



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

IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE UNA  
PLATAFORMA MARINA DE PERFORACIÓN, BASADA EN EL MONITOREO  
DE VIBRACIONES

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

PRESENTA:  
HERLINDO MÉNDEZ ROMERO

TUTOR PRINCIPAL  
DR. A. GUSTAVO AYALA MILIÁN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR  
DR. EDUARDO REYNOSO ANGULO, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
M. I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
DR. ORLANDO JAVIER DÍAZ LÓPEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA  
DR. DARÍO RIVERA VARGAS, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. DICIEMBRE 2014

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. EDUARDO REYNOSO ANGULO  
Secretario: M. I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ  
Vocal: DR. AMADO GUSTAVO AYALA MILIÁN  
1 er. Suplente: DR. DARÍO RIVERA VARGAS  
2 d o. Suplente: DR. ORLANDO JAVIER DÍAZ LÓPEZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Amado Gustavo Ayala Milián

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Amado Gustavo Ayala Milián', written over a horizontal dashed line.

**FIRMA**

## **Agradecimientos**

*Cuando llego al final de este proceso de formación, vienen a mi cabeza muchos momentos y muchas personas, a las cuales deseo brindarles una breve mención, principalmente agradezco a Dios por permitirme seguir en el camino, por haber tenido la bendición de hacer lo que quiero y lo que más me apasiona, por ser mi camino y mi luz, sin su bendición y ayuda todo lo que he logrado no hubiera sido posible.*

*A mi familia por su cariño y apoyo incondicional; a mis verdaderos amigos. Gracias a Ustedes por ser la llama que no solo me dio luz sino abrigo en muchos momentos de descreimiento, gracias por sus lecciones de vida, y por sus ejemplos, que llenaron mi vida de un nuevo sentimiento . . . gracias por ese apoyo invaluable e incondicional. Sus vidas y sus enseñanzas me hacen tener fe en algo sumamente sagrado: que la vida se debe encarar con dignidad y con pasión.*

*Quiero agradecer al Dr. Gustavo Ayala Milian por sus acertadas sugerencias y agudas apreciaciones cuando las necesite y más aún, por ser mi mentor, no solo en las cuestiones académicas, por la fineza de sus razonamientos, dando siempre ese toque elegantemente sencillo, por su calidad humana, por su valiosa colaboración cuando requerí de una mano, por su interés y constante ayuda en la orientación de la presente tesis, al igual que en lo personal, por sus numerosas sugerencias y recomendaciones que fueron de un inmenso valor para la buena ejecución de este trabajo. Por permitirme formar parte de su equipo de trabajo, por su apoyo y asesoría académica brindada durante mi estancia en el Instituto de Ingeniería, por la paciencia y dedicación mostrada.*

*Agradezco también a mis profesores del posgrado de la facultad de Ingeniería, en especial al M.I Octavio García Domínguez porque realiza una noble labor impartiendo sus conocimientos, por su generosa ayuda y atención en momentos complicados, siempre con amabilidad y respeto, además de estar permanentemente dispuesto a colaborar en el desarrollo de esta investigación.*

*A mis compañeros y amigos del área de Mecánica aplicada, Otoniel, Saúl, José, Hugo, Jaime, Mabel, y al M.I. Marco Antonio Escamilla por su valiosa ayuda, a todos ellos gracias por brindarme su amistad y compartir sus conocimientos sin esperar nada a cambio.*

*Por último agradezco al Instituto de Ingeniería y a CONACYT por la beca otorgada durante la elaboración de la presente tesis.*

