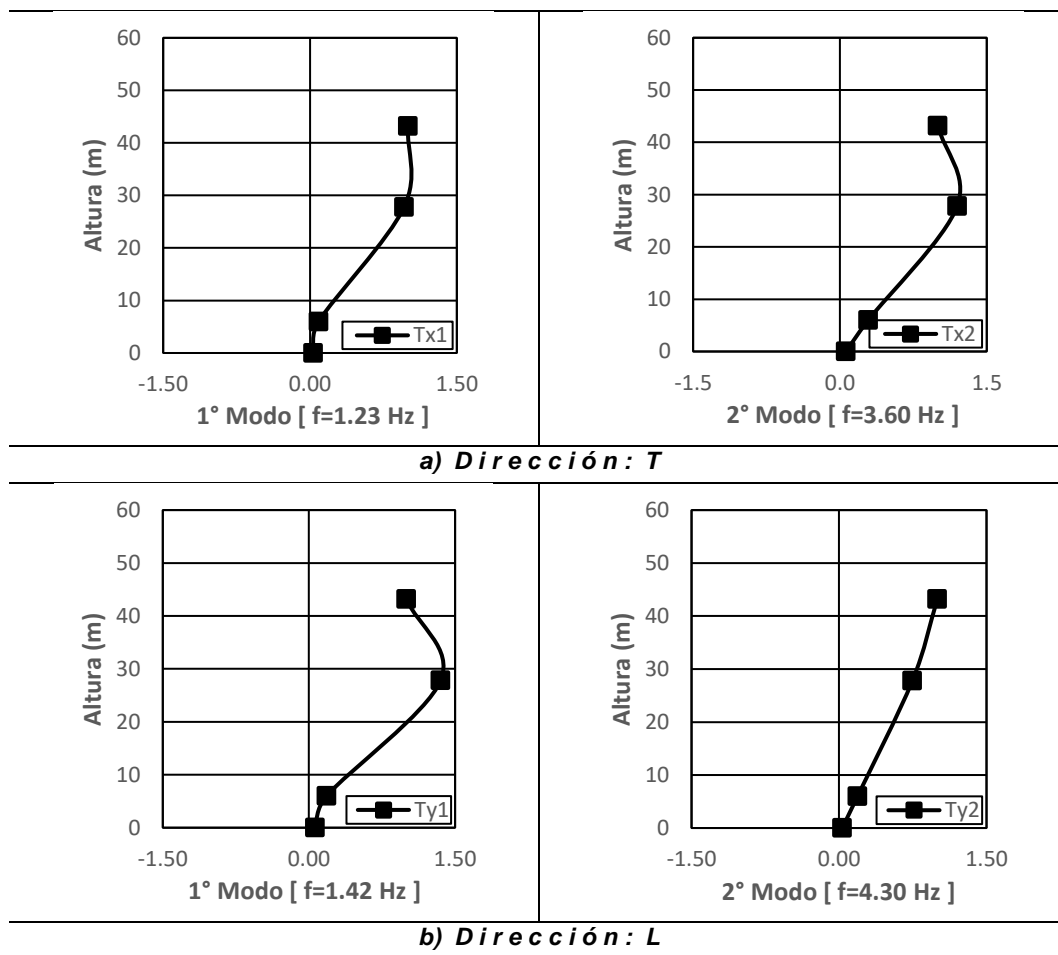


Fig. 6.9. Formas modales en traslación

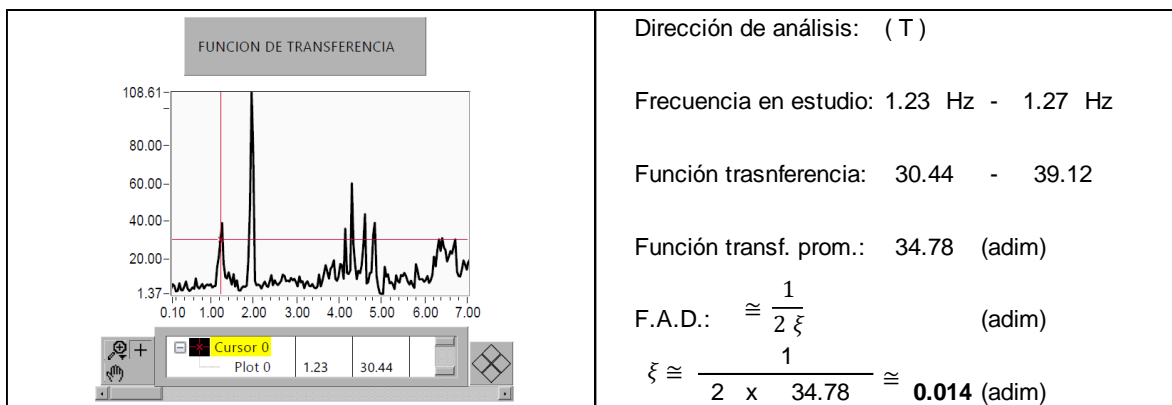
**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

6.1.3 Amortiguamiento estructural

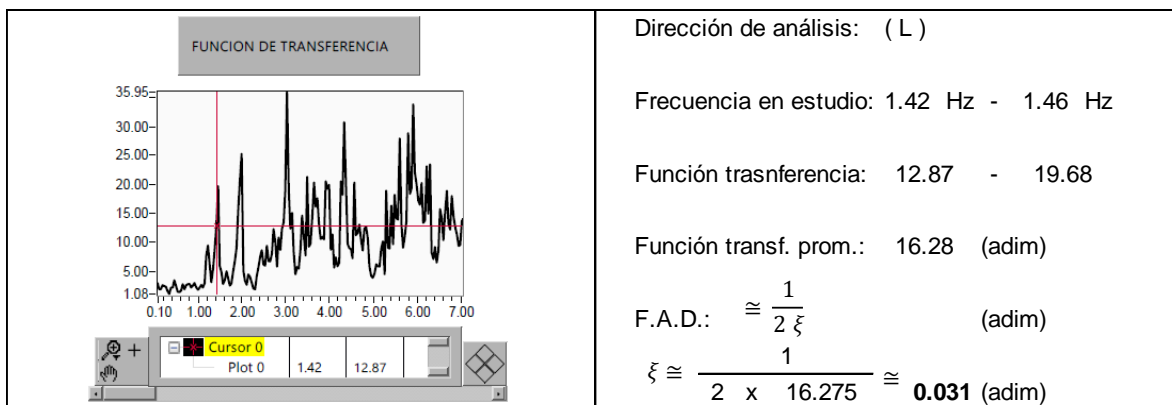
La determinación de las fracciones de amortiguamiento modal en las diferentes direcciones de análisis, asociadas a las frecuencias naturales del sistema estructural en estudio, se obtendrán con ayuda de la aplicación de dos diferentes metodologías, presentadas a continuación.

- Método del factor de amplificación dinámica

En principio, se obtendrá una primera valoración de la fracción del amortiguamiento crítico (ξ), asociado al primer modo de vibrar del sistema estructural; esto es, identificar la frecuencia de resonancia en los valores pico del espectro de función de transferencia, y aplicar el método del factor de amplificación dinámica (F.A.D.), cuya metodología fue descrita en capítulos anteriores. Es importante mencionar que, al aplicar este método y atender únicamente a la respuesta de un sistema equivalente de un grado de libertad, en lugar de la respuesta de un sistema de múltiples grados de libertad, existen errores inherentes derivados de la omisión de los modos superiores y su influencia en el comportamiento global del sistema; sin embargo, dicha metodología permitirá definir *a priori*, el nivel de amortiguación presente en la estructura en cuestión (fig. 6.10 y 6.11).



**Fig. 6.10. Cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo.
Función de transferencia, medición 6, equipos E2- E4, dirección T**



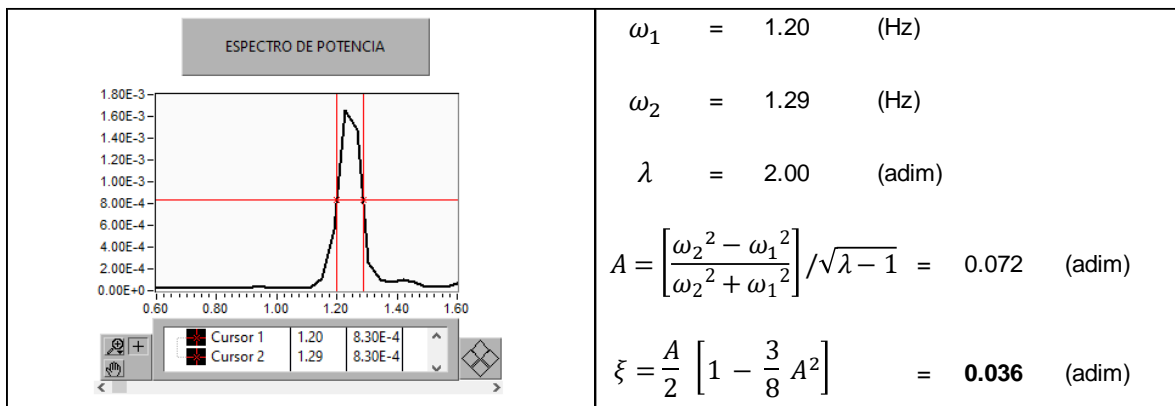
**Fig. 6.11. Cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo.
Función de transferencia, medición 6, equipos E2-E4, dirección L**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

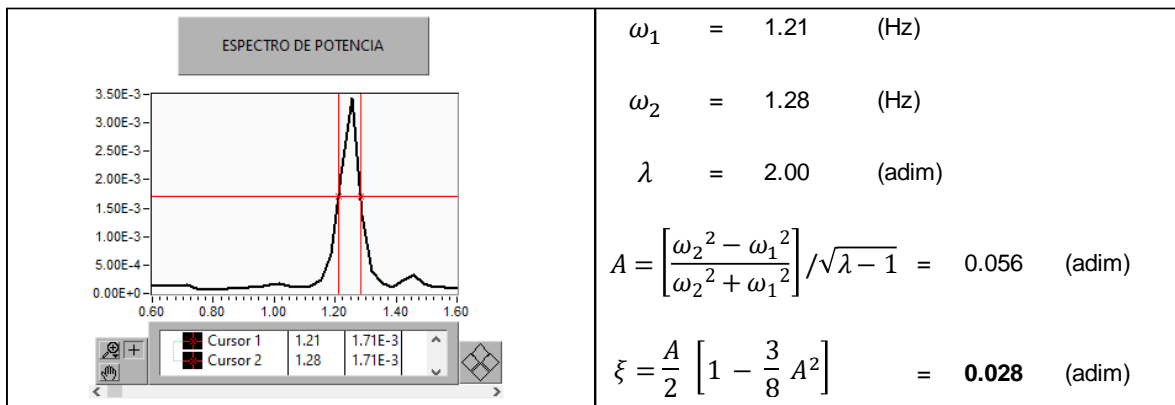
- Método de Kawasumi y Shima

Por otra parte, atendiendo a la metodología del ancho de banda del espectro de potencia desarrollada por Kawasumi y Shima (1965), se estimará la fracción de amortiguamiento crítico (ξ), seleccionado aquellos espectros de potencia de mejor resolución, y que permitan apreciar de forma clara y bien definidas, las amplitudes dominantes de las frecuencias naturales en estudio. Se aclara que, para estimar dichos valores de amortiguamiento, fueron elegidos aquellos espectros de potencia obtenidos a partir de los registros pertenecientes al equipo E2, recordando que dicho equipo, se encuentra localizado sensiblemente en la zona central del nivel más alto que se tiene instrumentado, por lo cual, se espera obtener de este, los registros más adecuados para tal fin.

A continuación, en las siguientes figuras se presentan algunos de los cálculos efectuados para la obtención de la fracción de amortiguamiento crítico (ξ); esto es, dos ejemplos para cada dirección de análisis (fig. 6.12 a fig. 6.15). Finalmente, se realizará el promedio de los valores obtenidos a partir del estudio de 7 espectros de potencia determinados para la dirección longitudinal y otros 7 espectros de potencia en la dirección transversal, los cuales corresponden a cada una de las pruebas de medición realizadas a la estructura, cuyos resultados serán presentado y resumidos más adelante.

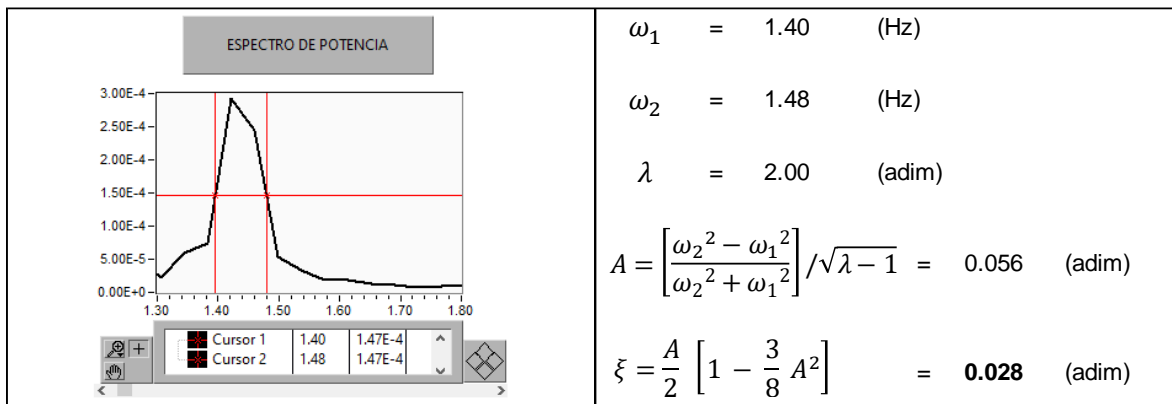


**Fig. 6.12. Cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo.
Espectro de potencia, medición 6, equipo E2, dirección T**

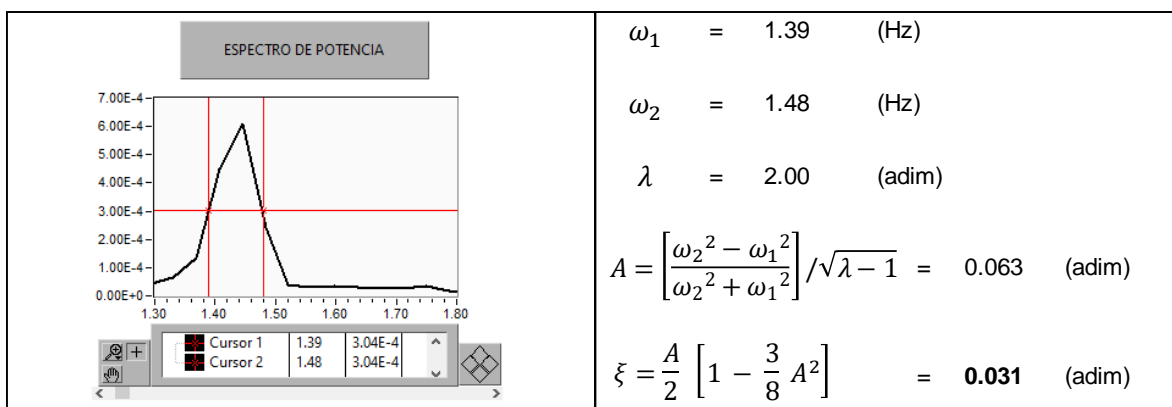


**Fig. 6.13. Cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo.
Espectro de potencia, medición 3, equipo E2, dirección T**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**



**Fig. 6.14. Cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo.
Espectro de potencia, medición 6, equipo E2, dirección L**



**Fig. 6.15. Cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo.
Espectro de potencia, medición 1, equipo E2, dirección L**

En el desarrollo de los cálculos mostrados en las figuras anteriores, empleando la metodología del ancho de banda del espectro de potencia desarrollada por Kawasumi y Shima (1965), se observa que los valores en el cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico (ξ), obtenidos a partir del parámetro λ elegido (comúnmente $\lambda = 2$), son sumamente sensibles al ancho de banda o rango de frecuencias considerado (ω_1 y ω_2); ya que, un ligero cambio en los valores de dichas frecuencias, conduce a valores diferentes del nivel de amortiguamiento. Es por ello que se resalta la importancia de la utilización de espectros de potencia bien definidos y con adecuadas resoluciones; ya que, en su defecto, la estimación de dicho parámetro podría no ser satisfactoria.

Ante esta razón, tal y como se mencionó anteriormente, procuraron ser promediados todos y cada uno de los valores disponibles del total de las siete pruebas de medición realizadas sobre la Estructura del Reactor, con la finalidad de obtener confiables y mejores resultados, mismos que se resumen a continuación.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

- Resumen de los resultados obtenidos

Con base en los valores mostrados en la presente tabla 6.4, se observa que los resultados empleado la metodología del ancho de banda del espectro de potencia desarrollada por Kawasumi y Shima (1965), muestran ser consistentes con los valores de amortiguamiento crítico comúnmente recomendados en los textos especializados y representativos de estructuras metálicas como es el caso, lo cual sugiere la validación de dichos resultados y la forma adecuada en la que estos fueron determinados.

Cabe mencionar que, si bien el empleo de metodologías alternas como la del factor de amplificación dinámica (F.A.D.), permitió definir de una forma relativamente más rápida y sencilla el nivel de amortiguamiento crítico presente en el sistema estructural analizado, se observan ciertas discrepancias que pueden atribuirse a la omisión de modos superiores y su influencia en el comportamiento global del sistema; por lo cual, se enfatiza en que la aplicación de este último método, es únicamente de carácter preliminar, cuyos resultados deberán ser siempre corroborados con la aplicación de metodologías más adecuadas tal y como aquí fue mostrado.

Tabla 6.4. Resumen de los valores de amortiguamiento crítico calculados

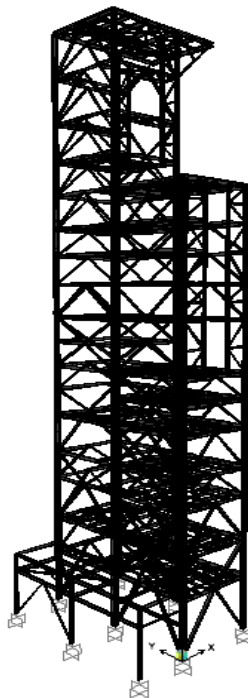
Modo	Componente	Frecuencia [Hz]	F.A.D.¹ $\xi_{prom} (\%)$	K. y S.² $\xi_{prom} (\%)$
Tx ₁	T	1.23 - 1.27	1.4	3.7
Ty ₁	L	1.42 - 1.46	3.1	2.9
Tx ₂	T	3.60 - 4.00	-	1.7
Ty ₂	L	4.30 - 4.38	-	1.0

¹ - Método del factor de amplificación dinámica.

² - Método de Kawasumi y Shima (1965).

6.2 Resultados analíticos

El modelo analítico de la Estructura del Reactor se desarrolló en el programa comercial de cómputo SAP2000 (CSI, 2018), versión 18.0.1. Dicho modelo de análisis se realizó por medio de elementos tipo barra, los cuales definen al sistema estructural esquelético a base de marcos rígidos en ambas direcciones, conformado por traveses y columnas, además de diagonales tanto verticales como horizontales. El esquema general de la modelación es mostrado en la siguiente figura 6.16.



**Fig. 6.16. Vista en isométrico del modelo analítico realizado en SAP2000 (CSI, 2018).
"Estructura del Reactor"**

6.2.1 Concepción del modelo de análisis

A partir de la información contenida en planos estructurales, mecánicos y/o diferentes diagramas de tuberías y equipos disponibles, es posible realizar el modelo analítico *teórico original* del sistema estructural en estudio, cuyas propiedades dinámicas serán críticamente comparadas contra las experimentalmente obtenidas; a fin de conocer, la severidad o grado de deterioro presente en la llamada Estructura del Reactor.

Adicionalmente, y por así ser considerado de interés, dicho modelo de análisis será posteriormente *calibrado y/o ajustado* con base en los resultados experimentales previamente mostrados; tomándose en cuenta para ello, secciones o rigideces reducidas de los elementos estructurales a fin de tratar de aproximarse a la respuesta real medida *in situ*. Lo anterior, permitirá validar y desarrollar un modelo analítico estructural, verdaderamente representativo de las características y condiciones físicas existentes de dicha estructura.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Definición de materiales

Los elementos que conforman a la estructura son, en su totalidad, perfiles estructurales de acero laminado de alma abierta, cuyas propiedades mecánicas se definen a continuación (tabla 6.5). Además, de la información disponible se identificó el empleo de acero del tipo A36 ($f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$), aunque es importante mencionar que este último parámetro, no es determinante en la obtención de las características dinámicas del sistema estructural en estudio, más no así en el cálculo de la resistencia de sus elementos; situación que, se clara queda fuera de los alcances de los trabajos desarrollados en el presente documento.

Tabla 6.5. Propiedades de los materiales

Elemento	Material	$\gamma \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$E \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	ν
Columnas	Acero A36	7 850	2 039 000	0.3
Trabes	Acero A36	7 850	2 039 000	0.3
Diagonales	Acero A36	7 850	2 039 000	0.3

Secciones y geometría

Se cuenta con información detallada a cerca de la geometría y secciones de todos y cada uno de los miembros que conforman al sistema estructural analizado; sin embargo, debido a que esta es muy extensa, se invita al lector a referirse a figuras anteriores para dar una idea de ello (fig. 5.4 y fig.5.5).

Condiciones de carga

a) Carga muerta debida al peso propio de los elementos estructurales (P_oP_o)

Considerada directamente por el programa de análisis utilizado.

b) Carga muerta debida al peso de rejilla en el sistema de piso ($CMrej$)

Se considera un peso aproximado de 45 kg/m^2 , según diversas fichas técnicas disponibles correspondientes a rejillas industriales dentadas de carga, con soleras de $4.8 \times 31.8 \text{ mm}$ y similares.

c) Carga muerta debida al peso de protección ignífuga ($CMfire$)

Se consideran cargas debida a la protección contra fuego (fireproofing en inglés), de algunos de los elementos principales que deberán ser recubiertos con materiales cementicios para tal fin, según lo indicado en la normatividad petrolera aplicable (NRF-065-PEMEX-2014, 2014).

d) Carga muerta debida al peso de tuberías y equipos en operación ($CMop$)

Se cuenta también, con información detallada acerca de la magnitud y localización de las cargas correspondientes a los diferentes recipientes, tanques, bombas y/o tuberías alojadas dentro de la estructura analizada. Los equipos críticos como el caso del tanque principal del reactor y sus dos bombas centrífugas principales, se encuentran apoyados directamente sobre el terreno, cimentados a su vez, de forma independiente a la estructura principal en estudio.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

A continuación, en la siguiente tabla 6.6, se muestra un resumen de la magnitud de las cargas consideradas en el modelo analítico del sistema estructural en estudio. Nótese que, existen cargas que teóricamente faltarían por definir, (e.g. cargas vivas de diferentes intensidades, cargas debido a pruebas hidrostáticas en tuberías y equipos, cargas accidentales de sismo o viento, etc.); sin embargo, es importante aclarar que, durante la realización de las mediciones de vibraciones y para efectos de determinar las propiedades dinámicas del sistema estructural analizado, éstas no hacen falta ni deberán ser tomadas en cuenta, a no ser que se encuentren estrictamente presentes durante la realización de tales mediciones, situación que no ocurre en este caso.

El resto de las condiciones de carga, sus intensidades y combinaciones asociadas, necesarias para realizar la etapa de diseño de la misa, quedan fuera del alcance de los trabajos aquí realizados, por lo que deberán ser consultadas en la normatividad correspondiente y aplicarlas según corresponda; tomando como referencia, en caso de ser necesario, publicaciones como aquellas mencionadas en apartados anteriores (inciso 2.4).

Tabla 6.6. Resumen de la magnitud de las condiciones de carga del sistema

Descripción	Caso	W (ton)
Peso propio	PoPo	327.27
Sistema de rejilla	CMrej	39.13
Protección contra fuego	CMfire	54.01
Tuberías y equipos	CMop	69.10
W_{TOTAL}		489.51

Condiciones de frontera

Por otra parte, es importante mencionar que para el modelo analítico realizado, se consideró a la estructura perfectamente empotrada en su base, siendo el periodo dominante del sitio ($T_s = 0.20$ s), identificado a partir de los resultados experimentales previamente analizados, uno de los principales factores que influyeron en tal decisión; puesto que, dicha situación que sugiere, la presencia un terreno de firme de apoyo, con características y propiedades competentes.

Propiedades dinámicas del modelo estructural

Finalmente, una vez definidas las propiedades de los materiales, geometría y sección transversal de los elementos, así como las condiciones necesarias de carga y frontera que influyen directamente en el comportamiento de la estructura estudio; se procede con el análisis dinámico de la misma, determinando sus propiedades teóricas originales a partir de la masa y rigidez definidas, lo que resulta en la obtención de las frecuencias naturales indicadas en la siguiente tabla 6.7 y formas modales según se muestra en las siguientes figuras (fig. 6.17 y fig. 6.18).

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

6.2.2 Frecuencias naturales de vibración

Tabla 6.7. Frecuencias y periodos naturales de vibración. Resultados analíticos

Modo de Vibrar	Descripción	Componente	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]
Tx ₁	1° - Traslación	T	1.482	0.675
Ty ₁	1° - Traslación	L	1.736	0.576
Tθ ₁	1° - Torsión	R	2.643	0.378
Tx ₂	2° - Traslación	T	4.617	0.217
Ty ₂	2° - Traslación	L	5.359	0.187
Tθ ₂	2° - Torsión	R	3.557	0.281
Tx ₃	3° - Traslación	T	9.513	0.105
Ty ₃	3° - Traslación	L	7.860	0.127
Tθ ₃	3° - Torsión	R	6.142	0.163

6.2.3 Formas modales

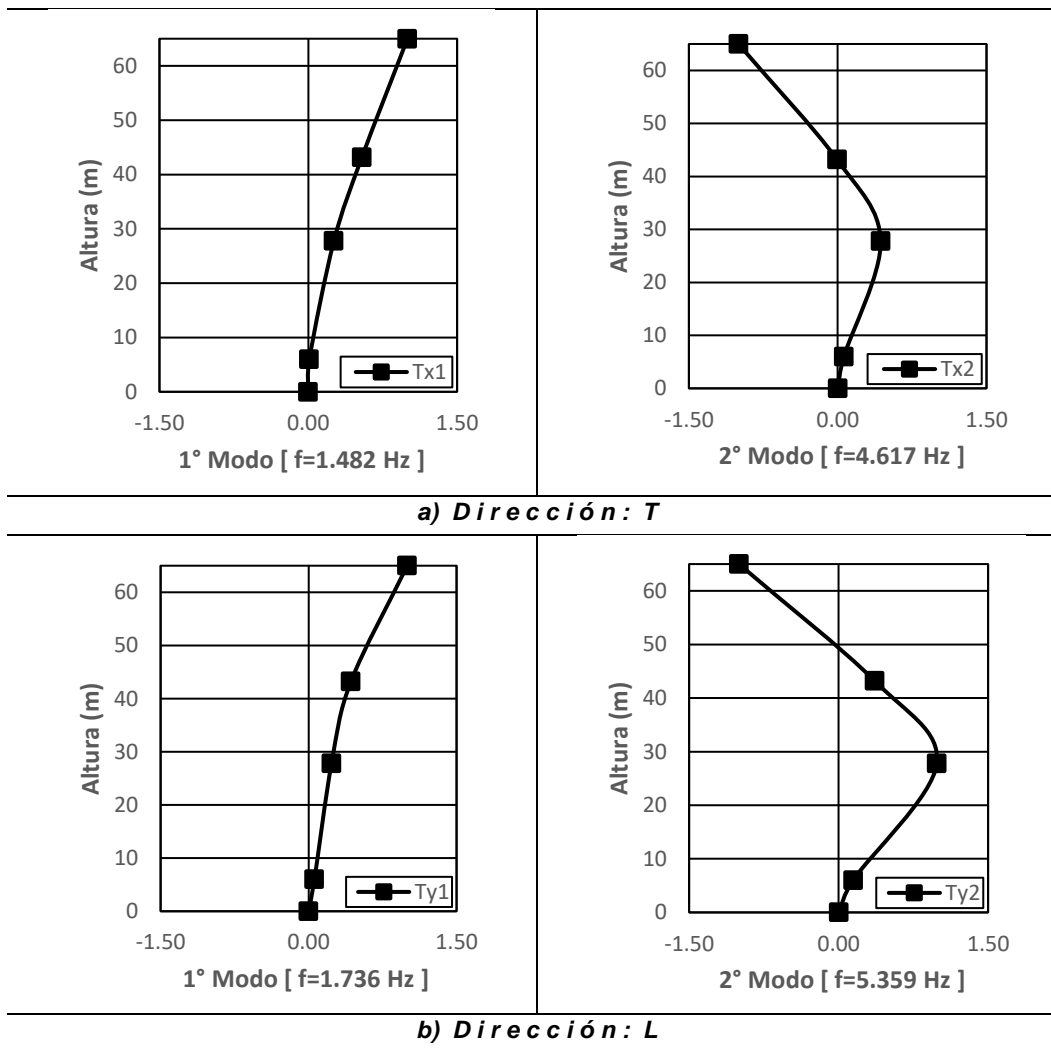


Fig. 6.17. Formas modales en traslación. Resultados analíticos

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

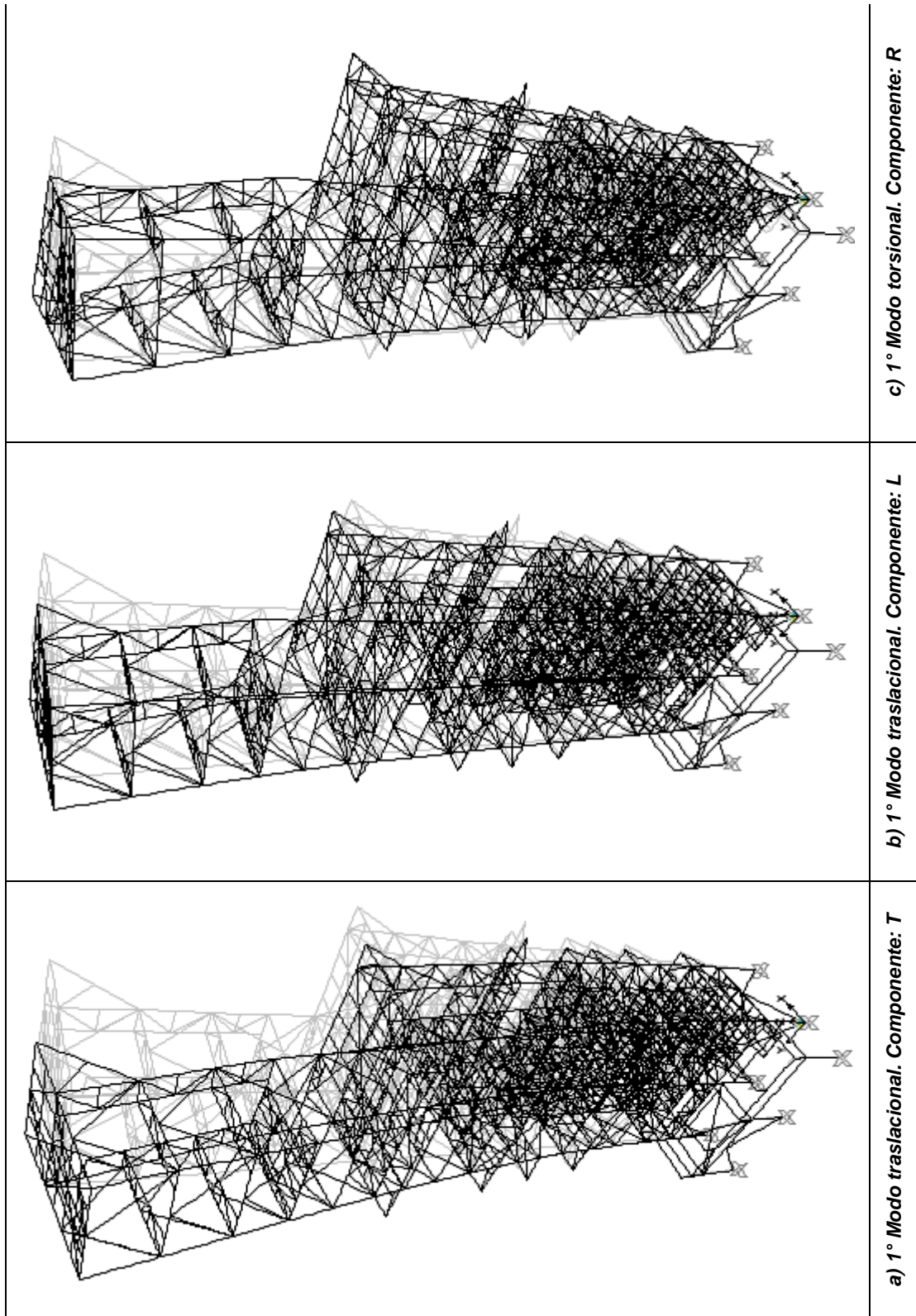


Fig. 6.18. Modelo analítico de la Estructura del Reactor. Formas modales de vibración

6.3 Comparación de resultados

Con base en los resultados obtenidos, correspondientes a las propiedades dinámicas del sistema estructural analizado, se discuten a continuación los principales aciertos y discrepancias encontrados en su determinación tanto de forma analítica como experimental; involucrando con ello, medidas cualitativas además de cuantitativas en la evaluación de las condiciones actuales que guarda la llamada “Estructura del Reactor”.

El resumen de los resultados presentados en la tabla 6.8 muestra que, para todos los casos, las frecuencias naturales obtenidas analíticamente son superiores a las que se obtuvieron de forma experimental (o lo que es lo mismo, inferiores en términos de periodos); lo cual, evidencia el hecho de que el sistema estructural ha perdido rigidez lateral a causa del deterioro presente en los elementos resistentes que lo conforman, tal y como pudo observarse en figuras anteriores (fig. 5.2).

**Tabla 6.8. Resumen de las frecuencias y periodos naturales de vibración de la estructura.
Comparación de los resultados analíticos y experimentales**

Modo	Componente	EXPERIMENTALES ¹		ANALÍTICOS ²		RELACIONES ³	
		Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Frecuencia [f_2 / f_1]	Periodo [T_1 / T_2]
T _{x1}	T	1.25	0.800	1.482	0.675	1.19	1.19
T _{y1}	L	1.44	0.694	1.736	0.576	1.21	1.21
T _{θ1}	R	1.98	0.505	2.643	0.378	1.33	1.33
T _{x2}	T	3.80	0.263	4.617	0.217	1.22	1.22
T _{y2}	L	4.34	0.230	5.359	0.187	1.23	1.23
T _{θ2}	R	3.01	0.333	3.557	0.281	1.18	1.18
T _{x3}	T	-	-	9.513	0.105	-	-
T _{y3}	L	-	-	7.860	0.127	-	-
T _{θ3}	R	4.85	0.206	6.142	0.163	1.27	1.27

¹ - Valores promedio obtenidos experimentalmente

² - Valores teóricos originales del modelo analítico

³ - Relaciones analíticas(2) y experimentales(1) de: frecuencias y/o periodos

Al respecto, las relaciones en frecuencias o periodos naturales del sistema, para cada uno de los modos de vibración identificados, muestran diferencias que van desde un 19% hasta un 33% entre las obtenidas de forma analítica contra las experimentales. Por su parte, considerando el comportamiento de un sistema equivalente de 1GDL, es posible relacionar dichas diferencias, con la rigidez lateral del sistema de la siguiente manera:

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{f_2^2}{f_1^2} = \frac{T_1^2}{T_2^2} \quad (6.1)$$

Donde:

K_2 y K_1 : son las rigideces equivalentes analíticas y experimentales respectivamente.

f_2 y f_1 : son las frecuencias analíticas y experimentales respectivamente.

T_2 y T_1 : son los periodos analíticos y experimentales respectivamente.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

De esta forma, para las frecuencias o periodos naturales asociados a los primeros modos de vibración en cada dirección de análisis, la relación en rigidez analítica contra la experimental se obtiene a partir de la ecs. 6.2 y 6.3 para las componentes T y L respectivamente.

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{1.482^2}{1.25^2} = \frac{0.8^2}{0.675^2} = 1.41 \quad (6.2)$$

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{1.736^2}{1.44^2} = \frac{0.694^2}{0.576^2} = 1.45 \quad (6.3)$$

Lo anterior, aunque ofrece una idea relativamente simple de la relación de rigideces asociada a las frecuencias o periodos naturales de vibración del sistema analizado, proporciona también, una medida cuantitativa del deterioro presente en la estructura; puesto que así, las rigideces laterales provenientes del modelo analítico, muestran ser desde un 41% a 45% mayores a las obtenidas de forma experimental, según la dirección de análisis considerada. Si se obtiene el valor inverso del cociente dado por las ecuaciones anteriores, se puede inferir que la pérdida de rigidez lateral es, en términos generales, de un 30% aproximadamente.

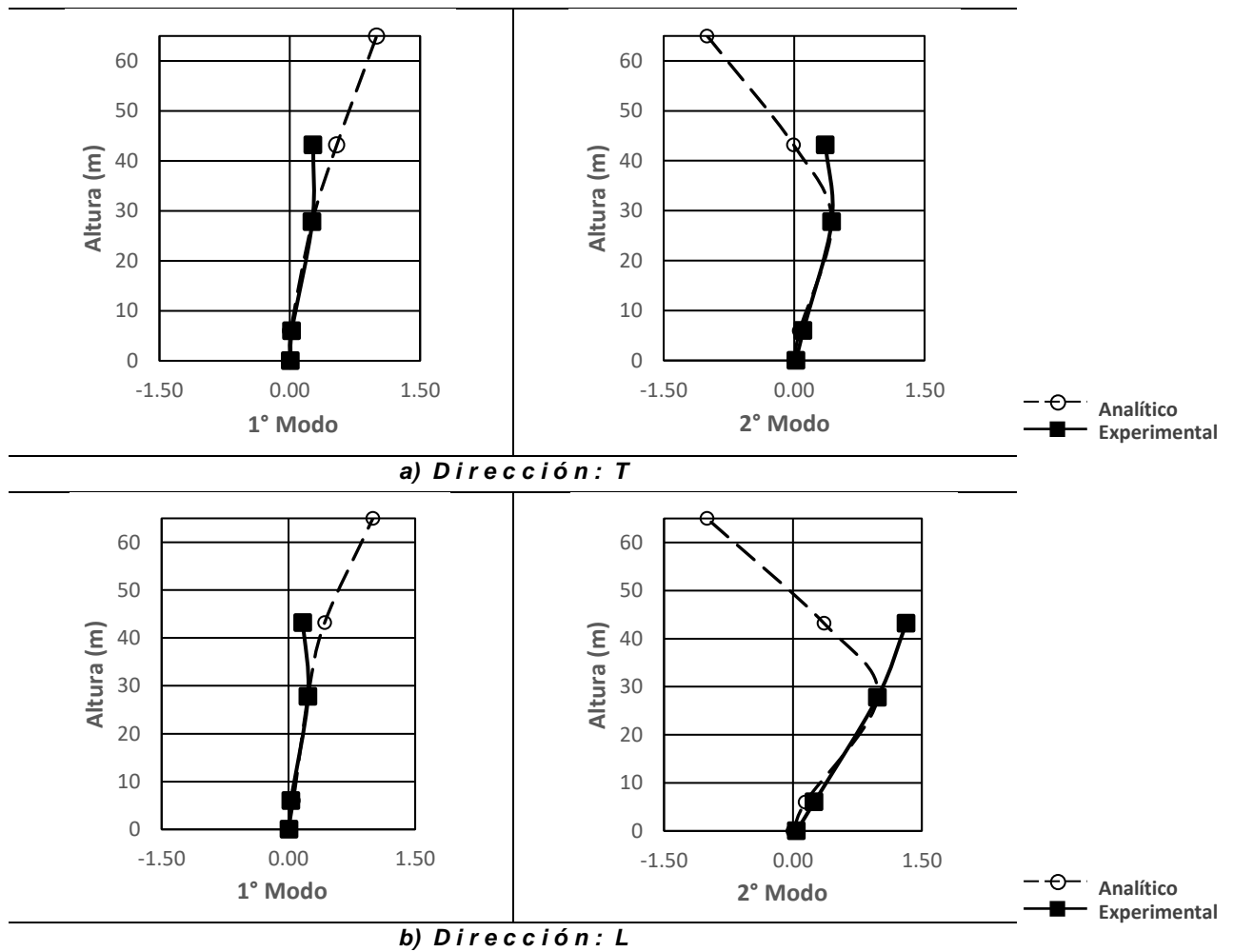


Fig. 6.19. Formas modales de vibración. Comparación de resultados analíticos y experimentales

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Ahora bien, atendiendo a las configuraciones modales presentadas en la figura anterior (fig. 6.19), se muestra que las formas modales tanto analíticas como experimentales, correspondientes al primer modo de vibración en las dos diferentes direcciones de análisis T y L, resultan ser muy parecidas entre sí, hasta donde es posible compararlas (el último nivel instrumentado); sobre todo, en zonas de media altura y niveles inferiores. Lo anterior, contrasta con las formas modales correspondientes al segundo modo de vibración, en donde se aprecia una mayor discrepancia entre ellas.

Las diferencias encontradas en la determinación y construcción de dichas formas modales, se atribuyen principalmente a las dificultades en la determinación experimental de las frecuencias naturales y modos superiores asociados; traducidas directamente en valores de coherencia relativamente bajos, además de funciones de transferencia y ángulos de fase poco adecuados; tan es así que incluso, no se logró definir experimentalmente, el punto de inflexión de la estructura en su segundo modo traslacional en las direcciones T y L respectivamente. Los resultados ofrecidos analíticamente, permitieron a solventar algunas de estas dificultades.

Por su parte, con respecto a los niveles de amortiguamiento crítico medidos (3% aproximadamente, para los primeros modos dominantes en traslación), se resalta el hecho de que fue posible obtener fracciones de este valor, representativos de estructuras metálicas como es el caso, y que resultaron ser congruentes con las suposiciones del comportamiento de sistemas poco amortiguados. Aunque es importante mencionar que, tanto este parámetro, como el resto de las propiedades dinámicas aquí discutidas, dependen de manera importante de la calidad de las mediciones y niveles de excitaciones impuestas a la estructura.

Finalmente, cabe mencionar que, con base en los resultados experimentales previamente analizados, y a partir del modelo analítico *teórico original* de la estructura anteriormente desarrollado, dicho modelo estructural fue posteriormente *calibrado*, a fin de tratar de aproximarse a la respuesta real de la estructura medida *in situ*; considerando para ello, secciones reducidas por efectos del deterioro de sus principales elementos resistentes. Esto es, para aquellos elementos verticales tales como columnas y contraenteos, los cuales proveen en mayor medida de rigidez lateral al sistema, se consideró un factor de modificación de inercia (en columnas) igual a 0.90 alrededor de sus ejes locales “x” y “y” respectivamente; además de un factor de modificación del área de la sección transversal (en contraenteos) igual a 0.30.

Los resultados del proceso de calibración de la rigidez lateral de la estructura, y por ende, el comportamiento dinámico de la misma a través de la implementación de las modificaciones anteriores, se muestran en la siguiente tabla 6.9; en donde se observa que, para las principales frecuencias naturales de vibración del sistema estructural analizado, los resultados analíticos calibrados son muy similares a los experimentalmente obtenidos, lo cual permite afirmar que dicho modelo de análisis, reproduce de manera práctica y de forma adecuada, las condiciones físicas reales existentes de dicha estructura.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

**Tabla 6.9. Comparación de frecuencias y periodos naturales de vibración.
Calibración del modelo analítico estructural**

Modo	Compo- nente	EXPERIMENTALES ¹		ANALÍTICOS ²		%ERROR ³	
		Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Frecuencia [%]	Periodo [%]
Tx ₁	T	1.25	0.800	1.288	0.777	3.03	2.94
Ty ₁	L	1.44	0.694	1.399	0.715	2.82	2.90
Tθ ₁	R	1.98	0.505	1.970	0.508	0.50	0.50

¹ - Valores promedio obtenidos experimentalmente

² - Valores del modelo analítico calibrado

³ - Porcentaje de error experimental

Sin duda, el desarrollo de este último modelo de análisis, resulta ser muy ventajoso, puesto que, de ser necesario, este podrá ser utilizado en la etapa de diseño y revisión estructural del sistema analizado, conforme a los requisitos normativos vigentes e incluso, servir de base para el proyecto de reforzamiento de la estructura en cuestión.

En resumen, derivado de la evidencia anteriormente mostrada, es posible afirmar que se logró una adecuada determinación experimental de las principales características que influyen en el comportamiento dinámico del sistema estructural en estudio, además de la concepción de modelos analíticos verdaderamente representativos de sus propiedades y condiciones físicas existentes. Si se desea la evaluación detallada de frecuencias naturales y de modos superiores de vibración de dicho sistema estructural, con valores comparables a los que se obtendrían de un modelo analítico, se requeriría de un estudio más exhaustivo del sistema, que contemple una instrumentación mucho más densa y permita con ello, una mejor estimación de su respuesta.

Capítulo 7

Evaluación de los efectos de las vibraciones en Estructuras Industriales

7.1 Antecedentes

La naturaleza en la evolución del conocimiento y avances tecnológicos, han propiciado el desarrollo constante de materiales cada vez más competentes, aprovechando su uso al máximo y utilizándolos en favor de la construcción (*i.e.* materiales de altas resistencias, aleaciones particulares de metales, procedimientos constructivos novedosos, etc.). Con ello, se ha promovido la existencia de estructuras mucho más esbeltas, las cuales han permitido salvar grandes claros y llegar a su vez, a alturas mucho mayores; sin embargo, estas últimas se han vuelto mucho más flexibles y propensas a sufrir vibraciones nocivas ocasionadas por diversos tipos de fuentes excitadoras, por lo que es importante tomar las medidas necesarias para mitigarlas o reducirlas a límites tolerables.

Particularmente, el hecho de evaluar el efecto de las vibraciones en los diferentes tipos de sistemas estructurales, así como su influencia perjudicial en los usuarios y/o diversos contenidos alojados dentro de los mismos, es un problema verdaderamente complejo y, pese a que dichos efectos han sido estudiados desde ya algunas décadas, aún existe trabajo por delante a realizar en esta materia, puesto que su aplicación en la práctica profesional de la ingeniería estructural, sigue siendo limitada.

Aunado a ello, ante la ausencia de criterios de diseño y lineamientos sólidos en cuanto al tema del control de vibraciones para las estructuras en nuestro país, es común recurrir en práctica, a normas internacionales especializadas en la materia; por lo cual, en el presente capítulo, se pretende realizar una revisión detallada de estas, con el fin de determinar, si las amplitudes registradas presentes en el sistema estructural en estudio, se encuentran dentro o no, de los límites comúnmente aceptables en la industria, procurando con ello, la seguridad de los usuarios, equipos e integridad estructural.

7.2 Proceso de evaluación

Generalmente, los procedimientos y estrategias adoptados para evaluar el fenómeno de las vibraciones y sus efectos deberán contemplar al menos lo siguiente: (1) Identificación de la fuente, (2) Evaluación de su severidad y (3) Control de sus efectos (fig. 7.1).