---

---

# Contenido

---

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Objetivo .....	3
1.3	Planteamiento del problema.....	4
1.4	Justificación del tema.....	5
1.5	Organización del trabajo .....	7
1.6	Alcances y metas .....	8
2	ESTADO DEL ARTE DEL MONITOREO DE VIBRACIONES .....	9
2.1	Métodos experimentales .....	9
2.1.1	Tipos de pruebas dinámicas experimentales .....	10
2.1.2	Pruebas de vibración ambiental.....	11
2.1.3	Vigilancia y monitoreo de la salud estructural (SHM).....	13
2.2	Equipos de medición .....	13
2.2.1	Mecanismos de excitación .....	14
2.2.2	Transductores de respuesta.....	14
2.2.3	Acelerómetros Piezo-eléctricos.....	14
2.2.4	Acelerómetros Piezo-resistivos y capacitivos .....	15
2.2.5	Servo-acelerómetros (Fuerza-equilibrio) .....	15
2.2.6	Sistemas de acelerómetros con GPS integrado .....	16
2.2.7	Sistemas de registro y adquisición de datos .....	17
3	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SEÑALES.....	19
3.1	Antecedentes .....	19
3.2	Análisis de señales.....	20
3.3	Tipos de señales .....	20
3.4	Series de Fourier.....	22
3.5	Transformada de Fourier .....	23
3.5.1	Transformada discreta de Fourier DFT.....	25
3.5.2	Transformada rápida de Fourier o FFT .....	26
3.6	Espectro cruzado.....	26

3.7	Espectro de potencia.....	27
3.8	Función de transferencia.....	27
3.9	Función de coherencia .....	28
3.10	Ángulo de fase.....	29
3.11	Correlación espectral entre señales.....	30
3.12	Tipos de Filtros Digitales .....	31
3.13	Muestreo .....	31
3.14	Interpretación de señales para determinar las propiedades dinámicas.....	32
3.15	Determinación de los periodos naturales .....	33
3.16	Determinación de las formas modales.....	34
3.17	Determinación del amortiguamiento.....	35
4	EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	37
4.1	Descripción de la estructura en estudio.....	37
4.2	Metodología propuesta para la solución del problema.....	38
4.3	Descripción de los instrumentos de medición utilizados.....	40
4.4	Arreglos instrumentales para la medición de señales .....	43
4.5	Herramienta utilizada para el procesamiento de señales .....	60
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	62
5.1	Metodología para el procesamiento de la información registrada .....	62
5.2	Organización de las señales de aceleración registradas .....	63
5.3	Determinación de las aceleraciones pico de las señales registradas.....	72
5.3.1	Resultados de las Aceleraciones Pico.....	76
5.4	Determinación de los desplazamientos máximos de las señales registradas.....	77
5.4.1	Desplazamientos máximos absolutos .....	79
5.4.2	Desplazamientos máximos absolutos promedio .....	90
5.4.3	Desplazamientos absolutos simultáneos al desplazamiento máximo.....	95
5.4.4	Desplazamientos relativos entre las cubiertas de la plataforma .....	101
5.4.5	Desplazamientos relativos de la estructura de la torre de perforación. ....	102
5.4.6	Resultados obtenidos a partir de los desplazamientos máximos .....	103
5.5	Determinación de las propiedades dinámicas de la estructura.....	106
5.5.1	Espectros de Fourier de la primera campaña de mediciones. ....	107
5.5.2	Espectros de Fourier de la segunda campaña de mediciones. ....	111
5.5.3	Análisis de correlación espectral de las señales registradas.....	116

5.5.4	Periodos naturales de la plataforma y de su torre de perforación.....	126
5.5.5	Formas modales de la plataforma y de su torre de perforación.....	128
5.5.6	Cálculo de la Fracción de Amortiguamiento Crítico de la Plataforma .....	129
5.5.7	Resultados de los porcentajes de amortiguamiento crítico .....	131
6	REVISIÓN DE VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES .....	133
6.1	Importancia de la revisión de vibraciones .....	133
6.2	Criterios de aceptación de vibraciones en estructuras .....	134
6.2.1	Criterios de integridad estructural .....	135
6.2.2	Criterios psicológicos (Percepción y respuesta del cuerpo humano) .....	139
6.2.3	Criterios de calidad en las operaciones.....	142
6.3	Revisión de los estados límite de vibración en las estructuras de estudio .....	142
7	CONCLUSIONES .....	144
8	REFERENCIAS.....	147

# CAPÍTULO 1

## *Introducción*

### 1.1 Antecedentes

El campo de la instrumentación y monitoreo de la salud estructural es bastante amplio y su aplicación se desarrolla con mayor frecuencia en las ingenierías aeronáutica, civil y mecánica, principalmente, aunque también hay avances en otras áreas como en la eléctrica y la electrónica. En el campo de la ingeniería civil, estas técnicas ya se aplican a estructuras flexibles como puentes, edificios altos, o estadios, también en presas y túneles así como en edificaciones con valor histórico. El análisis de sistemas estructurales debe tratar con numerosas fuentes de incertidumbre y de no linealidades, por tal motivo deben realizarse numerosas simplificaciones en el análisis estructural debido a la complejidad matemática que este involucra, y a su vez esto conlleva a que no se modele de forma precisa el sistema físico “real”, por lo anterior se deben emplear otras técnicas de identificación que incorporen en los modelos dichas complejidades del comportamiento estructural, Ospina (2009).

El futuro prometedor de la instrumentación y el monitoreo estructural, ha inspirado a muchos investigadores en todo el mundo, investigaciones recientes, desarrollos teóricos y aplicaciones prácticas se pueden encontrar en Zivanovic *et al.* (2005), Wenzel y Pichler, (2005), Nagayama y Spencer, (2007), Silva, (2009), etc. Sin embargo, hasta hace poco tiempo, en su gran mayoría, las aplicaciones estaban orientadas a estructuras de gran magnitud y relevancia, pero con el desarrollo tecnológico actual, su utilización es ahora viable en estructuras de menor escala. La utilización de estas técnicas de monitoreo estructural permiten al analista la posibilidad de estudiar el comportamiento estructural, así como darle seguimiento con el fin de detectar oportunamente comportamientos inadecuados en estructuras, una de las principales aplicaciones en la ingeniería estructural es que permite la verificación de los modelos analíticos que se emplearon para su concepción.

En la actualidad las estructuras modernas son a menudo estructuras esbeltas expuestas a fuertes vibraciones inducidas por las acciones actuantes en ellas, también debido a la disminución del tiempo en su construcción, por otro lado debido a la utilización de nuevos materiales y a que deben satisfacer los requisitos estéticos modernos, vidas más largas y mayor esbeltez, los cuales pueden conducir a problemas de capacidad de servicio en las estructuras, así como acarrear problemas de vibraciones nocivas, dichos problemas han motivado el desarrollo de importantes investigaciones sobre las vibraciones generadas en las estructuras, debido a que afectan a la comodidad de los ocupantes, la integridad estructural y la durabilidad en la estructura, Zivanovic *et al.* (2005).

La instrumentación y monitoreo de estructuras importantes como es el caso de las plataformas marinas, ha jugado un papel trascendente en el entendimiento de su comportamiento y en la búsqueda de una solución racional para su modificación y/o reforzamiento cuando así se requiere. La ejecución de estudios con fines de evaluación estructural como el que se presenta en este trabajo de investigación son recientes, no solo en México, sino en el resto del mundo, sin embargo, con los desarrollos tecnológicos actuales este tipo de estudios son técnica y económicamente posibles. Las técnicas recientes de evaluación estructural representan una opción justificable y confiable para determinar las características dinámicas de estructuras sobre las que se tengan dudas en su comportamiento bajo condiciones de servicio o extremas, dichas técnicas permiten conocer su comportamiento real y a partir de este y de así requerirse, las modificaciones y/reforzamiento que modifiquen o eliminen el comportamiento no deseado, García *et al.* (2012)