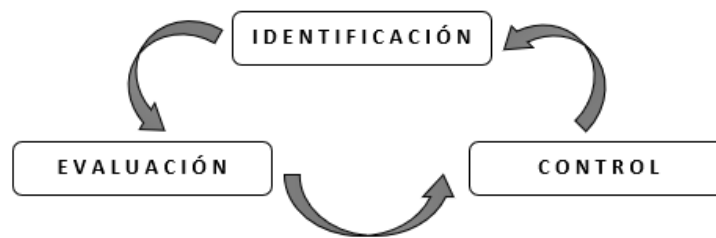


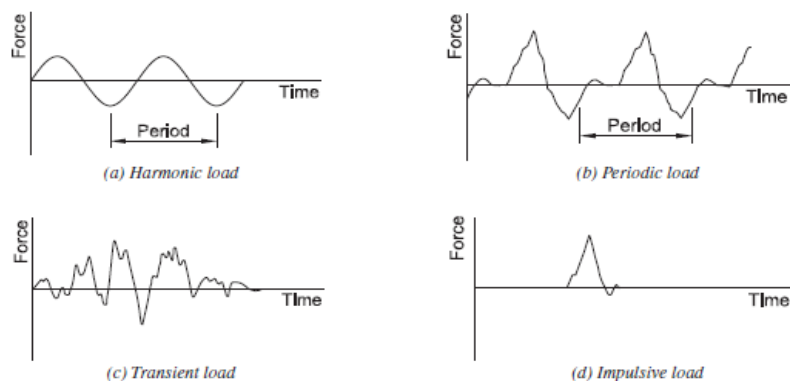
Fig. 7.1. Proceso en la evaluación de las vibraciones y sus efectos

- Identificación

El proceso inicia con la identificación de las fuentes de excitación, puesto que las vibraciones presentes en el sistema estructural pueden ser debidas a más de un solo factor, entre los cuales destacan: la propia actividad humana desarrollada dentro del inmueble, la presencia de máquinas o equipos efectuando trabajos dentro y fuera de la misma, además de otro tipo de fuentes externas de carácter natural o accidental.

Acciones como estas, son siempre consideradas dentro de los procesos de diseño en las estructuras analizadas, aunque en muchas ocasiones, no basta con solo revisar las deflexiones que ellas producen y/o satisfacer la resistencia de los elementos estructurales, puesto que el cumplir estos requerimientos, no asegura la inexistencia de vibraciones perjudiciales dentro del sistema. Es por ello que, deberán siempre plantearse revisiones adicionales encaminadas a un mejor tratamiento del fenómeno, similares a las mostradas más adelante en este mismo trabajo.

Al respecto, en términos generales, las vibraciones inducidas a un sistema dado pueden ser clasificadas de acuerdo con su duración como *transitorias* o *estacionarias*; pudiendo subdividirse a su vez, en diferentes tipos como las mostradas en la figura 7.2, a fin de ofrecer una mejor evaluación del fenómeno. En casos en donde la revisión de estructuras existentes es requerida, la efectiva detección de las fuentes de vibración e identificación de sus principales características, juegan un papel trascendente en el entendimiento del problema, cuya información básica es fundamental para establecer el panorama de las posibles soluciones que ayuden a mitigarlo.



**Fig. 7.2. Tipos de acciones dinámicas que producen vibraciones en estructuras
(Steel Design Guide 11. AISC, 2016.)**

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

- **Evaluación**

Para evaluar la severidad de las vibraciones y sus efectos en los diferentes sistemas estructurales, la inspección basada en el monitoreo dinámico de las estructuras, resulta ser una parte fundamental en el manejo efectivo de tal problemática. Las principales fortalezas y características del empleo de este tipo de técnicas fueron descritas anteriormente y, una vez más, en el presente capítulo, se resaltarán su importancia haciendo uso de ellas para determinar las condiciones en las que actualmente se encuentra la estructura en estudio.

Particularmente y dependiendo de la fuente que se trate, la evaluación del efecto de las vibraciones puede basarse tanto en las mediciones del desplazamiento, velocidad o aceleraciones que estas producen. Para acciones debidas a la actividad humana, por ejemplo, los criterios internacionales comúnmente se basan en los valores medios cuadráticos de la aceleración registrada, en lugar de valores pico o máximos; mientras que, en las vibraciones producidas por maquinarias, las recomendaciones se basan normalmente en el control de las velocidades registradas, aunque también, pueden valerse de los valores máximos o pico a pico de los desplazamientos registrados, tal y como se ilustra en la siguiente figura. 7.3.

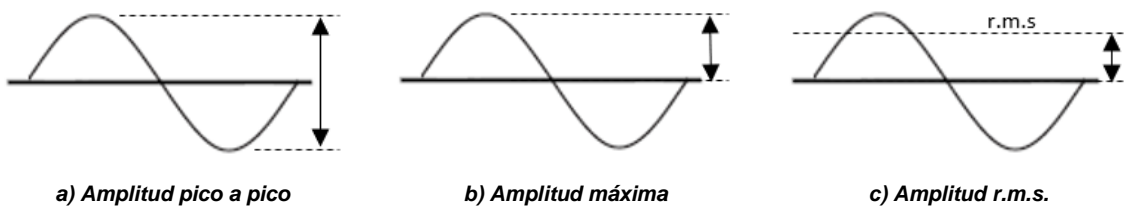


Fig. 7.3. Diferentes criterios empleados en la evaluación del efecto de las vibraciones registradas

- **Control**

Finalmente, deberán tomarse las medidas correctivas necesarias a fin de mitigar las vibraciones y sus efectos, ya que estas, pueden causar desde la incomodidad en los usuarios, hasta posibles fallos en equipo electromecánico sensible, además de poner en riesgo la estabilidad de la estructura o bien, causar daño en sus elementos tanto estructurales como no estructurales.

Nuevamente, dependiendo del tipo de fuente que se trate, se sugieren tomar las siguientes acciones enlistadas a continuación. Dichas acciones, son enunciativas más no limitativas y pueden incluso, tomarse medidas adicionales o bien, una combinación de ellas.

- a) Reducción de vibraciones en la fuente.
- b) Aislamiento o impedimento en su propagación.
- c) Modificación del sistema estructural y sus características dinámicas.

7.3 Límites y criterios de aceptación

Atendiendo al efecto que las vibraciones pueden causar sobre: (1) personas, (2) máquinas y equipos, o bien, (3) en las estructuras; la mayoría de la normatividad internacional aplicable, establece los siguientes criterios de aceptación: (a) psicológicos o de confort, (b) calidad de operaciones, o bien, (c) integridad estructural (tabla 7.1).

Tabla 7.1. Criterios de aceptación para vibraciones según sus efectos

Efecto de las vibraciones	Criterios de aceptación
(1) Efectos sobre las personas	(a) Criterios psicológicos o de confort
(2) Efectos sobre máquinas y equipos	(b) Criterios en la calidad de operaciones
(3) Efectos en las estructuras	(c) Criterios de integridad estructural

Generalmente, pese a que no existe un consenso universalmente aceptado en los niveles admisibles de vibraciones presentes en las estructuras que pueden provocar daños al personal y/o contenido sensible alojado dentro de ellas, la gran mayoría de las normas internacionales especializadas en la materia, establecen sus propios límites concernientes al control de vibraciones, en función tanto de las amplitudes (e.g. similares a las mostradas anteriormente en la fig. 7.3), así como de las frecuencias en los movimientos registrados.

Los diferentes lineamientos y criterios establecidos en dicha normatividad, cuyas principales características serán detalladas a continuación, son el resultado de un cúmulo importante de recomendaciones prácticas basadas, ya sea en conocimientos de carácter empírico o bien, en resultados de estudios tanto analíticos como experimentales. Por lo cual, para un correcto tratamiento del problema, deberán ser siempre tomadas en cuenta, considerando cuales de ellas pueden o no aplicar al caso de estudio que estemos tratando, teniendo presentes sus diferentes consideraciones, alcances y limitaciones.

7.4 Normatividad aplicable

7.4.1 Criterios psicológicos

La sensibilidad humana a las vibraciones es muy aguda. La respuesta humana ante ellas, depende de una gran cantidad de factores, tales como la posición del individuo, la dirección y duración de la excitación, e incluso, edad y sexo de los afectados; en otras palabras, la percepción de las vibraciones en las personas, no es igual en aquellas que permanecen sentadas, de pie, o que se encuentren desarrollando actividades específicas como dormir, manejar, correr, etc. (Bachmann et al., 1995). A saber, aceleraciones permanentes del orden de $0.005g$ a $0.010g$ pueden llegar a ser molestas en personas dentro de ambientes de trabajo poco dinámicos (e.g. bibliotecas, oficinas, etc.), mientras que en lugares destinados a intensas actividades físicas (e.g. gimnasios, estadios, etc.), se toleran niveles de entre 10 a 20 veces mayores, lo cual ofrece una idea de la variabilidad del fenómeno.

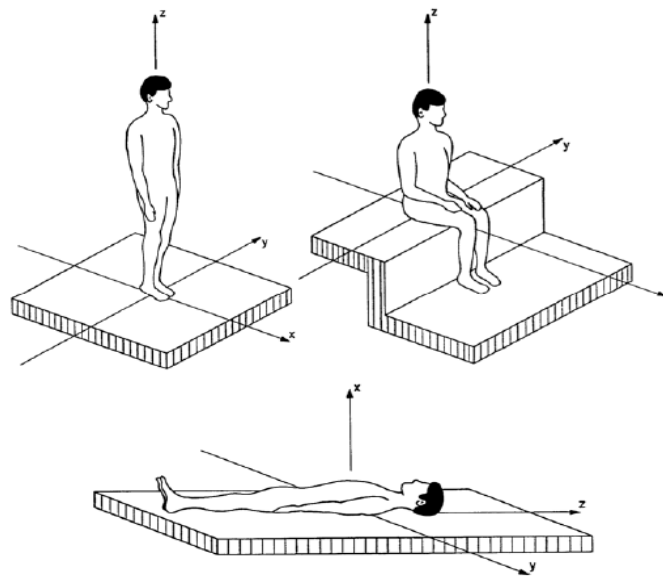


Fig. 7.4. Ejes coordenados de referencia para evaluar el efecto de las vibraciones sobre las personas definidos en diferentes normas internacionales ISO 2631, BS 6472 y AS 2670

▪ **Normas Técnicas Complementarias del RCDF**

Como es sabido, el principal objetivo dentro del proceso convencional de diseño de una estructura, es no rebasar bajo ningún caso, los estados límite de falla y servicio que la reglamentación establece; siendo la presencia de vibraciones (además de desplazamientos, agrietamientos o cualquier otra circunstancia que afecte al correcto funcionamiento del sistema), una condición tratada como un estado de límite de servicio que deberá ser necesario cumplir.

Al respecto, la vigente Norma Técnica Complementaria sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (NTC-CADEE-2017), únicamente reconoce la existencia de la problemática, a sabiendas que deberán acotarse las máximas amplitudes de vibraciones de acuerdo con su frecuencia, a fin de evitar condiciones que afecten al correcto funcionamiento del inmueble, así como la comodidad o seguridad de sus ocupantes y/o contenidos; sin embargo, dichos límites no son establecidos.

Por su parte, en las correspondientes normas para el diseño y construcción de estructuras de concreto y estructuras de acero, (NTC-DCEC-2017) y (NTC-DCEA-2020) respectivamente, se han realizado los primeros intentos en incluir recomendaciones prácticas para la revisión de aquellos sistemas de piso susceptibles a vibraciones producidas por la actividad humana. Sin embargo, conviene aclarar que en aquellos los sistemas de piso cuya frecuencia natural de vibración está comprendida entre 2Hz y 6Hz, se recomiendan criterios de diseño mucho más detallados, puesto que se reconoce que muchas de las actividades humanas están comprendidas dentro de estos mismos valores, lo que puede ocasionar posibles efectos de amplificaciones por resonancia en ellos.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Particularmente, dichas normas de concreto establecen el cálculo de un factor de sensibilidad K (ec.7.1), cuyos valores son clasificados en nueve diferentes categorías, que van desde A hasta I (tabla 7.2), categorías relacionadas a su vez, con niveles de vibraciones que van desde imperceptibles hasta muy fuertemente perceptibles; estas últimas no son admisibles y mucho menos tolerables para el ser humano, por lo que deberán tomarse las medidas necesarias para evitarlas.

$$K = d \frac{f^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (7.1)$$

Donde:

- d : es la amplitud de la vibración, en mm.
- f : es la frecuencia de la vibración, en Hz.
- f_0 : es una frecuencia de referencia, igual a 10Hz.

**Tabla 7.2. Percepción humana de vibraciones en estructuras
(NTC-DCEC-2017)**

K	Clase	Percepción humana
$K < 0.10$	A	Imperceptible
$0.10 \leq K < 0.25$	B	Ligeramente perceptible
$0.25 \leq K < 0.63$	C	Perceptible
$0.63 \leq K < 1.60$	D	Fácilmente perceptible
$1.60 \leq K < 4.00$	E	Fuertemente perceptible
$4.00 \leq K < 10.00$	F	Muy fuertemente perceptible
$10.00 \leq K < 25.00$	G	
$25.00 \leq K < 63.00$	H	
$63.00 \leq K$	I	

En cuanto a las recomendaciones indicadas en las normas de diseño de estructuras de acero, el panorama es aún más restrictivo, pues en ellas únicamente se indican situaciones potencialmente problemáticas de vibraciones que requieran consideraciones de diseño adicionales. De manera que, si la frecuencia natural del sistema de piso se estima a partir de una viga libremente apoyada (ec.7.2), cuya deflexión máxima se estima como en la ec.7.3, la frecuencia natural de vibración puede expresarse con la ec. 7.4. Si quisiéramos que la frecuencia natural sea de aproximadamente unos 8Hz, la deflexión máxima de una viga cualquiera debería limitarse a unos 5mm a fin de evitar posibles efectos resonantes en el sistema de piso; situación que, muy difícilmente se logrará en la práctica.

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{g E I}{w L^4} \right)^{1/2} \quad (7.2)$$

$$\Delta = \frac{5 w L^4}{384 E I} \quad (7.3)$$

$$f_0 = 0.18 \sqrt{g/\Delta} \quad (7.4)$$

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Donde:

- f_o : es la frecuencia natural del sistema de piso, en Hz.
- Δ : es la deflexión máxima del elemento al centro del claro.
- w : es la suma de las cargas gravitacionales.
- g : es la aceleración de la gravedad, igual a 9.81 m/s^2 .
- EI : es la rigidez a flexión del sistema de piso.

- **AISC – Steel Design Guide 11 (2016)**

Dadas las importantes restricciones en las recomendaciones anteriores, publicaciones realizadas por el AISC, particularmente la Guía de Diseño 11: Vibraciones en Sistemas Estructurales de Acero Debido a la Actividad Humana (AISC, 2016), proporcionan procedimientos analíticos efectivos para evaluar la serviciabilidad de los sistemas de piso de las estructuras ante vibraciones. Estas recomendaciones se basan a su vez, en criterios internacionales especializados en la materia como son las normas internacionales ISO 2631 y/o equivalentes.

Así pues, la condición de serviciabilidad por vibraciones en los sistemas de piso se cumple cuando:

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o e^{-.35 f_n}}{\beta W} \leq \frac{a_o}{g} \quad (7.5)$$

Donde:

- a_p/g : es la aceleración pico expresada como fracción de la aceleración de gravedad.
- P_o : es la amplitud de la fuerza de referencia, 65 lb (0.29 KN).
- W : es el peso efectivo tributario del sistema de piso, en lb (o KN).
- f_n : es la frecuencia natural del sistema de piso, en Hz.
- β : es la fracción de amortiguamiento crítico del sistema de piso, cuyo valor sugerido es 0.02.
- a_o/g : es la aceleración permisible expresada en función de la aceleración de gravedad (tabla 7.3)

**Tabla 7.3. Valores de aceleración límite recomendados
(Steel Design Guide 11. AISC, 2016)**

Ocupación del inmueble	Aceleración límite a_o/g
Oficinas, residencias, iglesias, escuelas áreas quietas y similares	0.5 %
Centros comerciales	1.5 %

- **Norma Internacional ISO 2631 (1997)**

La norma internacional ISO 2631, publica en una serie de dos partes (ISO 2631-1) e (ISO 2631-2), los requerimientos correspondientes a la Evaluación de la Exposición Humana a las Vibraciones en Cuerpo Completo, cuyo rango de frecuencias en estudio abarca desde 1 y hasta 80 Hz.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

En la presente norma, los niveles de aceleración registrados están referidos en términos de sus valores medios cuadráticos (r.m.s.); de tal forma que, proporcionan una medida estadística del fenómeno físico observado y, a diferencia de sus valores pico o máximos, los valores r.m.s. han mostrado ser un mejor indicador de la vibración con respecto del tiempo, además de un mejor parámetro para establecer los límites del movimiento correspondientes.

Los criterios básicos de revisión se proporcionan de forma gráfica en función de los tiempos de exposición, frecuencia y niveles de aceleración ponderados sobre las personas afectadas; siendo un criterio ampliamente utilizado y establecido como referencia en muchas otras normas extranjeras equivalentes, tal y como se mencionará más adelante.

Por otra parte, en ella se consideran algunos cambios fundamentales que conviene mencionar, por ejemplo, su especial tratamiento a los potenciales problemas y alteraciones en la salud de los individuos (afectaciones lumbares, sistema nervioso, etc.), ocasionados por la exposición constante y prolongada a las vibraciones de cuerpo completo de alta intensidad (fig. 7.5); los cuales, por simplicidad, son muchas veces incluidos en otro tipo de normas dentro de las mismas afectaciones relacionadas con el confort, fatiga y/o reducción en la eficiencia del trabajo.

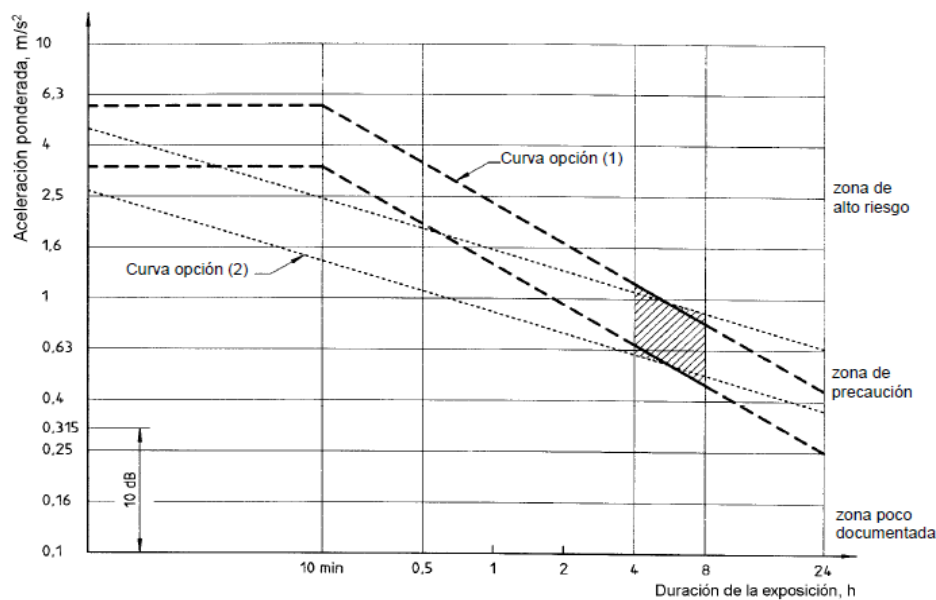


Fig. 7.5. Zonas de precaución sugeridas en el cuidado de la salud (ISO 2631-1, 1997)

▪ Norma Australiana AS 2670 (1990)

Los límites de exposición humana ante vibraciones presentados por la norma australiana AS 2670, al igual que muchas otras normas internacionales, se relacionan con su homólogo ISO anteriormente descrito. De forma similar, la presente norma se compone fundamentalmente de dos partes, a saber: AS 2670.1 y AS 2670.2 respectivamente.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

En ellas, la evaluación de las vibraciones sobre el cuerpo humano se establece en función de una curva base con dependencia de la dirección del movimiento (fig. 7.6); la cual, deberá ser multiplicada por distintos factores (tabla 7.4) que dependen a su vez, de la ocupación o destino de la estructura, a fin de conocer si los umbrales de aceleración registrados se encuentran dentro de los admisibles.

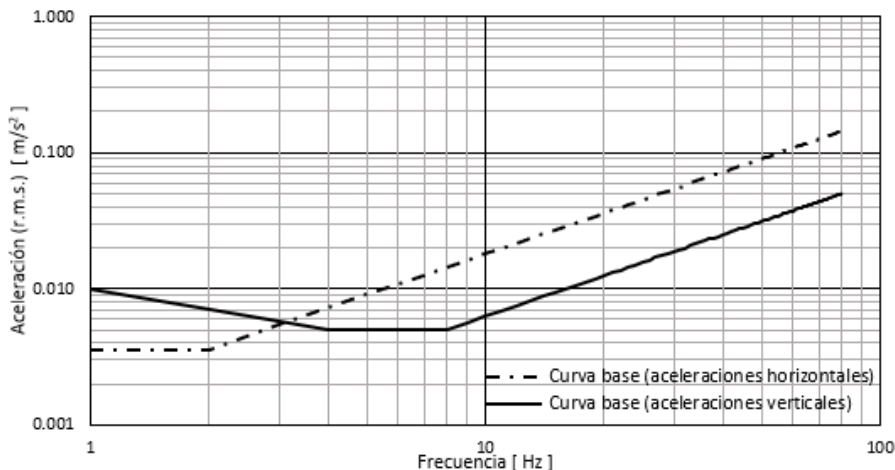


Fig. 7.6. Curva base de aceleraciones para estimar el nivel de vibraciones permisibles (AS 2670.2, 1990)

Tabla 7.4. Factores de multiplicación aplicados a las curvas base de aceleraciones (AS 2670.2, 1990)

Categoría	Tiempo	Vibración continua	Vibración transitoria (varios eventos al día)
Áreas críticas de trabajo como hospitales, laboratorios de precisión y similares	Día	1	1
	Noche		
Residencial	Día	2 - 4	30 - 90
	Noche	1.4	1.4 - 20
Oficinas	Día	4	60 - 128
	Noche		
Edificios industriales	Día	8	90 - 128
	Noche		

7.4.2 Criterios en la calidad de operaciones

Para evaluar el efecto que las vibraciones causan sobre diferentes tipos de máquinas y/o equipos electromecánicos, se han establecido diferentes criterios y procedimientos de diseño formulados a partir de conocimientos tanto empíricos como analíticos (Arya et al., 1979); los cuales a su vez, han sido ampliamente documentados en diversos códigos de diseño (ACI 351.3R-04, 2004) y/o normas internacionales especializadas en la materia (ISO 10816, 1995).

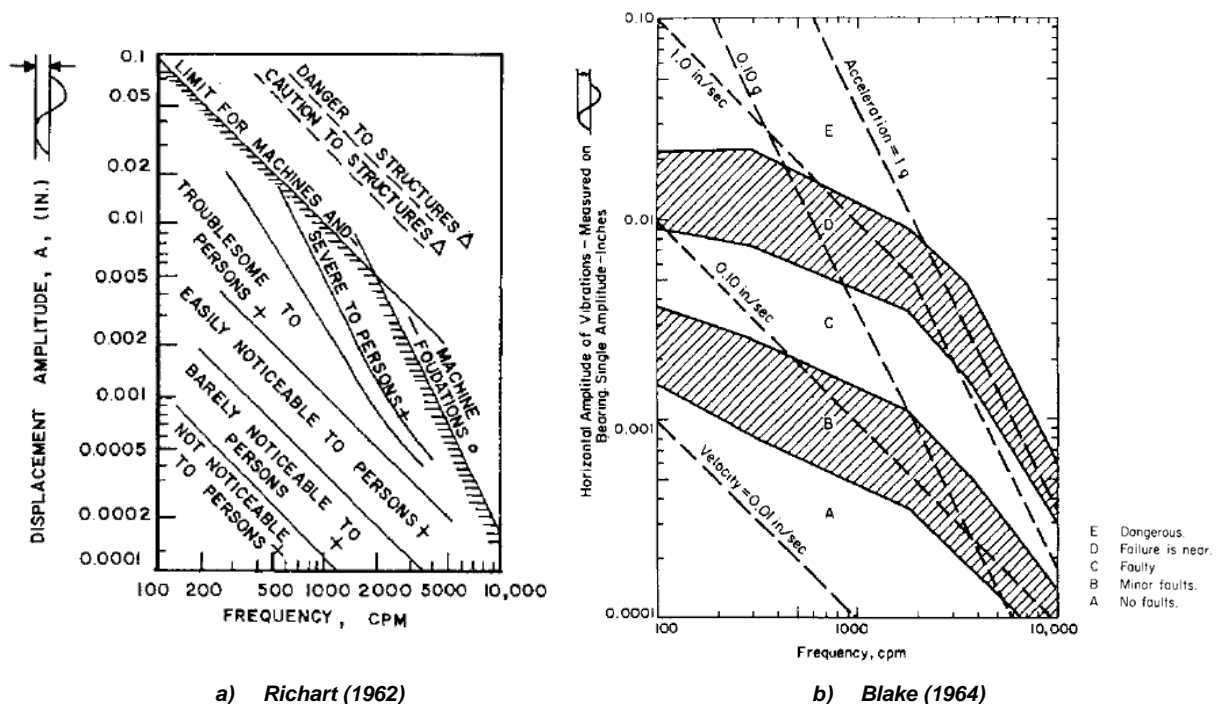
CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

A diferencia de los criterios psicológicos y de confort anteriormente descritos, los niveles de vibración utilizados para efectos de evaluación en los criterios de la calidad de operaciones son comúnmente referidos en función de las velocidades registradas y rara vez en términos de aceleraciones o sus desplazamientos. Los límites permisibles son comúnmente representados en gráficas de amplitudes contra la frecuencia propia de operación de los diferentes tipos de máquinas o equipos (*i.e.* rotatorios, recíprocantes y/o de impacto), conocidas ordinariamente como *cartas de severidad* de vibraciones.

▪ Criterios de Richart (1962) y Blake (1964)

Algunos de los primeros trabajos realizados sobre la evaluación de las vibraciones y su efecto sobre máquinas y equipo electromecánico diverso, fueron presentados por (Richart, 1962) y (Blake, 1964) respectivamente, a raíz del desarrollo que la industria petrolera y de refinación en la unión americana experimentó en aquella época; este último criterio inclusive, sigue siendo ampliamente utilizado en la actualidad como una referencia básica para diferentes firmas de diseño y proveedores afines a esta área de la industria (ACI 351.3R-04, 2004).

Richart (1962), propuso límites generales a las amplitudes del movimiento registrado en función de la frecuencia de operación de los equipos (fig. 7.7a). Por su parte, Blake (1964), lo hace de una forma mucho más detallada (fig. 7.7b), incluyendo consideraciones relacionadas con el costo inicial, de reparación, mantenimiento o posibles remplazos de la unidad (casos A hasta E, ver tabla 7.5), e introduciendo con ello, el parámetro denominado como *factor de servicio* (tabla 7.6).



**Fig. 7.7. Cartas de severidad de vibraciones para maquinarias
(Modificado por Arya et. al., 1979)**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

**Tabla 7.5. Casos aplicables a la carta de severidad de vibraciones de Blake (1964)
(Traducido de Arya et. al., 1979)**

Descripción de los casos	Acciones u Observaciones
A: Sin fallas.	Vibraciones típicas de equipos nuevos.
B: Fallas menores.	Correcciones que implican algunos gastos.
C: Defectuoso.	Corregir dentro de un lapso de 10 días para eliminar fuertes gastos de mantenimiento.
D: Falla cercana.	Corregir dentro de un lapso de 2 días para evitar averías.
E: Peligroso.	Apagar para evitar daños.

**Tabla 7.6. Factores de servicio de Blake (1964)
(Traducido de Arya et. al., 1979)**

Ocupación del inmueble	Factores de servicio FS
Arreglo individual de bombas centrífugas, motores eléctricos, ventiladores.	1.0
Equipos típicos de proceso químico e industria, no críticos.	1.0
Turbinas, turbogeneradores, compresores centrífugos.	1.6
Arreglo múltiple de bombas centrífugas y otros equipos de eje rígido.	2.0
Equipos misceláneos, características desconocidas.	2.0
Bombas centrífugas de eje suspendido, verticales y similares.	0.5
Bombas suspendidas menores.	0.3

▪ **Norma Internacional ISO 10816 (1995)**

La norma internacional ISO 10816, aborda en una serie de seis partes la evaluación de las condiciones de operación de maquinarias ante vibraciones por medio de mediciones realizadas en campo y, pese a que en ellas no se establecen explícitamente procedimientos analíticos ni de diseño, son una referencia internacional en la calidad de los diseños ofrecidos por los proveedores y otras referencias normativas equivalentes.

La parte 1 (ISO 2631-1) establece los requerimientos generales de la norma e identifica, a su vez cuatro diferentes zonas con respecto a las magnitudes de las vibraciones observadas en términos del valor de la raíz media cuadrática r.m.s. de las velocidades, tal y como a continuación se indica:

Zona A: vibraciones típicas de equipos nuevos.

Zona B: vibraciones consideradas como aceptables para operaciones a largo plazo.

Zona C: vibraciones consideradas como insatisfactorias para operaciones a largo plazo.

Zona D: vibraciones consideradas lo suficientemente severas como para dañar a la maquinaria.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

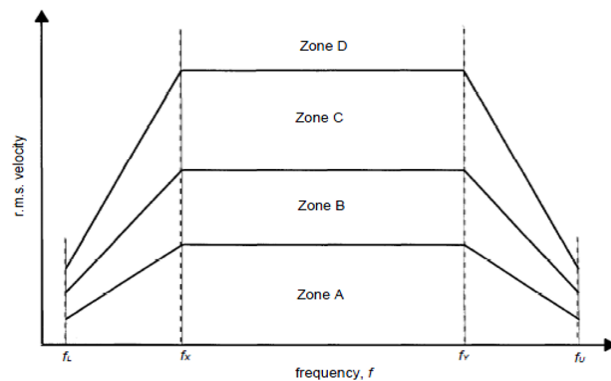


Fig. 7.8. Formal general de los criterios de aceptación para vibraciones en maquinaria (Norma Internacional ISO-10816-1, 1995)

Las partes subsecuentes de la norma, establecen los límites particulares de cada zona en específico en función de las características propias de el o los equipos que se traten. Al respecto, la parte 2 (ISO 10816-2) de la norma, establece los criterios correspondientes a grandes turbinas de vapor que excedan los 50 MW (67,000 hp). La parte 3 (ISO 10816-3) en cambio, conforma uno de los criterios más genéricos de la evaluación de las vibraciones en las máquinas, puesto que abarca equipos de más de 15 KW (20 hp) y velocidades de operación de entre 120 y 15,000 rpm; tal es el caso de los equipos instalados en la estructura analizada. Por otro lado, la parte 4 (ISO 10816-4) es exclusiva para turbinas de gas, cuya operación se encuentre entre 3,000 y 20,000 rpm.; mientras que la parte 5 (ISO 10816-5) es aplicable a máquinas para conjuntos hidro-eléctricos y plantas de bombeo. Finalmente, la parte 6 (ISO 10816-6), concierne a equipos recíprocos de especiales tratamientos.

Como se ha reflejado en esta breve compilación, las recomendaciones indicadas son establecidas en su mayoría para equipos centrífugos, rotatorios y/o similares, siendo únicamente algunas de ellas, aplicables a equipos del tipo recíproco, mientras que, en rara o nula ocasión, estas son aplicables a equipos impulsivos o de impacto; por lo que hay que tener siempre presentes sus usos y alcances.

▪ Normas API (1995)

Finalmente, otra de las normas comúnmente utilizadas en el medio, que atienden tanto a los requisitos mínimos de diseño, así como a los niveles de vibración permisibles en los equipos relacionados con la industria petroquímica y similares, son las publicadas por el Instituto Americano del Petróleo (API, en inglés). Este cuenta con una amplia información relativa a especificaciones y criterios aplicables en los diferentes equipos diseñados para dar servicio a sus propias instalaciones. Normas de este tipo incluso, son muchas veces empleadas como referencia en países como México.

Con relación a los requerimientos mínimos para equipos del tipo rotatorio o centrífugos, como lo son los existentes en el caso de estudio aquí presentado, normas como Bombas Centrífugas para la Industria Petrolera, Química Pesada y Gas (API 610, 1995), además de Compresores Centrífugos para la Industria Petrolera, Química Pesada y Gas (API 617, 1995), establecen lo siguiente.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

En la correspondiente norma API 610, se establecen límites de vibraciones permisibles en función del valor de la raíz media cuadrática (r.m.s) de la velocidad y, dependiendo si las mediciones fueron o no previamente filtradas para el análisis particular de la frecuencia de operación del equipo en estudio, se establecen los siguientes límites:

$$V_u < 3.00 \text{ mm/sec r.m.s.} \quad (7.6)$$

$$V_f < 2.00 \text{ mm/sec r.m.s.} \quad (7.7)$$

Donde:

V_u : es la velocidad sin filtrar del registro, que contiene a todas las frecuencias en general.

V_f : es la velocidad filtrada del registro, para el estudio particular de la frecuencia de operación.

Por su parte, en la norma API 617 se identifican limitaciones de las vibraciones en función de la amplitud pico a pico (peak-to-peak) de los desplazamientos sin filtrar registrados, específicamente durante las pruebas mecánicas de taller realizadas a los equipos compresores funcionando a su máxima velocidad de operación continua, justo antes de su instalación y puesta en marcha definitiva.

$$A = 25.4\sqrt{12,000/N} \leq 25 \mu\text{m} \quad (7.8)$$

Donde:

A : es la amplitud máxima pico a pico sin filtrar de la vibración registrada, en μm (micrómetros).

N : es la velocidad máxima de operación continua del equipo, en rpm.

▪ Observaciones adicionales

Conviene aclarar que, para satisfacer todos los requerimientos anteriormente descritos, o en su defecto, elegir el criterio de mejor conveniencia, será necesario el trabajo en conjunto de propietarios, ingenieros mecánicos, civiles, operadores y proveedores que estén directamente relacionados con el sistema de servicio e instalación del equipo, debido a la naturaleza multidisciplinaria que conlleva la ejecución de proyectos que incluyen la operación de estos tipos de máquinas.

En la siguiente figura (fig. 7.9), se muestra la comparación de 9 diferentes criterios aplicables a la evaluación de las vibraciones que se registraron para equipos particulares en condiciones normales de servicio; 5 de ellos, son recomendaciones establecidas en normas o publicaciones como las que aquí se mencionaron, mientras que los 4 criterios restantes, corresponden a los procedimientos y estándares de calidad en el diseño de diferentes compañías proveedoras. Las comparaciones se presentan tomando diferentes bases en común, siendo el desplazamiento pico a pico el más conveniente para ello.

Así pues, los resultados muestran que los proveedores tienden a ser un tanto más conservadores en sus diseños, en contraste con lo que establecen las publicaciones y normas correspondientes.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

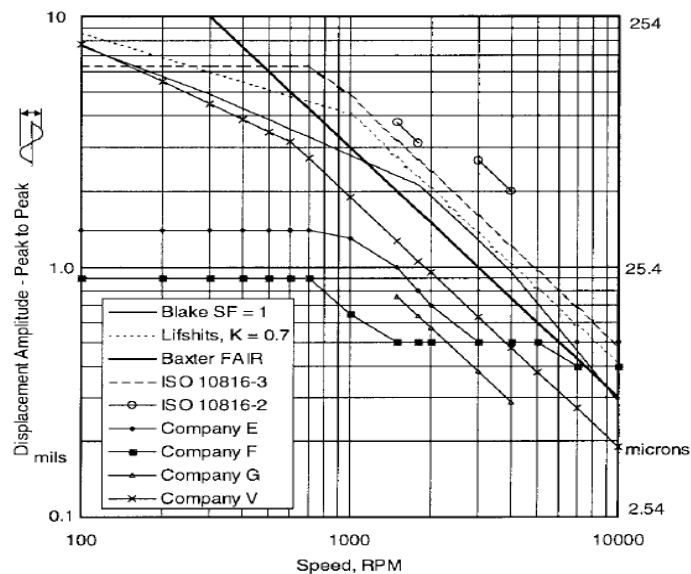


Fig. 7.9. Comparación de amplitudes de vibraciones permisibles (ACI 351.3R-04, 2004)

Lo anterior se debe principalmente a que las empresas prevén situaciones más desfavorables desde la etapa de diseño en sus propios equipos, situaciones que en las decisiones de mantenimiento y verificaciones *in situ* no son tomadas en cuenta. Por otra parte, se observa claramente que los límites impuestos tienden a ser más restrictivos en aquellos equipos con mayores frecuencias de operación, además que las diferencias encontradas entre los diferentes criterios de aceptación son cada vez menores en esas zonas.

Los comentarios u observaciones anteriores, no pretenden hacer notar que ciertas recomendaciones son mejores a otras, sino más bien que se deben adoptar los criterios necesarios que mejor se crean convenientes, teniendo presente desde luego, los alcances y limitaciones de cada una de ellas. Por esto, en muchas ocasiones será necesario basarse en más de uno solo de los criterios anteriores y, de ser necesario, en un adecuado juicio ingenieril multidisciplinario.

7.4.3 Criterios de integridad estructural

Las diferentes acciones permanentes, variables y accidentales que obran en un sistema estructural, son consideradas dentro del proceso de análisis y diseño del mismo, a fin de determinar si se cumple o no, con las diferentes disposiciones que la reglamentación local y normativa aplicable establecen. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, deberá ser necesario prestar particular atención a la revisión de posibles efectos dinámicos como las vibraciones que dichas acciones pueden causar (e.g., la operación de maquinaria y equipo, tránsito vehicular, e incluso, la propia actividad humana desarrollada dentro del inmueble). En este caso, el cumplimiento en la resistencia y deformaciones de todos los elementos que conforman al sistema, no garantizan la inexistencia de posibles vibraciones nocivas que puedan llegar a causar daños o bien, comprometer la integridad de la estructura potencializando el efecto perjudicial patologías ya existentes.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Los valores recomendados bajo el criterio de integridad estructural se muestran a continuación.

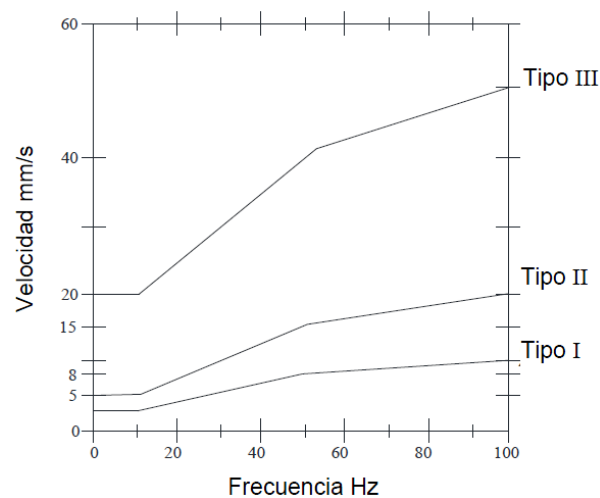
▪ **Norma DIN 4150 (1999)**

La normativa alemana DIN 4150, es una de las especificaciones internacionales de mayor uso en esta materia, la cual se compone de tres partes (DIN 4150-1, 4150-2 y 4150-3). Esta última, establece valores indicativos para evaluar el efecto de las vibraciones en estructuras, a fin de evitar la pérdida en su serviciabilidad; pudiendo ocasionar con ello, la posible interrupción en su ocupación y/o actividades de usuarios u operarios de la misma.

Los límites de prevención establecidos en (DIN 4150-3, 1999), para vibraciones transitorias o de corta duración, son función tanto de la velocidad máxima registrada en el sistema, así como del contenido frecuencial del movimiento presente en la cimentación o plano horizontal del piso más alto.

**Tabla 7.7. Valores máximos de velocidad de partícula. Vibraciones transitorias DIN 4150-3
(Escamilla et al., 2016)**

Tipo de Estructura	Cimentación			Nivel Superior
	(1 – 10 Hz)	(10 – 50 Hz)	(50 – 100 Hz)	(Cualquiera)
Edificaciones industriales, oficinas, comercios y similares	20	20 - 40	40 - 50	40
Edificaciones residenciales y similares	5	50 - 15	15 - 20	15
Otras edificaciones especiales o sensibles a vibraciones	3	3 - 8	8 - 10	8



**Fig. 7.10. Velocidades máximas en cimentaciones para los tres diferentes tipos de estructuras
(Escamilla et al., 2016)**

7.5 Evaluación de la serviciabilidad ante vibraciones del caso de estudio

La evaluación de la serviciabilidad ante vibraciones de la Estructura del Reactor se realizará primero en función de los criterios psicológicos establecidos por la norma australiana AS 2670 (1990); posteriormente se hará lo propio en función de los límites de calidad de operaciones establecidos en la normativa ISO 10816 (1995) y bajo los criterios de Blake (1964) respectivamente. Los resultados obtenidos se indican a continuación.

7.5.1 Límites psicológicos

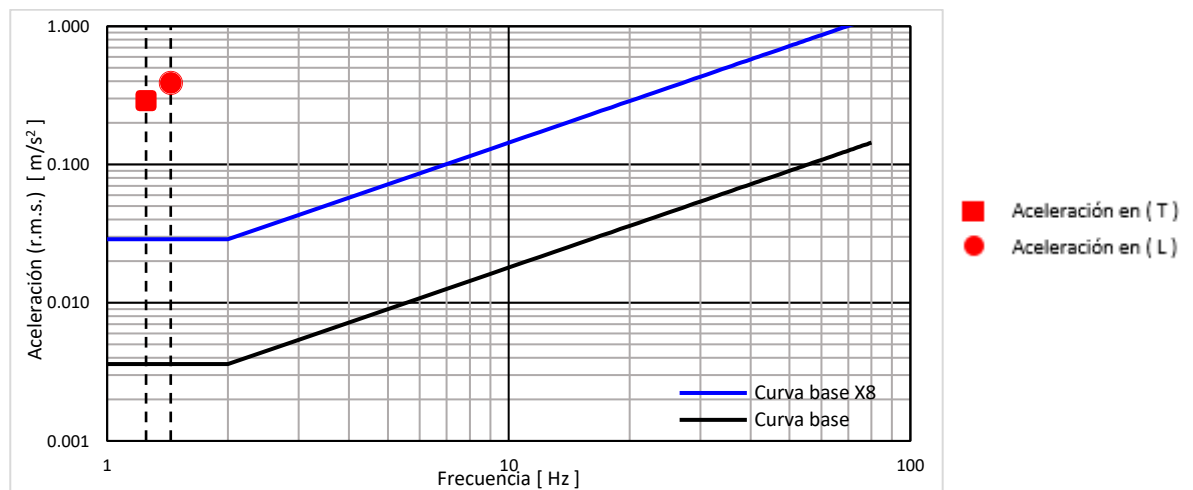
- Norma Australiana AS 2670 (1990)

Para realizar esta revisión, se tomaron los resultados de la identificación experimental de las frecuencias naturales de vibración de la estructura, además de los valores medios cuadráticos de las aceleraciones (r.m.s.) registradas en cada uno de los instrumentos de medición. En la siguiente tabla 7.8, se muestra el resumen de los resultados obtenidos; mismos que se representan de forma gráfica en las siguientes figuras (fig. 7.11 y fig. 7.12).

**Tabla 7.8. Revisión de los niveles de vibración máximos registrados
conforme a Norma Australiana (AS 2670.2, 1990)**

Frecuencias naturales promedio identificadas experimentalmente			Aceleraciones registradas		Límite permisible AS 2670 [m/s ²]	Resultados
Modo	Componente	Frecuencia [Hz]	Registro Núm.	RMS _{MAX} [m/s ²]		
T _{x1}	T	1.25	E2_03002	0.288	0.029	No cumple
T _{y1}	L	1.44	E3_03007	0.390	0.029	No cumple
T _{z1}	V	7.35	E3_03002	0.192	0.040	No cumple

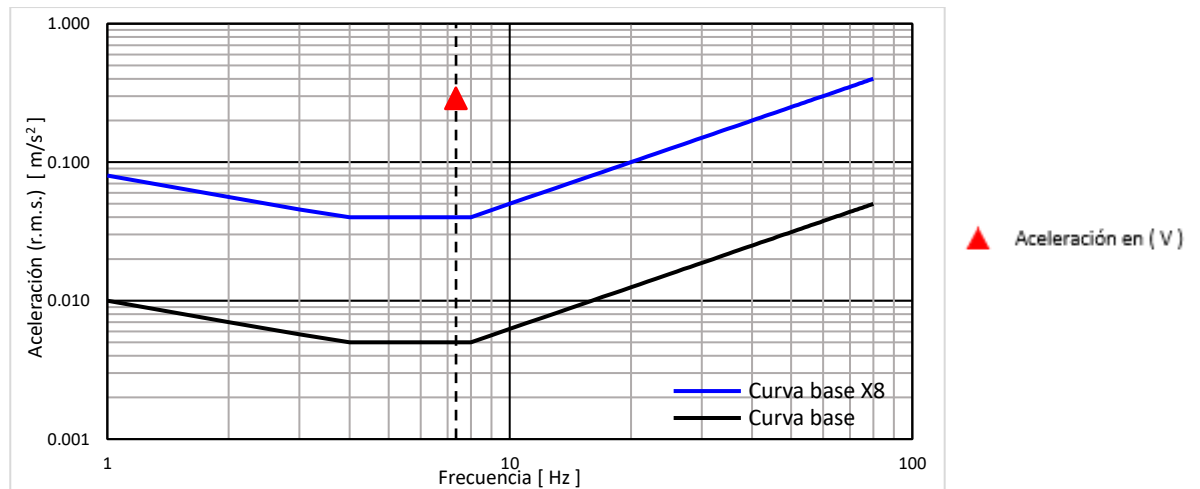
- Vibraciones Horizontales



**Fig. 7.11. Límites de aceleraciones horizontales permisibles (curva base x8).
Norma Australiana (AS 2670.2, 1990)**

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

- Vibraciones Verticales



**Fig. 7.12. Límites de aceleraciones verticales permisibles (curva base x8).
Norma Australiana (AS 2670.2, 1990)**

En los gráficos previamente mostrados de frecuencia contra aceleración, se observa que las amplitudes medias cuadráticas de las aceleraciones (r.m.s.) registradas, rebasan en más de 10 veces las aceleraciones horizontales permisibles en las direcciones de análisis (T) y (L) respectivamente; por su parte, las aceleraciones verticales obtenidas (V), resultan ser alrededor de 5 veces mayores a las permisibles por esta norma.

En otras palabras, las aceleraciones registradas dentro de los niveles de piso de la llamada Estructura del Reactor, exceden los límites de confort permitidos de acuerdo al código AS 2670; situación que, afecta directamente al desempeño de los trabajos realizados por los usuarios, personal *in situ* u operarios de la misma, pudiendo llegar incluso, a potencializar eventuales accidentes en las diferentes actividades realizadas que son ya de por sí, consideradas de alto riesgo e inherentes al sector industrial o áreas de trabajo similares.

7.5.2 Límites de calidad de operaciones

Por otra parte, resulta de vital importancia verificar el estado que aguardan los diferentes equipos instalados dentro de la estructura en cuestión, ya que posibles fallos o mal funcionamiento de estos, significarían importantes pérdidas económicas y, en el peor de los casos, de la vida humana.