El Monitoreo de la Salud Estructural (SHM) es un término cada vez más utilizado en las últimas décadas para describir una serie de sistemas aplicados en gran escala en la infraestructura civil y cuyo objetivo principal radica en poder determinar los cambios graduales o repentinos en el comportamiento de las estructuras. Esta técnica permite aumentar la seguridad, la confiabilidad, la disminución del costo de mantenimiento y reparación en las estructuras, debido a que nos permite la adquisición de datos en tiempo real, sobre la integridad estructural bajo sus condiciones actuales, los datos que se obtienen por medio de dicha técnica se asocian a diversos factores como, la corrosión, cambios en las variables del ambiente, agrietamiento, fatiga, reacciones químicas, humedad, desplazamientos, deformaciones, cambios de rigidez, esfuerzos, o a la degradación de los materiales, vibraciones, etc., a la vez permite realizar la evaluación de la

estructura después de haber estado expuesta a un sismo y determinar su integridad estructural, sin embargo a pesar de los muchos beneficios del Monitorio de la Salud Estructural, en la actualidad esta técnica todavía no ha sido ampliamente investigada e implementada, Ramos *et al.* (2010).

Dicho lo anterior, es importante implementar el monitoreo del comportamiento dinámico en las estructuras, el control de sus niveles de vibración y evaluar la evolución del estado de salud estructural, bajo excitaciones operativas, aprovechando los avances tecnológicos recientes en términos de sistemas dinámicos de monitoreo.

## 1.2 Objetivo

Las investigaciones realizadas en la actualidad basadas, en Monitoreo de la Salud Estructural (SHM) en estructuras de gran magnitud, reportan sobre su desarrollo bajo costo, esta técnica como ya se mencionó permite comprender el comportamiento dinámico, controlar la integridad y el rendimiento de una estructura, así como para detectar cambios estructurales en condiciones operativas, además que nos permite detectar la presencia de algún daño generado como consecuencia de un sismo o efectos ambientales, Lima *et al.* (2008).

Por tal motivo este trabajo de investigación se apega a diferentes aspectos, tales como conocer el comportamiento dinámico “real” de una plataforma marina de perforación, en condiciones operativas, debido a que el exceso de vibración inducida por causas externas, como la excitación producida por el viento, el oleaje, la operación de maquinaria, etc., pueden conducir a comportamientos no deseados en la estructura o cambios estructurales en sus condiciones normales de operación.

El presente trabajo de investigación pretende seguir la línea de investigación encaminada al estudio de las vibraciones en estructuras marinas, con la finalidad de aplicar estas técnicas de identificación de los parámetros que caracterizan dinámicamente a una estructura, y que aún son poco utilizadas en nuestro país, si no es que para muchos desconocidas. Por tal motivo es de mi interés caracterizar el comportamiento dinámico de la superestructura de una plataforma marina de perforación y de sus componentes con base en sus propiedades dinámicas derivadas del análisis de señales de aceleración vs. tiempo, registradas mediante la disposición de arreglos de

medición propuestos en varias campañas de mediciones en sitio, obtenidas de las vibraciones ambientales producidas por acciones ambientales normales como el oleaje, corrientes marinas, viento, etc., así como de las acciones en condiciones de operación. Una vez determinado los parámetros dinámicos en dicha plataforma marina, se analizará si un estudio de vibraciones ambientales es una herramienta confiable, que permita evaluar el daño en una estructura de esta magnitud; también se analizarán los posibles beneficios de las pruebas de vibración ambiental, en términos de prevención de colapso, ante las solicitaciones actuales.