Al respecto, las amplitudes de las vibraciones que repercuten en la calidad de las operaciones de la maquinaria y/o equipo electromecánico existente, se revisarán en función de los registros de velocidades obtenidos a partir de las mediciones realizadas, además de la frecuencia natural de operación de los propios equipos, bajo los siguientes criterios que a continuación se describen.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

- Norma Internacional ISO 10816 (1995)

Para revisar las vibraciones presentes en la estructura en cuestión y que posiblemente afectan de forma negativa al funcionamiento de la maquinaria alojada dentro de la misma, será necesario conocer las características básicas de los equipos como su frecuencia natural de operación, además de otros aspectos estrechamente involucrados como su tamaño y potencia. Estos parámetros definirán los límites permisibles en función del grupo o clase del equipo analizado.

Brevemente se menciona que las clases o grupos de máquinas definidas en ISO 10816-1, son:

- Clase I: Máquinas o motores eléctricos de hasta 15 kW (20 hp).
- Clase II: Máquinas medianas con motores eléctricos de entre 15 kW y hasta 75 kW (20 hp – 100 hp) sin soportes o cimentaciones que se consideren especiales.
- Clase III: Máquinas grandes y motores primarios de masas excéntricas, montados sobre soportes o cimentaciones especiales.
- Clase IV: Máquinas del tipo turbogeneradoras, turbinas de gas y similares, montados sobre soportes o cimentaciones especiales, y con potencias superiores a los 10 MW (13,000 hp).

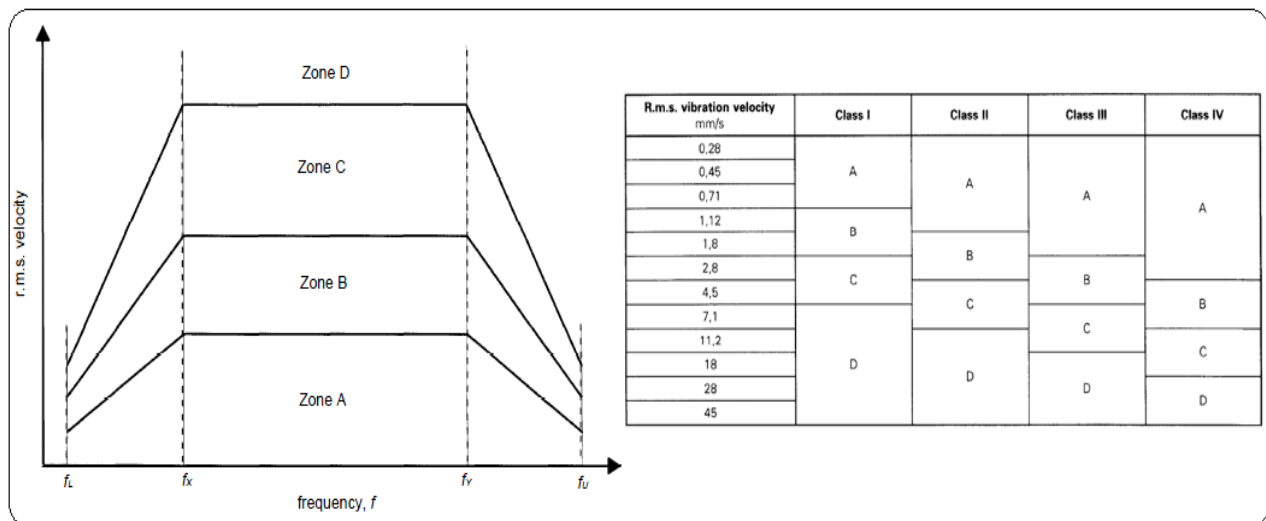


Fig. 7.13. Forma general de los criterios de aceptación de vibraciones (izquierda) y límites de zona típicos (derecha). Norma Internacional (ISO 10816-1, 1995)

De forma general se establecen los límites anteriormente indicados fig. 7.13 y, a medida que se obtenga información más concreta de los equipos existentes, las partes subsecuentes de la norma establecerán límites más específicos para ello. A saber, los equipos electromecánicos rotatorios instalados dentro de la estructura en cuestión, corresponden a bombas centrífugas de peso mediano (menores a 3,000 lb), cuya potencia no excede los 45 kW (60 hp) y poseen frecuencias de operación de entre 30 Hz y hasta 60 Hz. Por tanto, serán definidos como clase II, y sus límites específicos serán definidos en ISO 10816-3 (ver tabla 7.9), Máquinas Industriales con Potencia Nominal Superiores a 15 kW (20 hp) y Velocidades de Operación de entre 120 r.p.m. y hasta 15,000 r.p.m. (2 Hz – 250 Hz). De esta forma, se tiene lo siguiente:

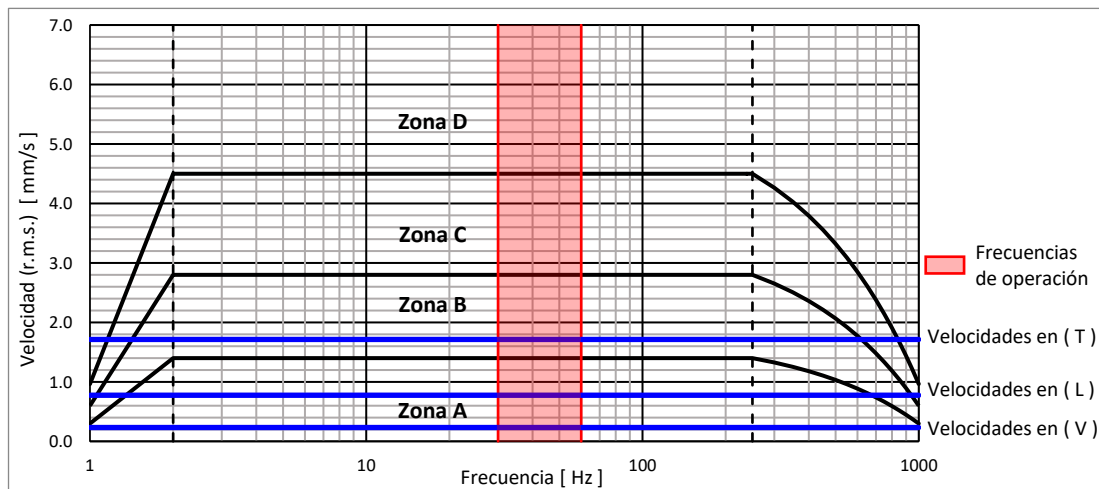
**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

**Tabla 7.9. Valores límite de vibraciones en diferentes zonas para máquinas clase II.
Norma Internacional (ISO 10816-3, 1998)**

Zone boundary	R.m.s. displacement μm	R.m.s. velocity mm/s
A/B	22	1,4
B/C	45	2,8
C/D	71	4,5

**Tabla 7.10. Revisión de los niveles de vibraciones máximos registrados
conforme a Norma Internacional (ISO 10816-3,1995)**

Frecuencias de operación de la maquinaria existente		Velocidades obtenidas a partir de los registros			Resultados	
Ancho de banda		Registro Núm.	Componente	Vel r.m.s. [mm/s]	Zona Tipo	Descripción
[Hz]	[r.p.m.]					
30.0 - 60.0	1,800 - 3,600	E5_03001	T	1.714	Zona B	Vibración aceptable operación a largo plazo
		E5_03007	L	0.776	Zona A	Vibración típica de equipos en buen estado
		E4_03005	V	0.233	Zona A	Vibración típica de equipos en buen estado



**Fig. 7.14. Límites de vibraciones permisibles para maquinaria.
Norma Internacional (ISO 10816-3,1995)**

Donde:

Zona A: vibraciones típicas de equipos nuevos.

Zona B: vibraciones consideradas como aceptables para operaciones a largo plazo.

Zona C: vibraciones consideradas como insatisfactorias para operaciones a largo plazo.

Zona D: vibraciones consideradas lo suficientemente severas como para dañar a la maquinaria.

Los resultados indican que las vibraciones son aceptables para las operaciones a largo plazo de los equipos dentro de la estructura (dirección T); incluso, en las componentes en donde se registraron menores amplitudes del movimiento (direcciones L y V, respectivamente), los niveles de vibraciones son tan bajos, que son típicas de unidades en condiciones nuevas o de recién instalación.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

- Criterio de Blake (1964)

Finalmente, como un ejercicio adicional, se muestra a continuación la revisión de los niveles de vibración empleando la carta de severidad de vibraciones desarrollada por Blake (1964); el cual es hasta la fecha, uno de los criterios ampliamente utilizados en la industria.

Para ello, se hará uso no de los valores medios cuadráticos de la velocidad (r.m.s.), sino más bien de los valores de velocidades máximos registrados; además, estos valores deberán ser afectados por el llamado factor de servicio (SF=2), puesto que existe más de una sola bomba centrífuga en operación simultánea. Los valores obtenidos serán nombrados como velocidades efectivas.

Tabla 7.11. Revisión de los niveles de vibraciones máximos registrados empleando el criterio de Blake, M. P. (Blake, 1964)

Frecuencias de operación de la maquinaria existente		Velocidades obtenidas a partir de los registros			R e s u l t a d o s		
Ancho de banda		Registro Núm.	Compo- nente	Vel _{max} [mm/s]	Vel _{efectiva} [mm/s]	Casos Tipo	Descripción
[Hz]	[r.p.m.]						
30.0 - 60.0	1,800 - 3,600	E5_03001	T	2.424	4.848	Caso B	Fallas menores. Correcciones implican gastos.
		E5_03007	L	1.097	2.194	Caso B	Fallas menores. Correcciones implican gastos.
		E4_03005	V	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica.

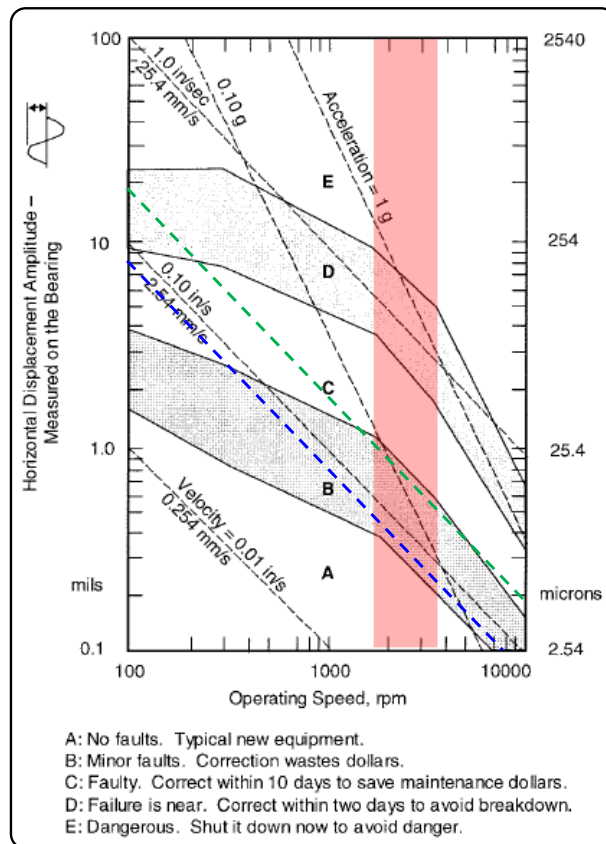


Fig. 7.15. Límites de vibraciones horizontales permisibles para máquinas rotatorias empleando el criterio de Blake, M. P. (Blake, 1964)

Table 3.4—Service factors from Blake (Richart, Hall, and Woods 1970)

Item	SF
Single-stage centrifugal pump, electric motor, fan	1.0
Typical chemical processing equipment, noncritical	1.0
Turbine, turbo-generator, centrifugal compressor	1.6
Centrifugal, stiff-shaft (at basket housing), multi-stage centrifugal pump	2.0
Miscellaneous equipment, characteristics unknown	2.0
Centrifuge, shaft-suspended, on shaft near basket	0.5
Centrifuge, link-suspended, slung	0.3

Notes: 1. Vibration is measured at the bearing housing except as noted; 2. Machine tools are excluded; and 3) Compared or measured displacements are multiplied by the appropriate service factor before comparing with Fig. 3.9.

Simbología:

- Frecuencias de operación .
- Velocidades en (T) .
- Velocidades en (L) .

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Los resultados son, en términos generales, consistentes entre ambos criterios; es decir, los criterios de aceptabilidad establecidos en la normativa internacional ISO 10816 (1995), son similares a los límites indicados bajo el criterio de vibraciones de Blake (1964). Sin embargo, la revisión por medio de este último criterio, considera la posibilidad de que en el equipo se presenten fallas menores, por lo que bajo estas consideraciones, el panorama de la condición de los equipos, es menos favorable y no resulta ser del todo alentadora, como se pensaba en la revisión bajo la normativa internacional.

Estas diferencias se deben principalmente a que, en la carta de severidad de vibraciones propuesta por Blake (1964), se considera explícitamente la presencia de múltiples equipos operando a la vez, el cual es el caso; situación que en la normativa internacional no se especifica con claridad. Por otra parte, esta última normativa tiene la ventaja de establecer límites para las tres diferentes direcciones ortogonales del movimiento, cosa que bajo el criterio de Blake (1964) no es posible realizar.

Así pues, en términos generales, los equipos se encuentran en adecuadas condiciones; sin embargo, habrá que tener presente que, deberán efectuarse programas oportunos de mantenimiento y correcciones a fin de evitar que los posibles fallos o anomalías detectados, no agraven las condiciones de operación de los equipos en un futuro cercano.

Capítulo 8

Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

Se analizó el comportamiento global de una estructura tipo industrial mediante el empleo de pruebas de medición de vibraciones de carácter ambiental, con fines de realizar una estimación del grado de deterioro presente en dicho sistema estructural. Los principales comentarios y conclusiones acerca de los resultados encontrados en este trabajo, se han dividido en dos grandes grupos: el primero, respecto a la estimación experimental y analítica de las diferentes propiedades dinámicas efectivas del sistema estructural en estudio, a saber: frecuencias naturales, modos de vibración y fracciones modales de amortiguamiento crítico; mientras que el segundo grupo de estos, se refiere a la evaluación de las condiciones de serviciabilidad por vibraciones de la estructura en cuestión, realizada bajo diferentes criterios de aceptación establecidos en diversas recomendaciones y estándares internacionales aplicables.

Con respecto a la estimación de las propiedades dinámicas del sistema estructural analizado, a partir de la aplicación de las metodologías basada en la teoría de procesos estocásticos y datos aleatorios (Ewins, 1986; Bendat y Piersol, 1993; Bendat y Piersol, 2010), se destaca lo siguiente:

- Se logró identificar confiablemente al menos, 7 frecuencias naturales de vibración inherentes al sistema estructural en estudio; de las cuales, 4 son frecuencias naturales en traslación (dos por cada dirección de análisis: T y L respectivamente), mientras que 3 de ellas corresponden a frecuencias naturales asociadas al comportamiento torsional del sistema.
- Para ello, fue necesario obtener los espectros cruzados, funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencia, y no limitarse únicamente al estudio de los espectros de Fourier de los registros de vibraciones obtenidos; ya que, como se dijo anteriormente, se puede incurrir en errores importantes debido a la presencia de ordenadas significativas pero ajenas a las frecuencias naturales de vibración del sistema analizado.
- En todos los casos, las frecuencias obtenidas experimentalmente, mostraron ser desde un 19% a 33% menores a las obtenidas mediante el empleo del modelo analítico realizado;

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

situación que pone en manifiesto que el sistema estructural ha perdido rigidez a causa del deterioro presente en los elementos resistentes que lo conforman, producto del avanzado nivel de deterioro por corrosión que exhiben sus principales elementos resistentes.

- Además, atendiendo al comportamiento de un sistema equivalente de un grado de libertad, fue posible relacionar las diferencias en periodos o frecuencias naturales encontradas, con la pérdida o disminución de rigidez lateral del sistema; encontrándose que la rigidez experimental equivalente cae en promedio un 30% con respecto a la rigidez equivalente obtenida por medio de los resultados del modelo analítico.
- En cuanto a las formas modales de vibración, los resultados analíticos y experimentales mostraron una adecuada similitud en la configuración deformada que adopta el sistema estructural en los primeros modos de vibración para las direcciones T y L respectivamente. No así en los segundos modos, ya que en estos, se encontraron diferencias significativas debido a que no fue posible cubrir el punto de inflexión del sistema ni obtener información de su comportamiento reflejado a mayores alturas. Esto último se tradujo en valores de fase poco adecuados y coherencias relativamente bajas.
- Por su parte, se obtuvieron fracciones modales de amortiguamiento crítico que, en términos generales, resultaron ser del orden de un 3%; situación que, muestra ser consistente con los valores de amortiguamiento crítico obtenidos en estudios similares y que son representativos además, de estructuras metálicas como es el caso.

La evidencia anteriormente mostrada en este trabajo, congruencia y similitud con la información disponible de estudios similares, sugiere la validación de los resultados obtenidos, por lo cual, es posible afirmar que se logró una adecuada estimación experimental de las principales características que influyen en el comportamiento dinámico del sistema estructural analizado; además del desarrollo de un modelo analítico representativo de las condiciones teóricas originales del sistema, contra las cuales dichos resultados fueron críticamente comparados. Este último modelo de análisis fue calibrado y ajustado, en aras de aproximarse a la respuesta real de la estructura medida *in situ*, encontrándose resultados sumamente favorables y similares a los experimentalmente obtenidos.

Se destaca el hecho de que, si se requiere identificar experimentalmente otras frecuencias y modos superiores de vibrar, será necesario un estudio más exhaustivo del sistema, que contemple una instrumentación mucho más detallada, con diferentes arreglos y puntos de medición adicionales a los aquí considerados; aunque para ello, debido a las condiciones actuales de la estructura, se tendrían que realizar las adecuaciones necesarias en los niveles superiores de la misma, que permitan la colocación de los sensores medición necesarios para su completa instrumentación.

Finalmente, en lo que se refiere a la evaluación de las condiciones de serviciabilidad por vibraciones que aguarda la estructura en cuestión, es posible concluir lo siguiente:

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

- Bajo los criterios de confort o límites psicológicos, los niveles máximos de las aceleraciones registradas sobrepasan los umbrales permisibles establecidos en la normativa australiana (AS 2670, 1990); situación que, si bien no pone en riesgo la integridad estructural y/o estabilidad del sistema, afecta negativamente al desempeño de los trabajos realizados por los usuarios u operarios de la misma, potencializando incluso, el riesgo en la ocurrencia de accidentes y eventuales pérdidas tanto económicas como de la vida humana.
- Mientras que, bajo los criterios en la calidad de las operaciones de máquinas y equipos electromecánicos de gran valor, los resultados indicaron que los niveles de vibraciones registrados se encuentran dentro de rangos permisibles que aseguran un adecuado funcionamiento de los mismos para su operación segura a largo plazo.

Sin embargo, se hace notar que, deberán tomarse las medidas necesarias a fin de evitar que las condiciones en las que actualmente operan los diferentes equipos instalados dentro de la estructura, se agraven o empeoren; puesto que, un ligero incremento en los niveles de las vibraciones registradas, causaría la incursión en una zona o caso atípico del comportamiento de los equipos, lo cual conllevaría a posibles fallos de los mismos en un futuro cercano.

8.2 Recomendaciones

A la luz de las premisas anteriores, será necesario el promover la ejecución de un proyecto íntegro de rehabilitación estructural, en el que se identifiquen aquellos elementos críticos que presenten indicios de daño evidente, principalmente aquellos que proveen en mayor medida de rigidez lateral al sistema, tales como columnas y contraventeos verticales; que permitan cuando menos, recuperar las condiciones originales del sistema o bien, mejorar el comportamiento global de este, con el fin de dar cumplimiento a los requisitos mínimos establecidos en la normatividad vigente.

En cuanto a las condiciones de serviciabilidad por vibraciones de la estructura en cuestión y, particularmente bajo los criterios en la calidad de operaciones del equipo electromecánico existente, es recomendable, antes que nada, tratar de mitigar en medida de lo posible, los efectos nocivos de vibraciones producidas desde la fuente misma, realizando ajustes y mantenimiento mecánico de los equipos, además de revisiones, adecuaciones y mejoras en los sistemas de fijación de los mismos sobre la estructura. Por otra parte, deberá intervenir el sistema estructural de piso, a fin de incrementar su rigidez y/o modificar sus características dinámicas; situación que, ante los problemas de vibraciones presentados bajo los criterios de aceptación psicológicos y de confort anteriormente expuestos, resultaría ser una de las soluciones más convenientes.

Finalmente, deberá ser necesario el promover y documentar ampliamente la información obtenida a partir de los estudios realizados a estructuras industriales similares a la expuesta en este trabajo, puesto que este tipo de estructuras conforman a un sector que históricamente ha sido poco explorado o estudiado por la ingeniería estructural en nuestro país. Los resultados aquí mostrados, pretenden destacar las ventajas en la instauración de los diferentes sistemas de inspección y monitoreo dinámico de estructuras, que permitan en todo momento, evaluar el estado y condiciones actuales que las mismas aguardan.

Referencias

Bibliografía

Aktan, E., Chase, S., Inman, D., y Pines, D. (2001). Monitoring and Managing the Health of Infrastructure Systems. *Proceedings of the 2001 SPIE Conference on Health Monitoring of Highway Transportation Infrastructure*.

Arya, S. C., O'Neill, M. W., y Pincus, G. (1979). *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*. Gulf Publishing Company.

Ayala, A. G. y García, O. (2015). *Estudio de la integridad mecánica y determinación de los alcances para restituir la integridad mecánica de los soportes fijos y dinámicos que forman parte de las estructuras de la CCR-1 de la planta U-900 de la Refinería Francisco I. Madero, Tamps*. Informe técnico presentado a la Facultad de Química de la UNAM, abril de 2015.

Bachmann, H., Ammann, W. J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G., Klein, G., Lande, G., Mahrenholtz, O., Natke, H. G., Nussbaumer, H., Pretlove, A. J., Rainer, J. H., Saemann, E., y Steinbeisser, L. (1995). *Vibrations Problems in Structures. Practical Guidelines*. Birkhäuser.

Bendat, J. S., y Piersol, A. G. (1993). *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis* (Second Edition). Wiley & Sons, Inc.

Bendat, J. S., y Piersol, A. G. (2010). *Random Data. Analysis and Measurement Procedures* (Fourth Edition). Wiley & Sons, Inc.

Blake, M. P. (1964). New Vibrations Standards for Maintenance. *Hydrocarbon Processing and Petroleum Refiner*, Vol. 43 (No. 1).

Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 365, 589–622.

Brownjohn, J. M. W., Tjin, S. C., y Tan, G. H. (2004). A Structural Health Monitoring Paradigm for Civil Infrastructure. *1st International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering. Fiber Optic Workshop-Session 6*, Nottingham, UK.

Castelán, I. (2001). *Determinación Experimental de las Propiedades Dinámicas de un Edificio Reforzado con Disipadores de Energía* [Tesis de Maestría]. Posgrado de Ingeniería-UNAM.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

- Chen, H. P. (2018). *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures. Chapter 1. Introduction to Structural Health Monitoring* (First Edition). Wiley & Sons, Inc.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering* (Fourth Edition). Prentice Hall.
- Clinton, J. F., Bradford, C. S., Heaton, T. H., y Favela, J. (2006). The Observed Wander of the Natural Frequencies in a Structure. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.96(No. 1), 237–257.
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., y Prime, M. B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, 30, 1–34.
- Escamilla, M. A., Ayala, G., Herlindo, M., y García, O. (2016). Efecto de las vibraciones ambientales y forzadas sobre las estructuras y los humanos. *XX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Mérida, Yuc., Méx.
- Escobar, J. A., Sosa, J. J., y Gómez, R. (2001). Damage detection in framed buildings. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(1), 35–47.
- Escobar, J. A., Sosa, J. J., y Gómez, R. (2005). Structural damage detection using the transformation matrix. *Computers and Structures*, 83, 357–368.
- Ewins, D. J. (1986). *Modal Testing: Theory and Practice* (Second Edition). Research Studies Press.
- Farrar, C. R., Doebling, S. W., y Nix, D. A. (2001). Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 359, 131–149.
- Farrar, C. R., y Lieven, A. J. (2007). Damage prognosis: The future of the structural health monitoring. *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, 365, 623–632.
- Futch, D. A. (1978). The vibrational characteristics of a twelve-storey steel frame building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, 265–294.
- González Alcorta, R. (1989). *Cinemática del movimiento de edificios de la Ciudad de México* [Tesis de Maestría]. Posgrado de Ingeniería-UNAM.
- Henao, A. D., Botero, J. C., y Murià Vila, D. (2014). Identificación de propiedades dinámicas de un modelo estructural sometido a vibración ambiental y vibración forzada empleando mesa vibradora. *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 91, 54–73.
- Kawasumi, H., y Shima, E. (1965). Some applications of a correlator to engineering problems. *The III WCEE*, Vol. 2, II-298 a II – 320.
- Méndez, H. (2014). *Identificación de las Propiedades Dinámicas de una Plataforma Marina de Perforación, Basada en el Monitoreo de Vibraciones* [Tesis de Maestría]. Posgrado de Ingeniería-UNAM.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

Murià Vila, D. (2007). Experiencia mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados. *III Coloquio de Ingreso a la Academia*, Academia de Ingeniería, México.

Murià Vila, D. (2019). *Presentaciones del curso: Medición y análisis de la respuesta dinámica de las estructuras. Sem.: 2019-2*. Posgrado de Ingeniería-UNAM.

Murià Vila, D., Alcántara, N., Durán, R., Macías, M. A., Maldonado, S., Pérez Rocha, L. E., y Tena, A. (1997). El Macrosismo de Manzanillo, Edificios Instrumentados. Editor: Arturo Tena C. *Universidad de Colima, Gobierno del Estado de Colima y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, 197–232.

Murià Vila, D., Fuentes, L., y González, R. (2000). Incertidumbres en la estimación de las frecuencias naturales de vibración de edificios. *Información Tecnológica*, Vol. 11(No. 3).

Murià Vila, D., y González Alcorta, R. (1995). Propiedades Dinámicas de Edificios de la Ciudad de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 51, 25–45.

Murià Vila, D., Sánchez, A., Gómez, R., Rodríguez, G., Mendoza, M. Á., Escobar, J. A., Blanco, J. E., Huerta, C. H., y Mendoza, R. C. (2004). Pruebas Experimentales en el Distribuidor Vial de San Antonio. *XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Acapulco, Gro., Méx.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of surface layers using microtremor on the surface. *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, No. 1, 18–27.

PND 2019-2024. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. Gobierno Federal de la República Mexicana.

Razo, D. F. (2019). *Evaluación integral de la seguridad estructural de edificaciones existentes dañadas por sismos de gran magnitud* [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Ingeniería-UNAM.

Richart, F. E. Jr. (1962). Foundation Vibrations. *Transactions ASCE*, Vol. 127(No. 1), 863–898.

Rytter, A. (1993). *Vibrational based inspection of civil engineering structures* [Tesis Doctoral]. Department of Building Technology and Structural Engineering - University of Aalborg.

Taborda, R. (2003). *Respuesta Dinámica y Efectos de Interacción Suelo-Estructura de un Edificio Instrumentado en Acapulco* [Tesis de Maestría]. Posgrado de Ingeniería-UNAM.

Trifunac, M. D. (1972). Comparisons Between Ambient and Forced Vibration Experiments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 1, 133–150.

Vázquez, A., Solís, J., y Balbuena, S. (2014). Reglamentación y práctica profesional para el diseño de estructuras industriales en México. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Pto. Vallarta, Jal., Méx.

Normatividad, reglamentación y similares

ACI 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute. ACI Committee 318, USA.

ACI 351.3R. (2004). *Foundations for Dynamic Equipment*. American Concrete Institute. ACI Committee 351, USA.

AISC. (2017). *Steel Construction Manual, 15th Ed.* American Institute of Steel Construction, USA.

AISC. (2016). *Steel Design Guide No.11: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity*. American Institute of Steel Construction, USA.

API 610. (1995). *Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical, and Gas Industry Services*. American Petroleum Institute.

API 617. (1995). *Centrifugal Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Service Industries*. American Petroleum Institute.

AS 2670.1. (1990). *Evaluation of human exposure to whole body vibration. Part 1: General requirements*. Australian Standard.

AS 2670.2. (1990). *Evaluation of human exposure to whole body vibration. Part 2: Continuous and shock induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)*. Australian Standard.

ASCE. (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, USA.

CFE. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento*. Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE, Comisión Federal de Electricidad CFE.

CFE. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo*. Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE, Comisión Federal de Electricidad CFE.

DIN 4150-1. (1999). *Vibrations in Buildings: Prediction of Vibration Parameters*. Deutsches Institut für Normung.

DIN 4150-2. (1999). *Vibrations in Buildings: Effects on Persons in Buildings*. Deutsches Institut für Normung.

DIN 4150-3. (1999). *Vibrations in Buildings: Effects on Structures*. Deutsches Institut für Normung.

ISO 2631-2. (1997). *Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole body vibration. Part 2: Continuous and shock induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)*. International Standards Organization.

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

ISO 10816-1. (1995). *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1: General guidelines*. International Standards Organization.

ISO 10816-2. (1997). *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 2: Large land based steam turbine generator sets in excess of 50MW*. International Standards Organization.

ISO 10816-3. (1998). *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 KW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ*. International Standards Organization.

ISO 10816-4. (1999). *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 4: Gas turbine driven sets excluding aircraft derivatives*. International Standards Organization.

ISO 10816-5. (2001). *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants*. International Standards Organization.

ISO 10816-6. (2001). *Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 6: Reciprocating machines with power ratings above 100KW*. International Standards Organization.

NRF-053-PEMEX-2014. (2014). *Sistemas de Protección Anticorrosiva a Base de Recubrimientos para Instalaciones Superficiales*. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos.

NRF-065-PEMEX-2014. (2014). *Recubrimientos a Base de Cemento a Prueba de Fuego en Estructuras y Soportes de Equipos*. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos.

NRF-137-PEMEX-2012. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero Terrestres*. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos.

NRF-138-PEMEX-2012. (2012). *Diseño de Estructuras de Concreto Terrestres*. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos.

NRF-139-PEMEX-2012. (2012). *Soportes para Tuberías—Diseño*. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos.

NRF-159-PEMEX-2013. (2013). *Cimentación de Estructuras y Equipo*. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES

NTC-CADEE-2017. (2017). *Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de la Edificaciones*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

NTC-DCEA-2020. (2020). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero con Comentarios*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

NTC-DCEC-2017. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

NTC-DS-2020. (2020). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con Comentarios*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

NTC-RSEE-2017. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

RCDF. (2019). *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

Programas de cómputo

CSI. (2018). *SAP2000 vr.18.0.1*. Computers and Structures, Inc.

Jeong, S. H., Lee, K. H. y Jang, W. S. (2010). *PRISM vr.2.0.1*. Department of Architectural Engineering, INHA University.

Ordaz, M. y Montoya, C. (1991). *DEGTRA vr.10.4*. Instituto de Ingeniería, UNAM.

National Instruments. (2018). *LabVIEW vr.18.0*. National Instruments, Inc.

Sitios y páginas web

Braskem Idesa. (2020). <http://www.braskemidesa.com.mx/sala-de-imprensa-imagens>

Grupo México. (2020). <https://www.gmexico.com/Pages/Prensa.aspx>

PEMEX. (2020). <https://www.pemex.com/acerca/historia/Paginas/default.aspx>

SENER. (2020). <https://www.gob.mx/sener>

ANEXO A

**ESPECTROS DE FOURIER, FUNCIONES DE TRANSFERENCIA,
FASE Y COHERENCIA DE LOS REGISTROS OBTENIDOS A
PARTIR DE LAS PRUEBAS DE MEDICIONES DE VIBRACIÓN
AMBIENTAL REALIZADAS A LA ESTRUCTURA DEL REACTOR**

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

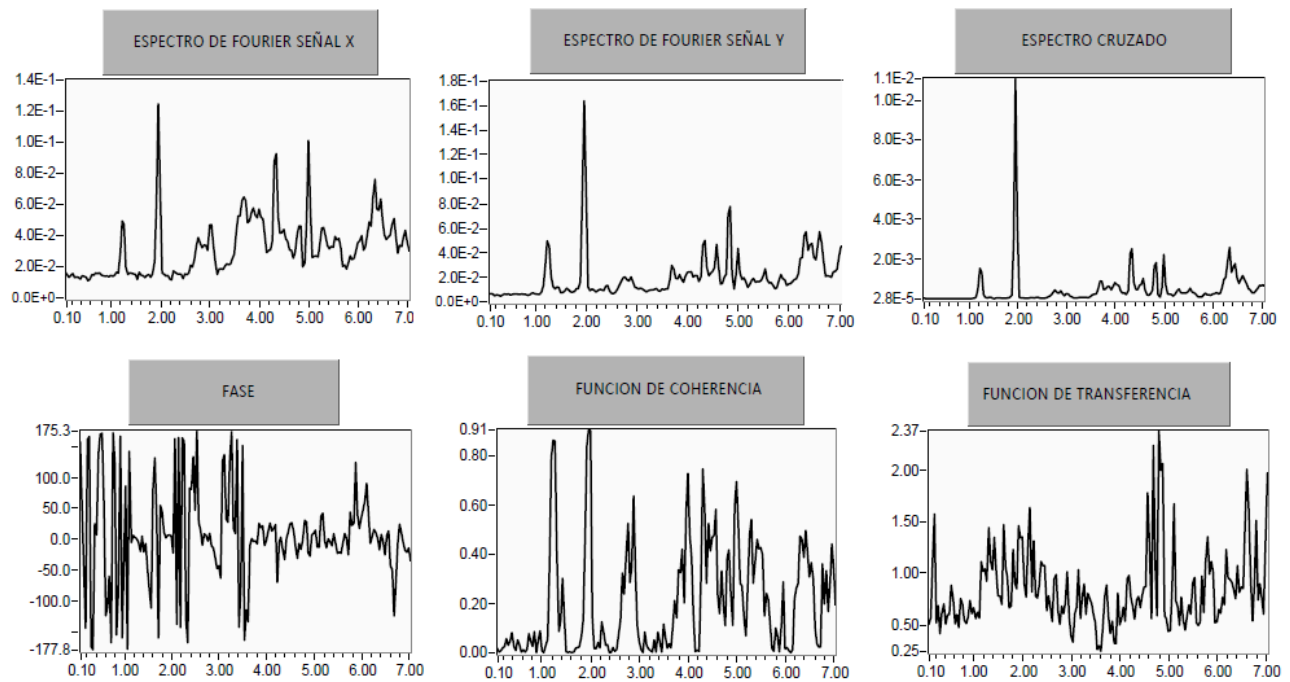


Fig. A.1. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E2 y E3. Dirección: T

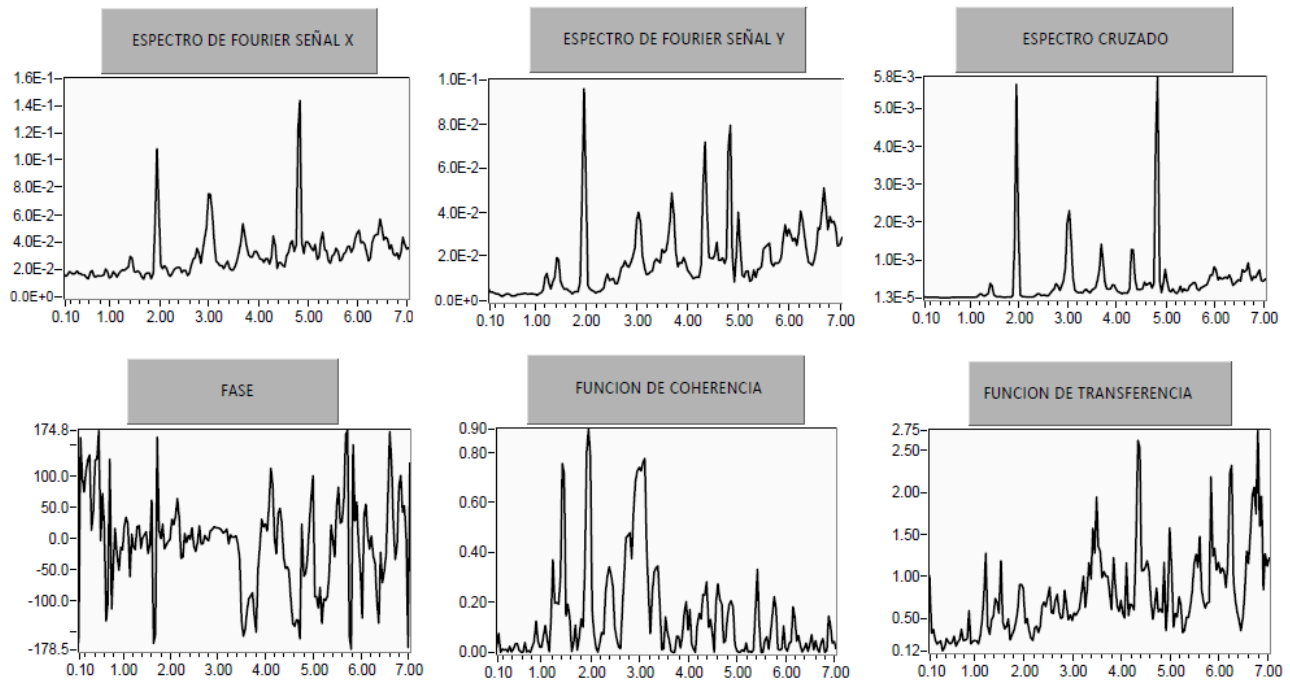


Fig. A.2. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E2 y E3. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

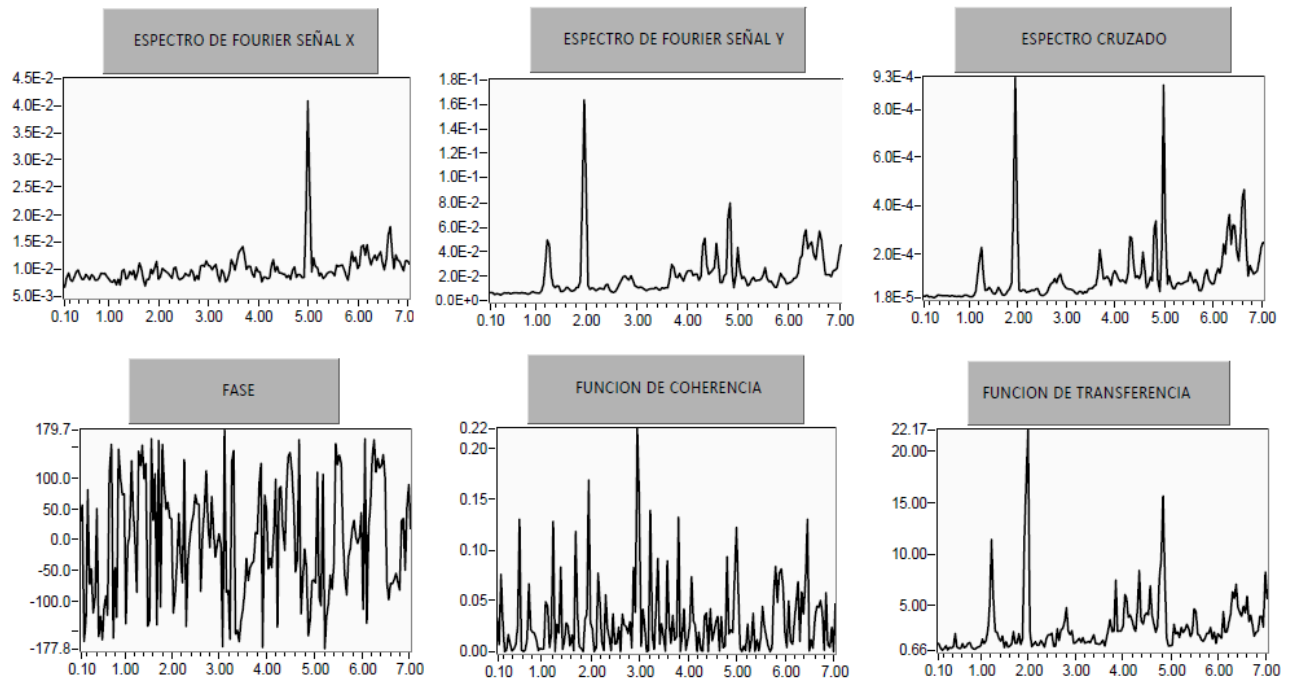


Fig. A.3. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E2 y E5. Dirección: T

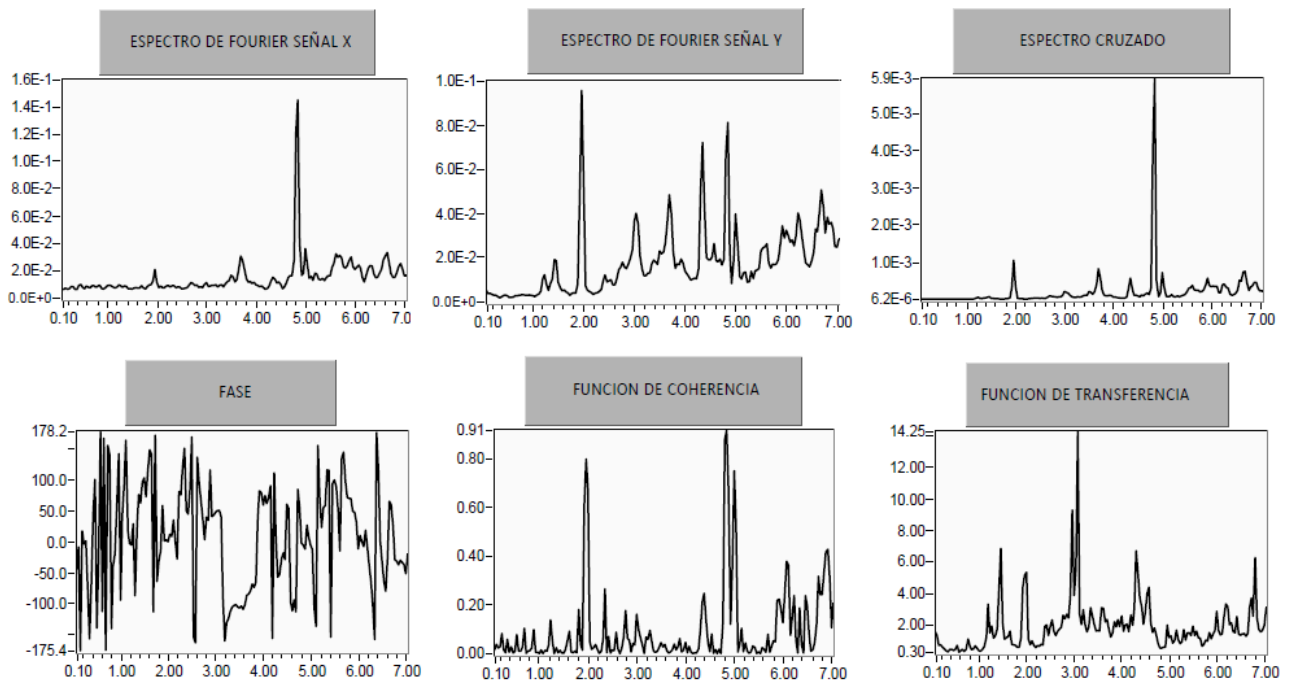


Fig. A.4. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E2 y E5. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

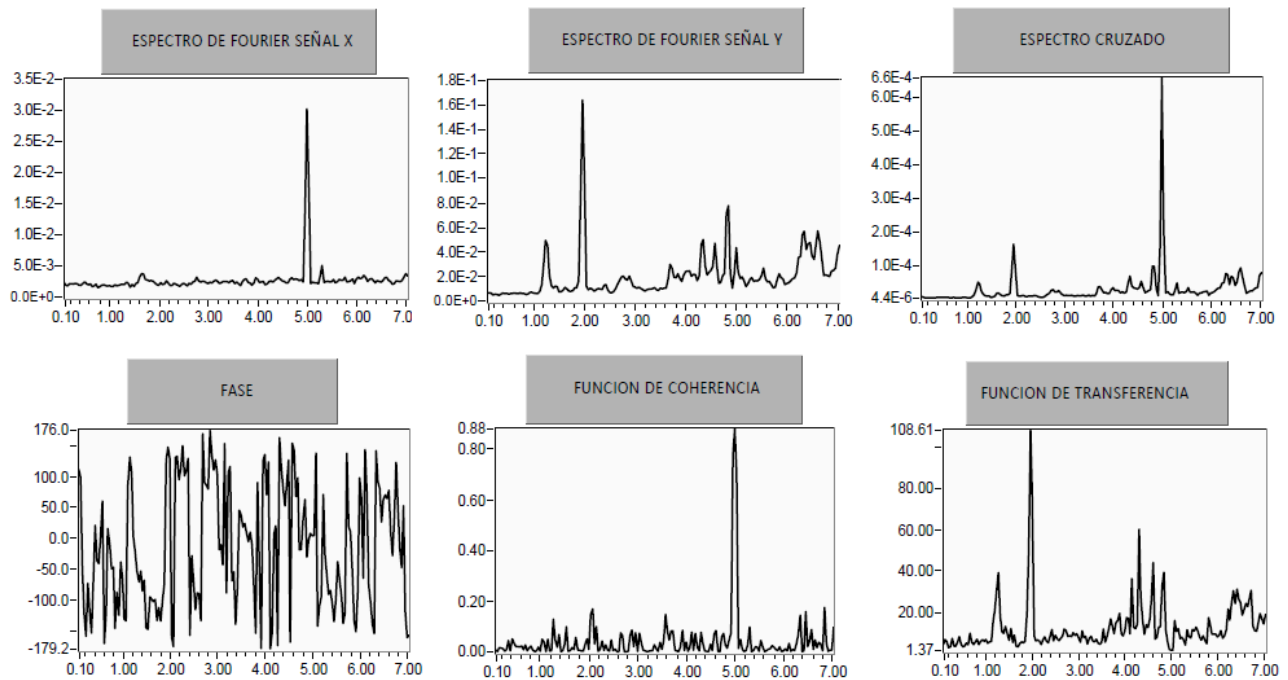


Fig. A.5. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E2 y E4. Dirección: T

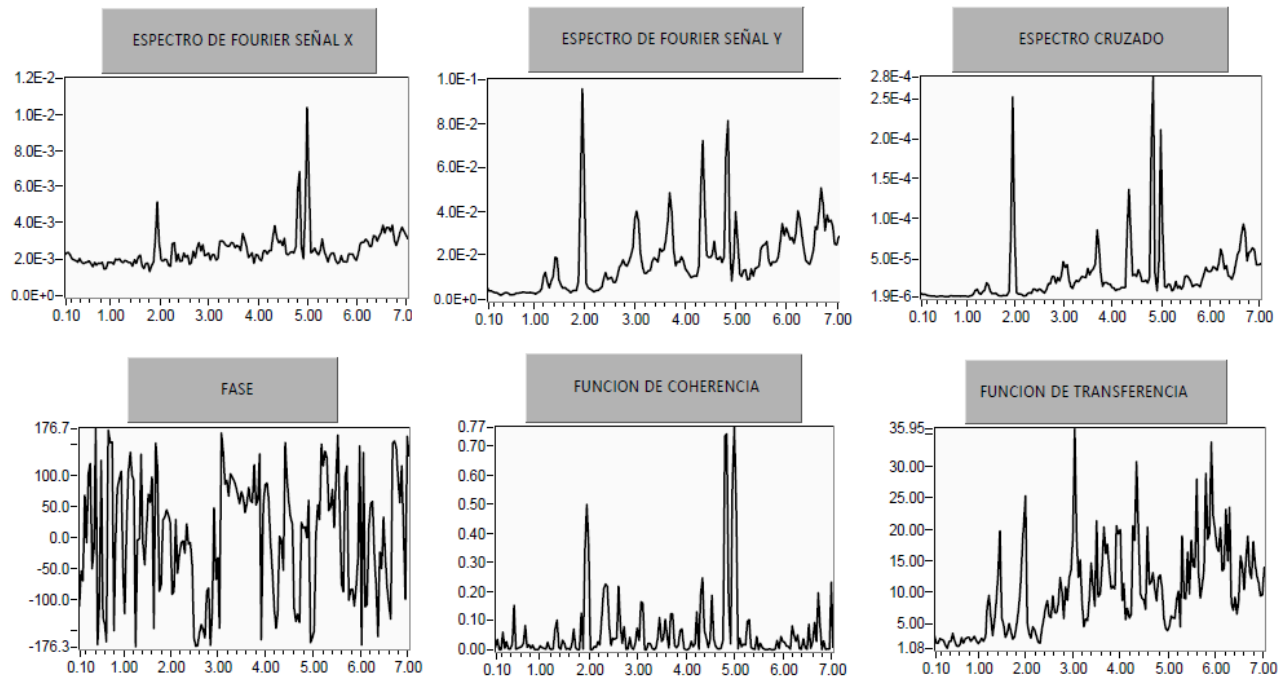


Fig. A.6. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E2 y E4. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