### 1.3 Planteamiento del problema

Cuando se tiene la necesidad de evaluar, modificar y/o estimar las condiciones “reales” de una estructura existente, surge la problemática frecuente en la verificación de los modelos analíticos que fueron utilizados durante su concepción, dicho problema se presenta principalmente debido a la falta de información del proyecto original, o por la escasa relación que existe entre los antecedentes disponibles con la estructura actual; también es común que en la mayoría de los casos se desconozca si se han realizado ampliaciones o modificaciones respecto al uso para la cual fue diseñada la estructura. Por lo que surge la necesidad de cuantificar estas incertidumbres, las cuales deben ser consideradas con la mayor aproximación posible en la representación de los modelos estructurales, sin embargo cuando la estructura en estudio es de gran magnitud y relevancia como es el caso de los puentes, presas, estructuras marinas, etc, estos factores han de ser tomados en cuenta con la mayor precisión posible al realizar la estimación de su comportamiento “real”, además cabe mencionar que en la práctica se tiene la tendencia a realizar una evaluación estructural, cuando los daños son muy notorios.

También es de interés mencionar que para determinar las propiedades dinámicas en estructuras, es común que para su obtención el analista utilice ecuaciones simplificadas, y en consecuencia cuando se realiza su evaluación estructural, se generan modelos numéricos que no siempre son congruentes con la realidad, lo cual conduce a estimar parámetros poco confiables (Frecuencias naturales, periodos de vibrar y sus porcentajes de amortiguamiento crítico, etc.), que finalmente conlleva a introducir incertidumbres en la reproducción de su comportamiento “real”.

Por lo que en el presente trabajo de investigación, se estudiarán las técnicas de identificación dinámica utilizadas con mayor frecuencia en la actualidad, con la finalidad de incorporar en los modelos analíticos, las complejidades mencionadas anteriormente en la determinación del comportamiento “real” de una estructura. En esta tesis, se pretende caracterizar dinámicamente una plataforma marina de perforación, la cual debido a sus características locales se encuentra expuesta a acciones ambientales y a prácticas de operación extremas. Los daños presentados a corto y largo plazo, como ya se ha mencionado son difíciles de cuantificar y de incorporar en sus modelos analíticos, por lo que con el monitoreo de vibraciones ambientales se pretende obtener las propiedades dinámicas de la Plataforma en estudio, para posteriormente realizar su diagnóstico integral, y promover las medidas preventivas de ser necesarias, debido a la importancia que tienen este tipo de estructuras marinas, es de gran relevancia su inspección periódica, con la finalidad de identificar posibles deterioros estructurales y realizar su mantenimiento oportuno.

La problemática particular presentada en este trabajo de investigación es el siguiente, se tiene una plataforma marina de perforación localizada en la sonda de Campeche, que presenta un deficiente funcionamiento en sus componentes, los cuales experimentan desplazamientos laterales que, comúnmente, se presentan en estructuras similares por efecto del oleaje pero que, en este caso, son relativamente mayores a los aceptados reglamentariamente, el problema principal de la estructura en estudio radica en la suspensión operacional de los equipos de perforación por causas desconocidas, posiblemente asociadas a vibraciones nocivas no contempladas. Las hipótesis que se tienen sobre el mal funcionamiento de la plataforma son diversas, una de ellas es la aparente vibración excesiva generada en las cubiertas, así como también en la estructura de la torre de perforación, en la cual se encuentra ubicada la lingada o tubería de perforación.

#### **1.4 Justificación del tema**

Las instalaciones marinas están sujetas a efectos ambientales extremos y a prácticas de operación propias de la zona particular de interés, por lo que deben ser diseñadas o evaluadas de acuerdo con normas y estándares que reflejen estas características locales, así como las condiciones económicas propias del país, Leon, (2008). Por lo que surge la necesidad de estimar los parámetros que permitan caracterizar el comportamiento “real” de estas estructuras marinas. Por otro lado el comportamiento y los parámetros dinámicos de una estructura pueden variar en

función del tipo de solicitaciones, su antigüedad y otros factores ocasionales y/o ambientales. Sin embargo la obtención y/o estimación de estos parámetros representa cierta dificultad e incertidumbres, cuando se desea evaluar estructuras utilizando parámetros que representen la “realidad”, con la finalidad de incrementar la seguridad y confiabilidad operacional de estas. Por lo anterior es de mi interés, estudiar los métodos más comunes para la obtención de las características dinámicas en estructuras de uso industrial, como es el caso de las plataformas marinas de perforación, haciendo uso del monitoreo de vibraciones.