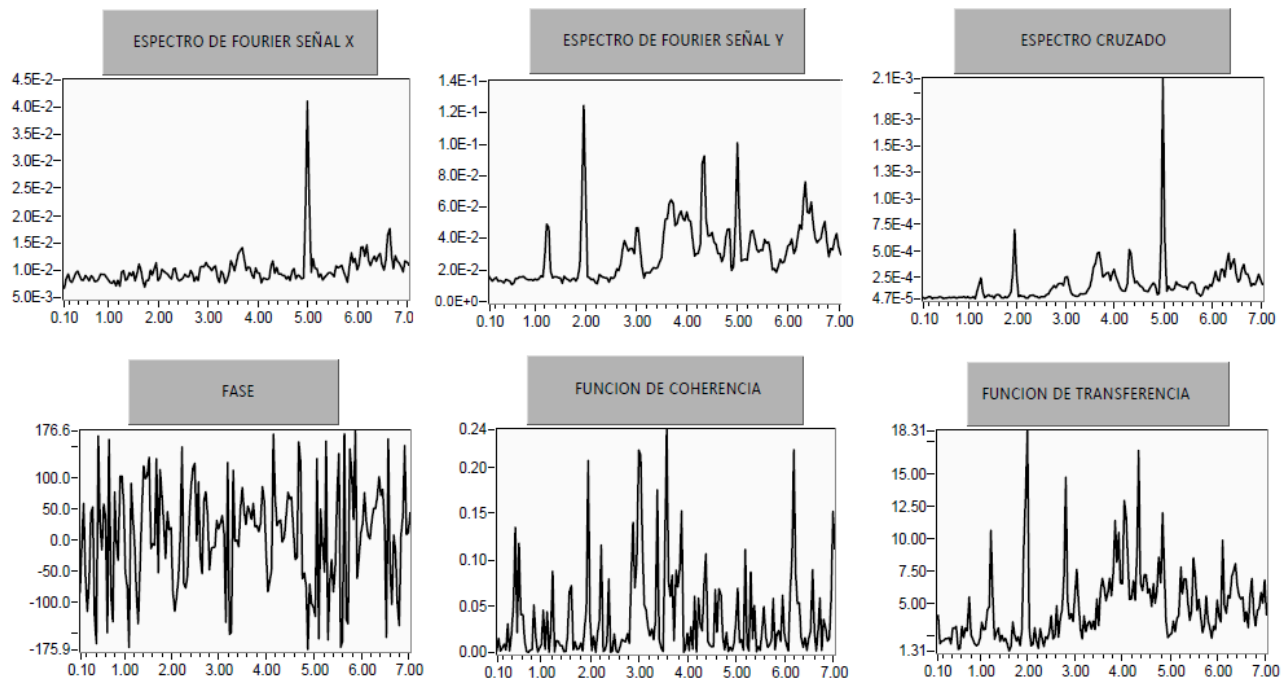


Fig. A.7. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E3 y E5. Dirección: T

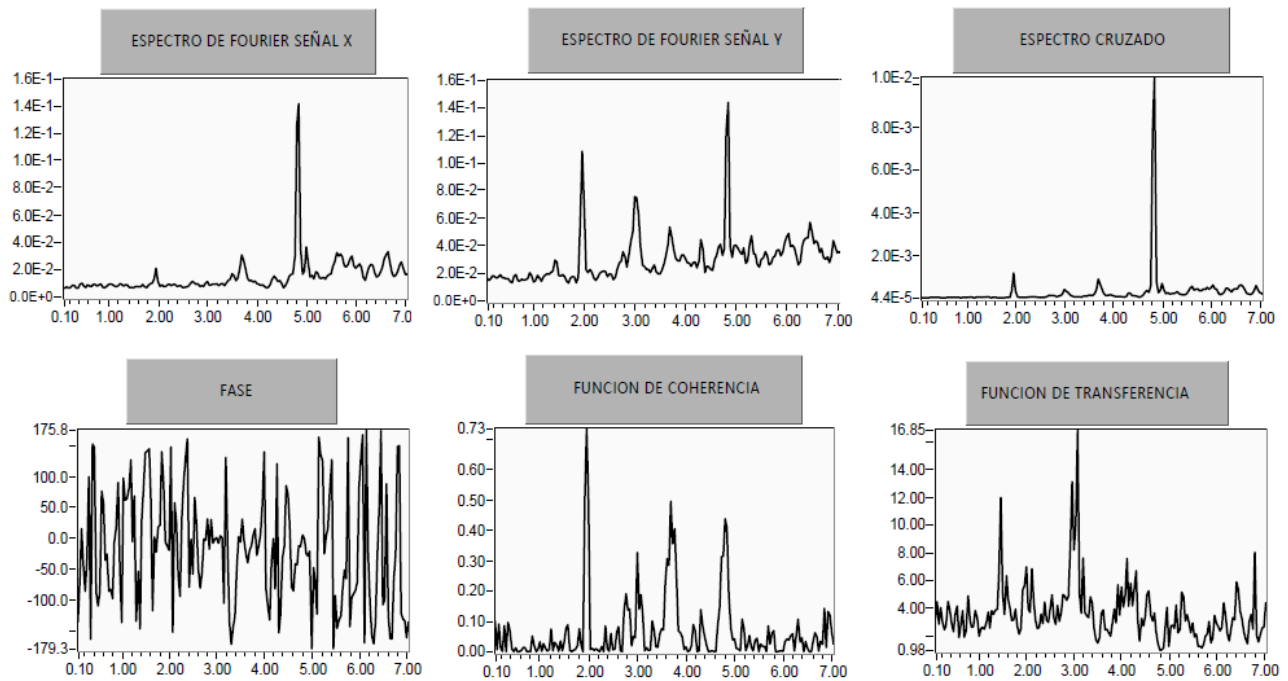


Fig. A.8. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E3 y E5. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

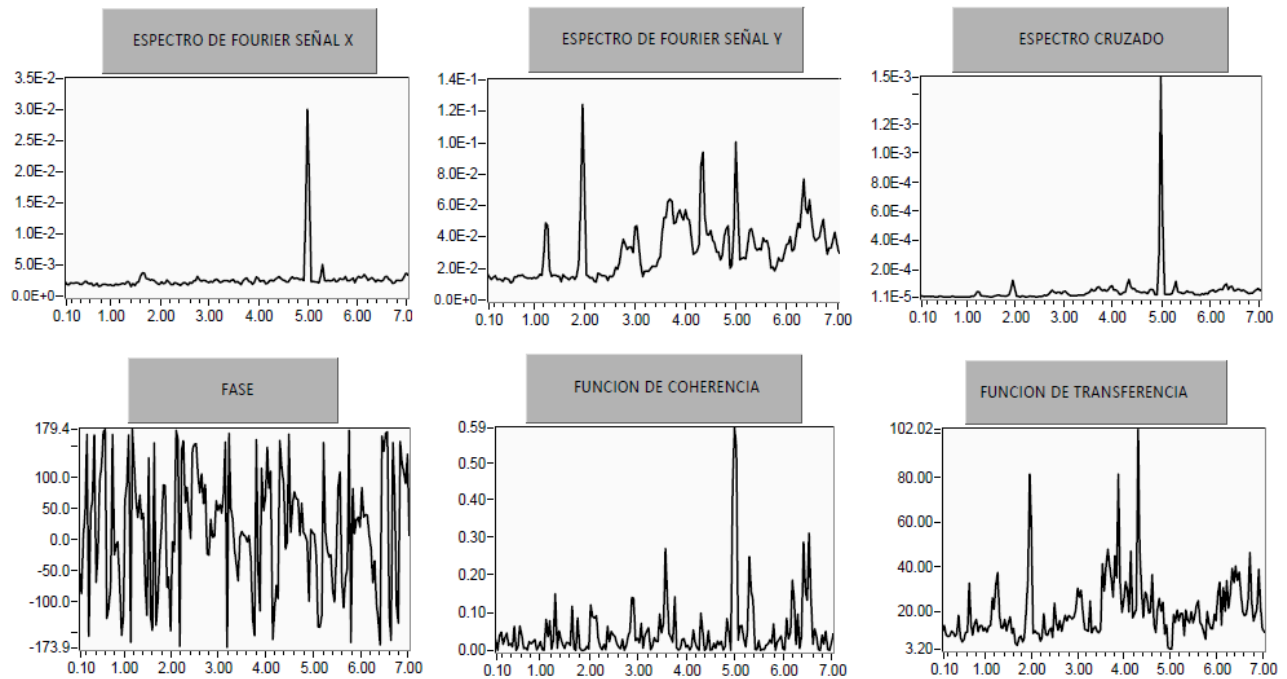


Fig. A.9. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E3 y E4. Dirección: T

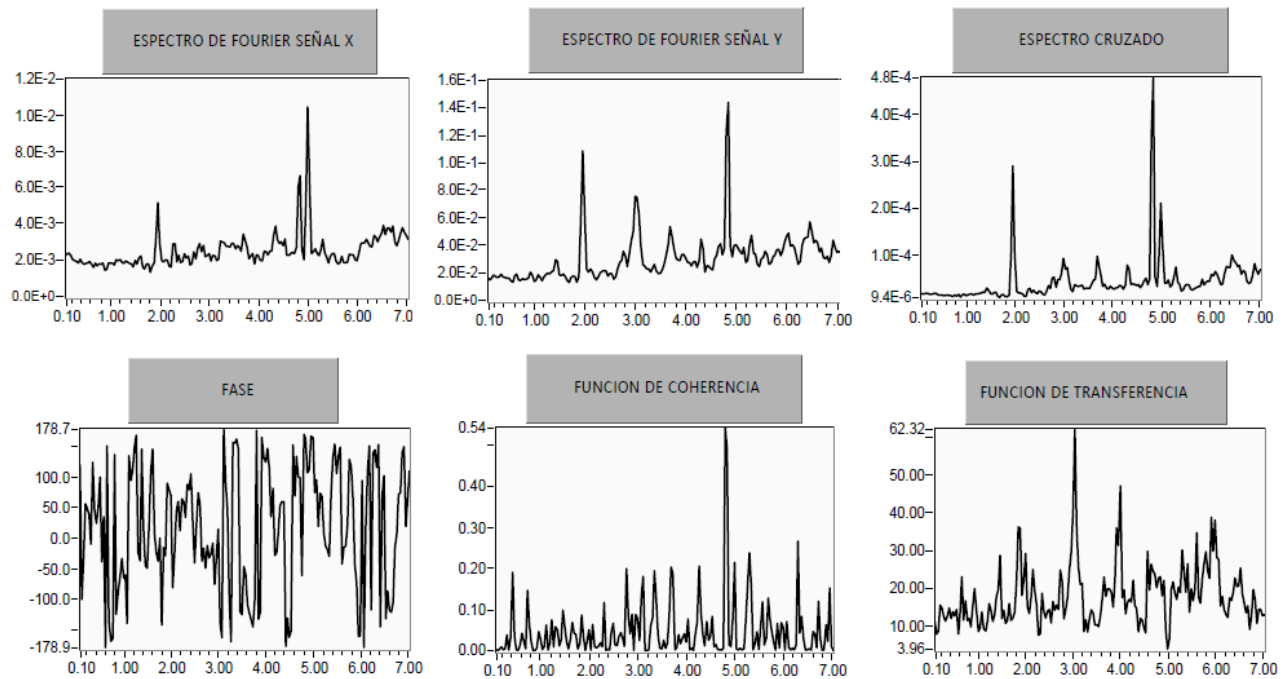


Fig. A.10. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E3 y E4. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

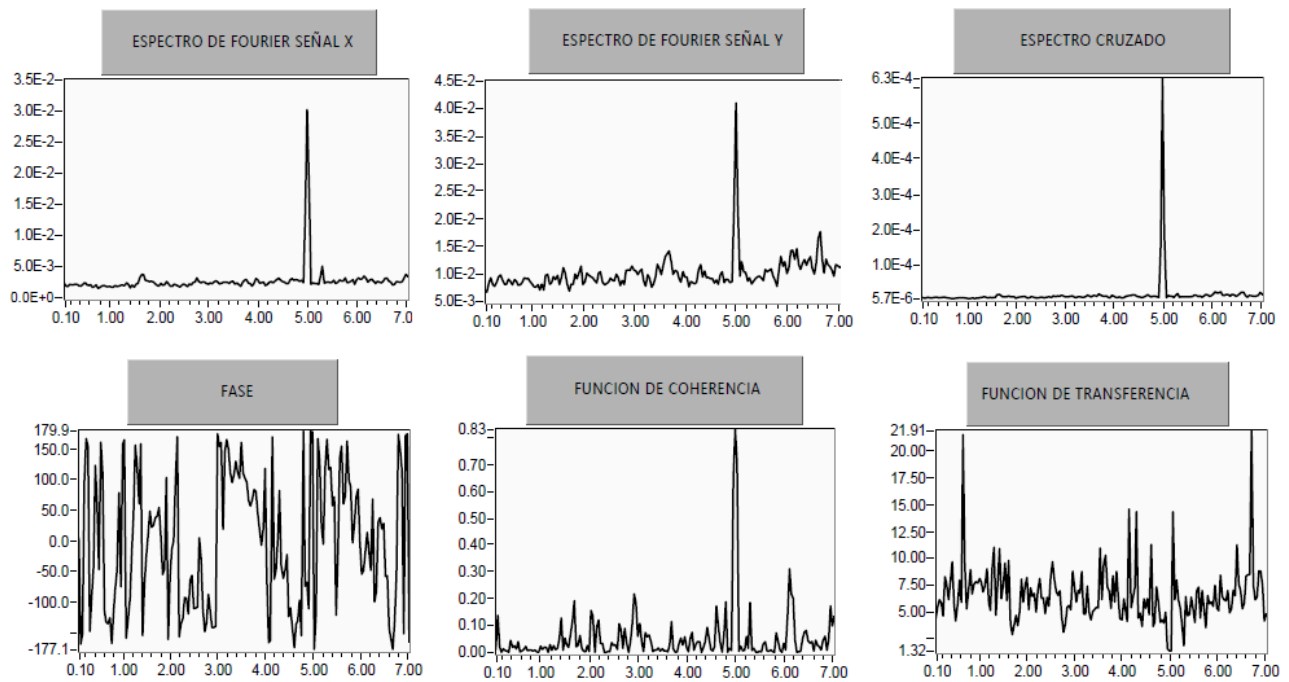


Fig. A.11. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E5 y E4. Dirección: T

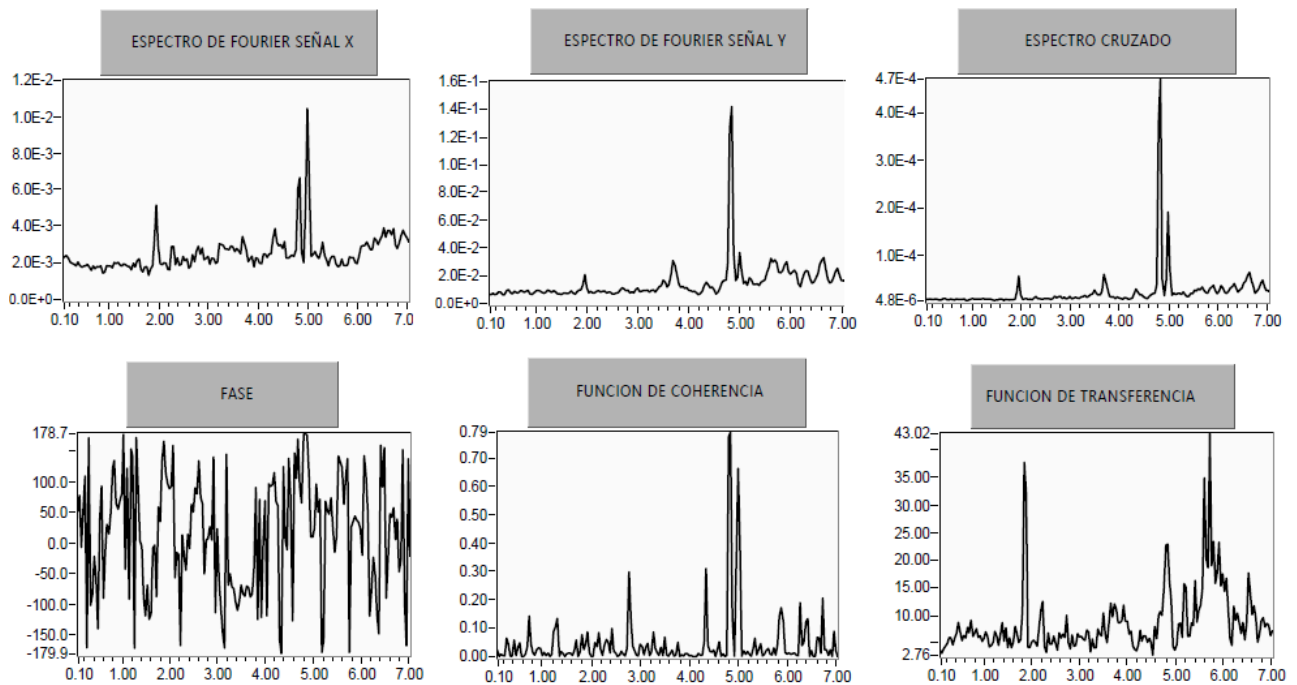


Fig. A.12. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E5 y E4. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

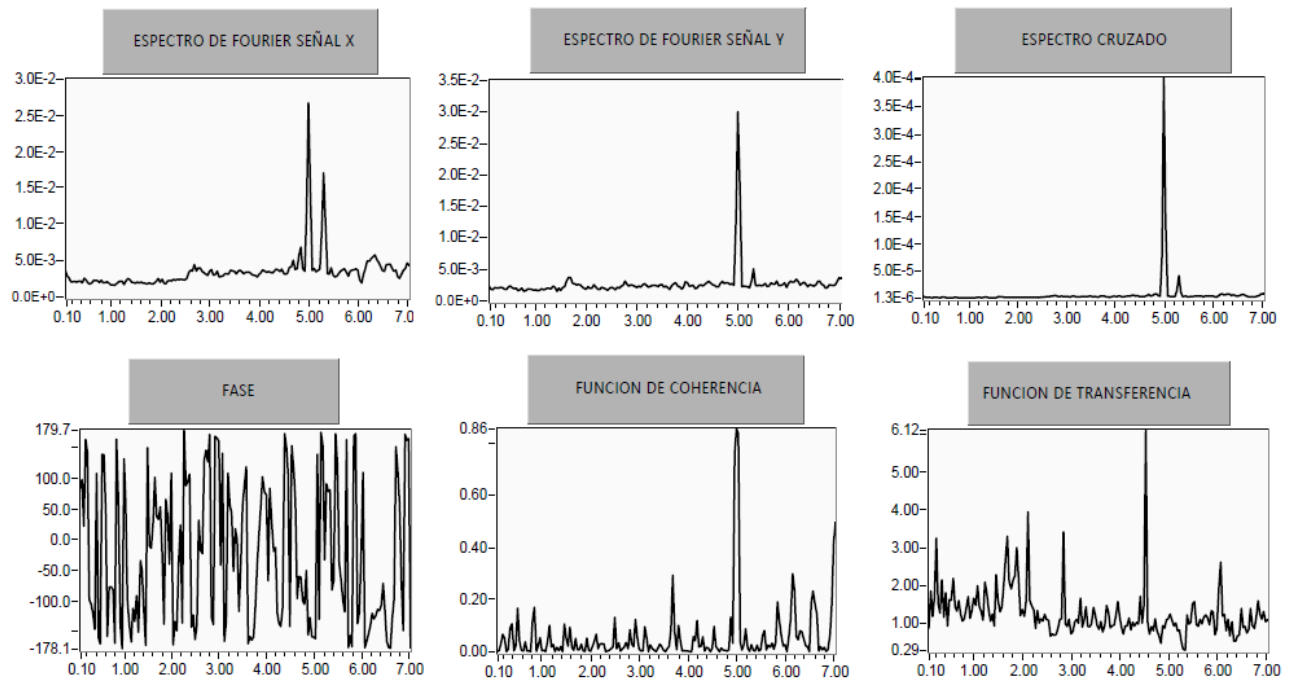


Fig. A.13. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E4 y E4. Dirección: T/V

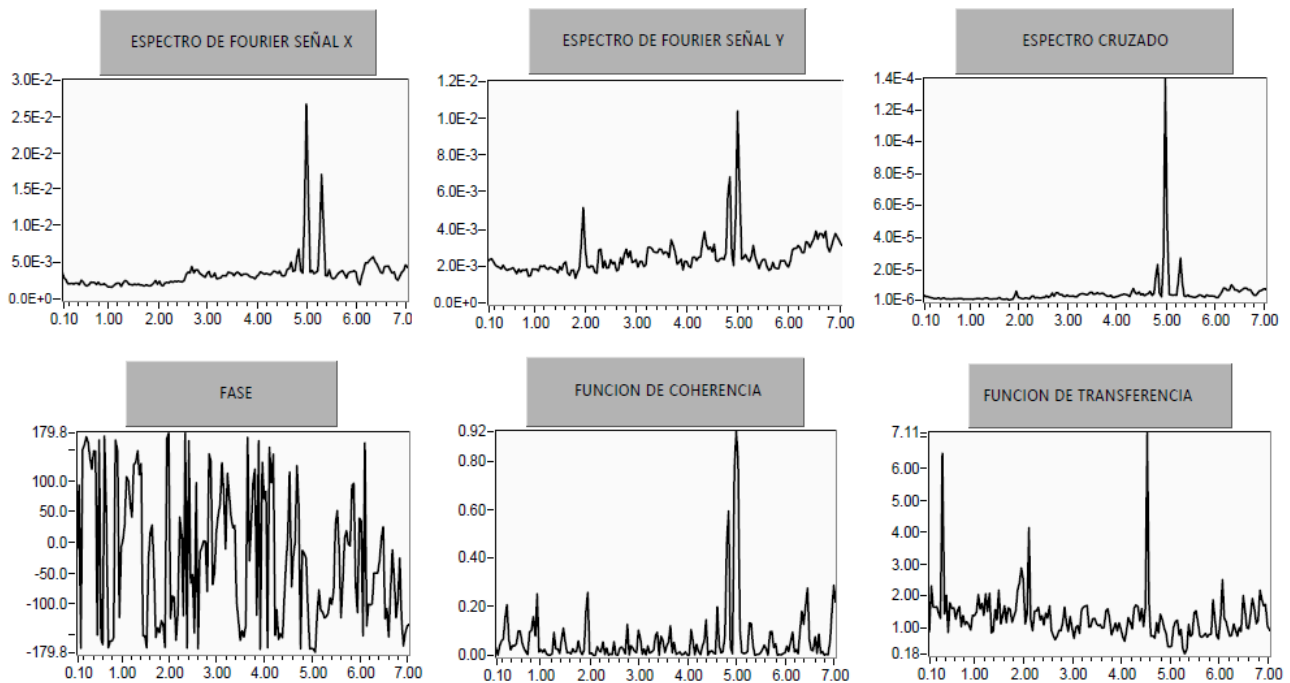


Fig. A.14. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E4 y E4. Dirección: L/V

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

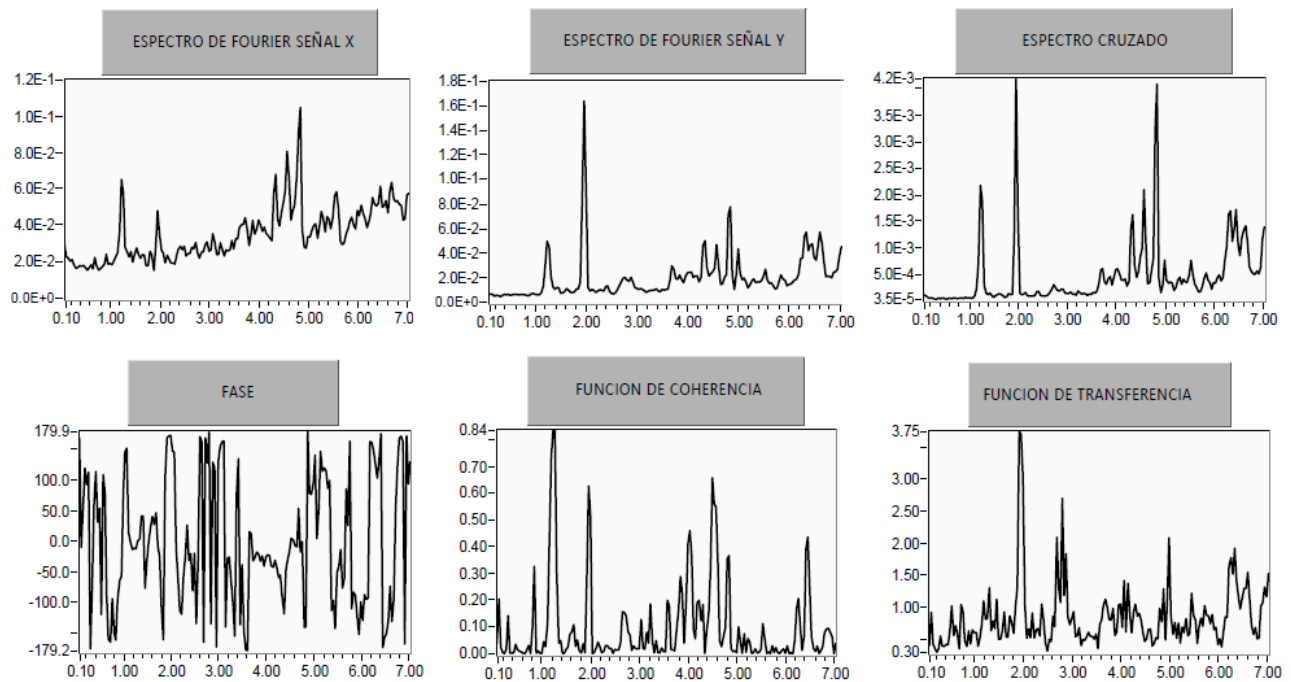


Fig. A.15. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E2. Dirección: T

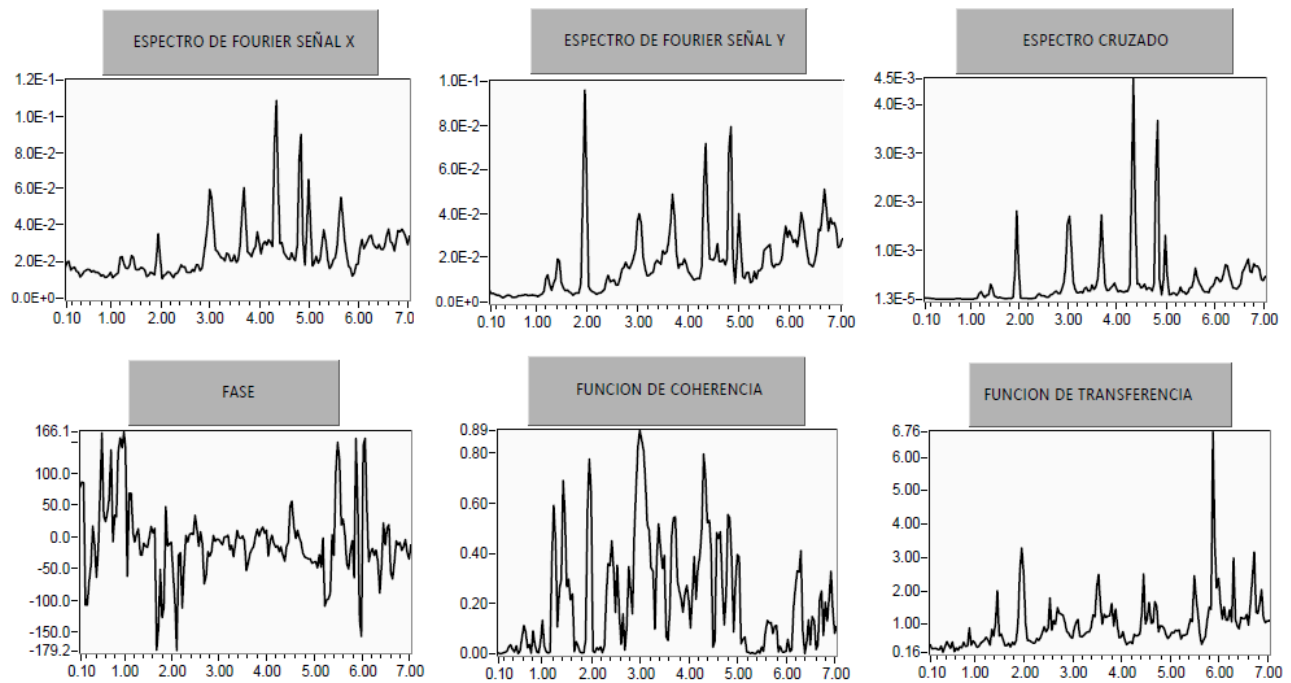


Fig. A.16. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E2. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

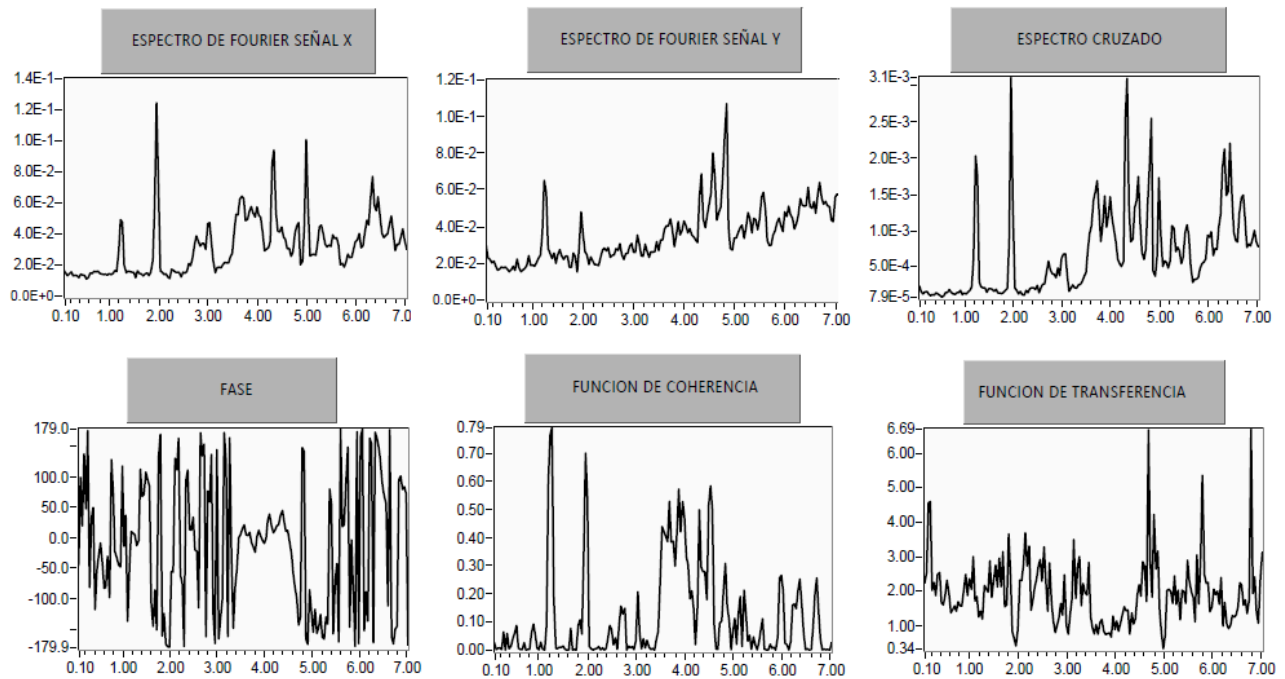


Fig. A.17. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E3. Dirección: T

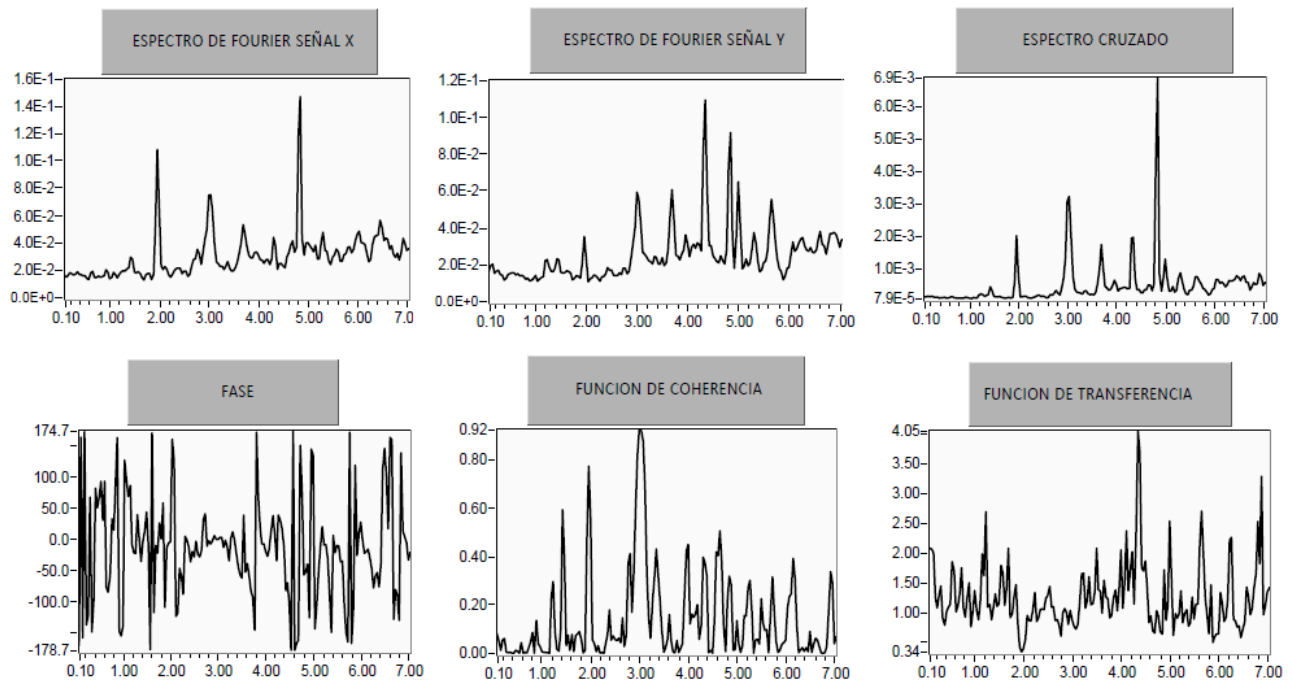


Fig. A.18. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E3. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

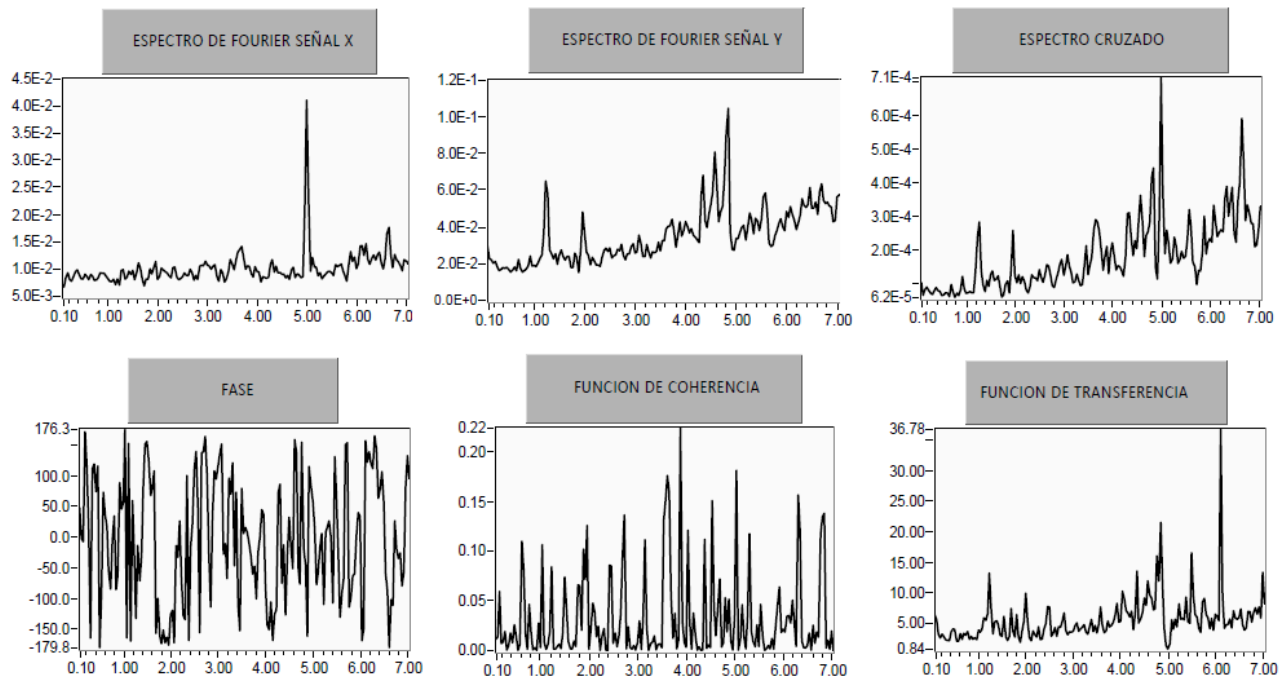


Fig. A.19. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E5. Dirección: T

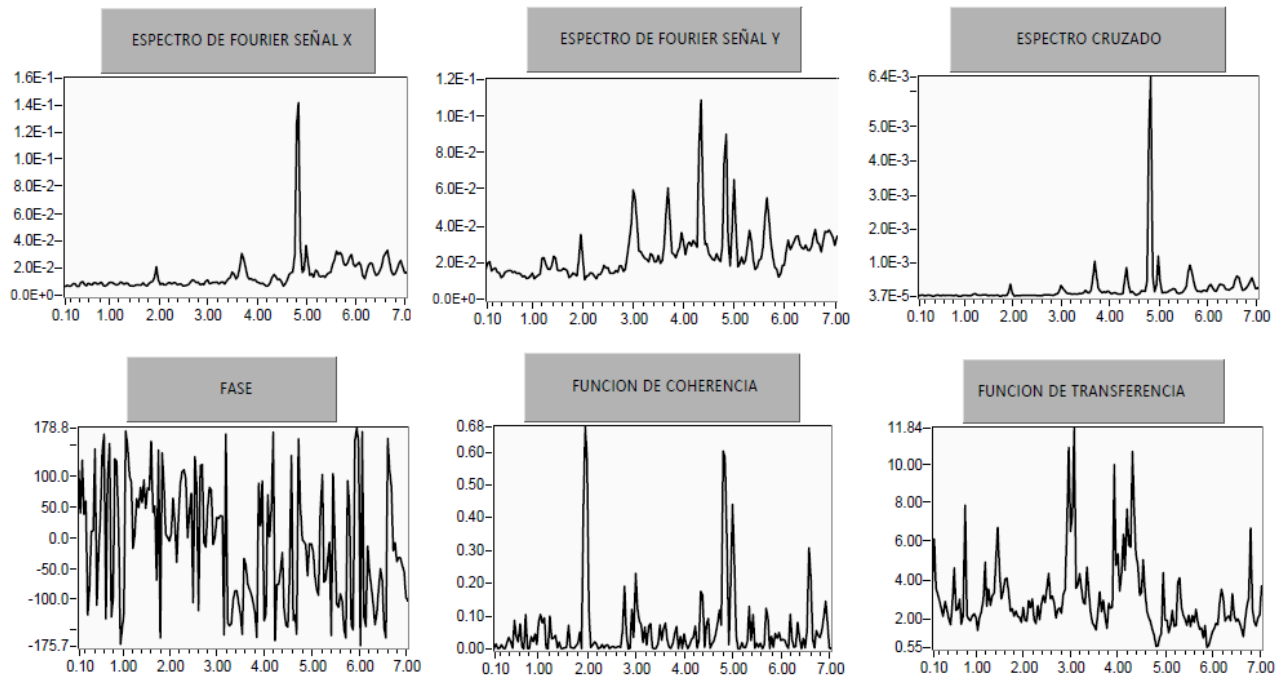


Fig. A.20. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E5. Dirección: L

**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UNA ESTRUCTURA INDUSTRIAL
MEDIANTE PRUEBAS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**

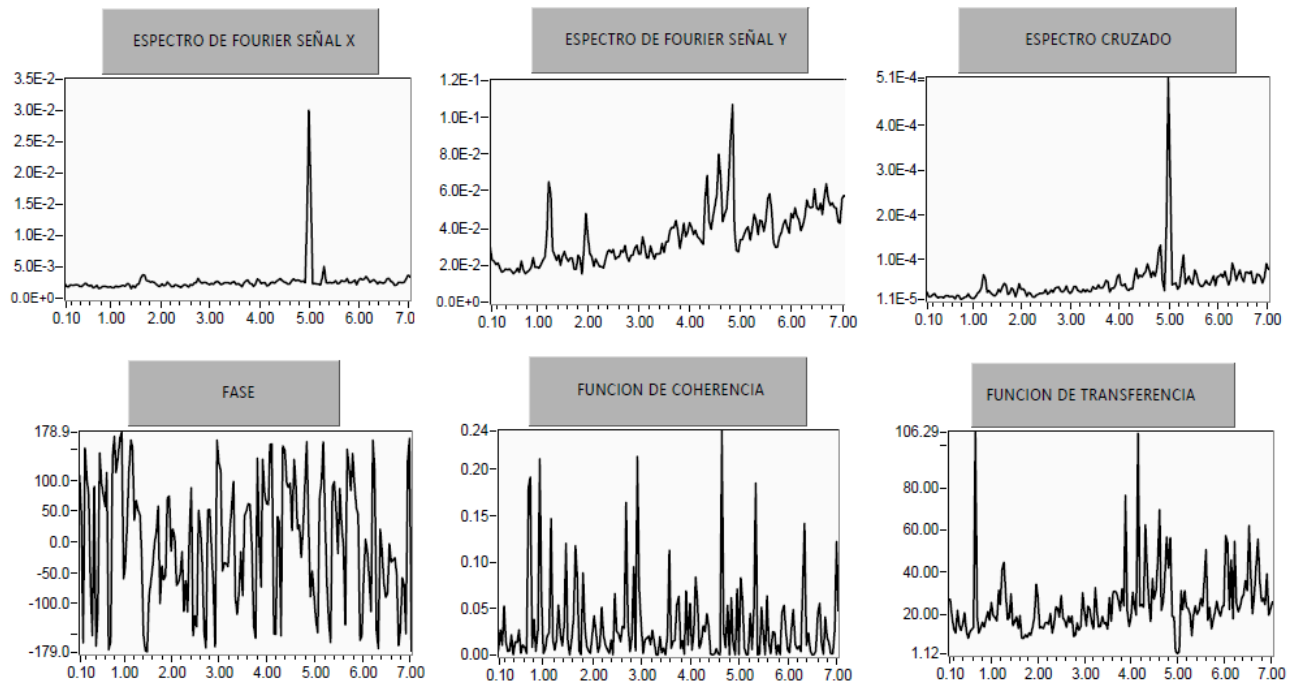


Fig. A.21. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E4. Dirección: T

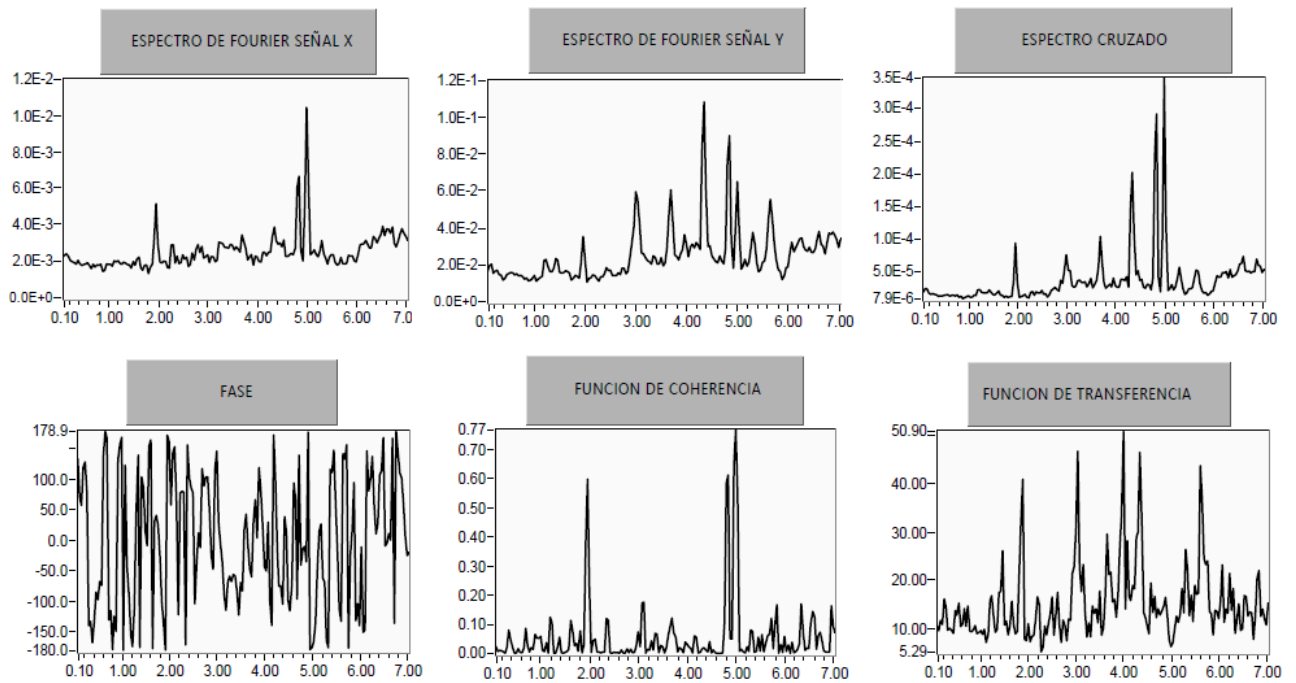


Fig. A.22. Espectro de Fourier y cocientes espectrales. Equipos: E1 y E4. Dirección: L