Es de interés mencionar que la identificación estructural, basada en el monitoreo de vibraciones aplicada en estructuras importantes como es el caso de las plataformas marinas, ha jugado un papel trascendente en el entendimiento de su comportamiento y en la búsqueda de una solución racional para su modificación y/o reforzamiento cuando así se requiere. Es por esto que la instrumentación y monitoreo de vibraciones ha logrado en los últimos años incrementar la confiabilidad y seguridad en las estructuras desde la perspectiva de la obtención efectiva de sus parámetros dinámicos.

En la actualidad el monitoreo de la salud estructural cada vez es más utilizado en el área de las evaluaciones estructurales, ya que permite vigilar el estado de estructuras existentes, generalmente a través de sus propiedades dinámicas.

Los analistas que han implementado estas herramientas lograron ampliar significativamente la confiabilidad operacional de las estructuras, permitiéndoles evaluar estructuras con parámetros “reales”, ya que algunas de las principales fuentes de error al realizar una evaluación son, por un lado, la estimación de las propiedades dinámicas de la estructura y, por otro, la utilización de modelos simplificados que no reflejan adecuadamente el comportamiento “real” de la estructura.

En lo que respecta a la determinación de las propiedades dinámicas en estructuras, en el presente trabajo de investigación se obtendrán mediante la técnica de vibración ambiental, la cual se basa en la medida de la respuesta de la misma, usando sólo la excitación del ambiente y las fuerzas de servicio que actúan sobre esta, con el objeto de obtener una descripción modal de la estructura bajo sus condiciones “reales” de operación. Sin embargo, en el estado actual del conocimiento, en México dicha técnica aún se encuentra en una fase temprana de desarrollo, el cual es un problema importante, aun no resuelto del todo.

A diferencia de otro tipo de estructuras, las plataformas marinas se encuentran expuestas a un ambiente hostil y a periodos de servicio prolongados, debido a que el ambiente marino hace que este tipo de estructuras pierdan serviciabilidad más rápidamente que otras, si bien es inevitable su deterioro, estas deben ser evaluadas de manera oportuna y establecer las medidas preventivas y/o correctivas necesarias con la finalidad de que la estructura no presente daños severos futuros. La motivación de realizar esta investigación es poder llevar a cabo la determinación veraz de las propiedades dinámicas en estructuras marinas, las cuales son de gran relevancia en la Ingeniería estructural, además cabe mencionar que en este tipo de estructuras marinas regularmente su inspección física es llevada a cabo por buzos especializados en aguas profundas, sin embargo debido a la escasa visibilidad en el fondo marino conduce al ocultamiento y detección de los posibles daños estructurales durante su inspección, por lo cual surge la necesidad de investigar técnicas alternativas de inspección y supervisión que permitan al analista determinar la integridad estructural en este tipo de estructuras, y que a pesar de los múltiples beneficios de estas técnicas son poco utilizados en nuestro país.

### **1.5 Organización del trabajo**

En el presente trabajo de investigación, primeramente se introducen los conceptos y la teoría necesaria para comprender el estudio y monitoreo de vibraciones, así como los métodos y equipos de instrumentación más comúnmente utilizados para la determinación de los parámetros dinámicos en una estructura. Por lo que en el primer capítulo se presenta la introducción, los antecedentes sobre el tema, los objetivos, planteamiento y justificación del problema; en el segundo capítulo se estudia lo relacionado a las técnicas de monitoreo y registro de vibraciones; en el capítulo 3 se aborda el tema de la obtención de los parámetros dinámicos de una estructura, mediante la aplicación del análisis espectral. En el capítulo cuatro se describen las características técnicas de las estructuras en estudio y las campañas de medición propuestas, posteriormente en el capítulo cinco se presenta el análisis de las señales registradas y los resultados experimentales obtenidos a partir del estudio de vibración ambiental, tales como los parámetros dinámicos de las respectivas estructuras en estudio, finalmente en el capítulo seis se exponen las conclusiones y comentarios generales sobre este tipo de técnicas de obtención de datos en tiempo real.

## 1.6 Alcances y metas

El alcance que pretende este trabajo de investigación, es determinar las propiedades dinámicas de una plataforma marina de perforación, a partir de estudios de vibraciones ambientales producidas por las acciones de oleaje, corrientes marinas y viento principalmente. Bajo estas condiciones de servicio, se espera que una vez obtenidas dichas propiedades, puedan ser utilizadas en la calibración del modelo analítico de la estructura, con la finalidad de reproducir razonablemente el comportamiento “real” de la estructura, así como reducir significativamente la incertidumbre en la determinación del daño o la vida remanente de estructuras en condiciones de servicio.

En general se espera que a partir de los resultados obtenidos en este proyecto de investigación, sea posible verificar el uso de estas técnicas de monitoreo estructural, y que son poco utilizadas en nuestro país, con la finalidad de caracterizar el comportamiento dinámico en este tipo de sistemas estructurales, y finalmente poder emitir una opinión sobre si el uso de estas es confiable.

También se pretende realizar el desarrollo y la calibración de los modelos estructurales *ad hoc* de la plataforma marina de perforación, y de ser necesario realizar una propuesta de reforzamiento estructural de la misma.

# CAPÍTULO 2

---

## *Estado del arte del monitoreo de vibraciones*

---

### 2.1 Métodos experimentales

El desarrollo de métodos experimentales para el seguimiento, monitoreo y evaluación de las estructuras fue impulsado debido a que en las últimas décadas se exigen mayores demandas en las estructuras, las cuales requieren de métodos más económicos y confiables en cuanto a su caracterización dinámica. Restricciones tales como la interrupción de operaciones, acceso limitado a la estructura durante su inspección y finalmente costos elevados, han llevado al desarrollo de nuevas técnicas de evaluación estructural. El estudio e implementación de los métodos de monitoreo estructural, permiten el soporte a los nuevos desarrollos tecnológicos de las próximas décadas, incluso si la metodología de análisis cambia, los registros antiguos aún se podrán utilizar para las nuevas rutinas de evaluación, no obstante estos hechos implican mayores trabajos de investigación que deben ser expuestos en el futuro, Maeck, (2003).

Estos sistemas de monitoreo dinámico en estructuras, requieren en su mayoría el uso de una serie de medidores de esfuerzos, transductores de desplazamiento, acelerómetros, sensores de temperatura, medidores GPS, cámaras de video, entre otros, los cuales pueden ser de instalación permanente o temporal y que permitan registrar las respuestas estructurales y ambientales, ya sea bajo variaciones en las condiciones de servicio durante un largo período de tiempo o inmediatas, Vandiver, (1975).

### 2.1.1 Tipos de pruebas dinámicas experimentales

El monitoreo de vibraciones en sistemas estructurales, se clasifica principalmente dependiendo del tipo de excitación a la cual este sometida la estructura y por su tipo de medición, siempre con la finalidad de determinar directa o indirectamente los parámetros dinámicos de la misma. Se subdividen comúnmente en: (1) Mediciones sísmicas, (2) Vibraciones forzadas y (3) Vibraciones ambientales, Henao, (2013).

- (1) Las mediciones sísmicas consisten en la instrumentación permanente de una estructura, con la finalidad de registrar eventos sísmicos reales, para posteriormente realizar el análisis de las señales registradas obteniéndose así, su comportamiento real ya que esta se encuentra sometida a aceleraciones reales del suelo, su principal desventaja se debe a la incertidumbre en la ocurrencia de sismos, lo cual como ya se mencionó requiere de un monitoreo permanente, elevando los costos por el tiempo de ejecución.
- (2) Las vibraciones forzadas son aquellas en las que se efectúan mediciones en donde la estructura se somete a una vibración, mediante una excitación artificial conocida y controlada (amplitud, duración y frecuencia), que permita inducir una respuesta. Estas pruebas se dividen en dos tipos: ensayos en laboratorio aplicados a modelos estructurales a escala, llevados a cabo en mesas vibratorias y los ensayos efectuados a estructuras reales, sin embargo, para su aplicación se requiere contar con mecanismos de excitación (grúas, martillos de impacto, sistemas de caída de peso, etc.) y tener el control deseado de la carga aplicada, además se tiene la desventaja que para su aplicación en su mayoría requiere la interrupción temporal de las operaciones y acceso limitado a la estructura.
- (3) Pruebas de vibración ambiental, estas consisten en el registro de vibraciones, producidas por excitaciones ambientales (viento, flujo vehicular, operación de maquinaria, etc.), en condiciones de servicio, y permiten obtener las respuestas ambientales y estructurales. Es un método no destructivo y no requiere la interrupción de las operaciones durante su ejecución, debido a que no es necesaria la instrumentación permanente, por esto es el método utilizado con mayor frecuencia para el monitoreo dinámico continuo y permanente en sistemas estructurales.

Por lo anterior en este proyecto de investigación, se optará por el uso de las pruebas de vibración ambiental, para la estimación de las propiedades dinámicas de las estructuras en estudio, por lo cual a continuación se profundizará más sobre la utilización, ventajas y desventajas de este método de monitoreo de vibraciones.

### **2.1.2 Pruebas de vibración ambiental**

Es el método más comúnmente utilizado para el monitoreo de vibraciones, el cual es una técnica muy útil, ya que a través de este es posible determinar las propiedades dinámicas “reales” de un sistema estructural, para su posterior comparación con las generadas teóricamente, como por ejemplo con la información obtenida por el elemento finito u otro modelo teórico. Asimismo puede emplearse para evaluar los daños ocasionados a una estructura, posterior a un evento sísmico, o bien, estimar su rigidez después de haber sido reforzada estructuralmente. El objetivo principal de las pruebas de vibración ambiental como ya se mencionó es la identificación de las propiedades dinámicas estructurales, con el fin de calibrar y actualizar los modelos analíticos. También se utiliza para caracterizar con mejor precisión el desempeño estructural, así como para vigilar la salud estructural de la misma con el propósito específico de determinar sus condiciones actuales, Wenzel y Pichler, (2005).

El concepto de Vibración ambiental principalmente se basa en que las entradas no se conocen totalmente, dejando como siempre un margen de incertidumbre, por lo que se debe tener en cuenta que este método, en ciertos casos no proporcionará respuestas exactas, sin embargo la mayoría de la veces los resultados cumplirán nuestras expectativas. También se tiene que considerar que es una técnica que se encuentra en etapas de desarrollo temprano y que se ha explorado sólo una parte de su amplia gama de sus aplicaciones, el analista que los implemente deberá estar consciente que existen limitaciones en su aplicación. Por lo cual queda mucho por estudiar sobre este tema, y además es probable que los enfoques actuales sean revocados por los futuros trabajos de investigación. A pesar de las limitaciones mencionas sobre este método, con los enfoques y suposiciones que puedan realizarse actualmente, se cuenta con el potencial para amplias aplicaciones en la Ingeniería estructural.

Su aplicación se limita principalmente a los siguientes tres aspectos:

1. Su primer limitante es que sólo se adquieren datos representativos de la respuesta ante solicitaciones de muy baja intensidad.
2. La siguiente limitante es la implementación de sistemas automatizados de medición, que permitan extraer con rapidez las propiedades dinámicas, debido a la gran cantidad de señales de vibración que deben ser obtenidas para su análisis.
3. La última es por las variaciones ambientales del sistema causadas por las condiciones ambientales y de operación, y que además no se tienen los elementos para aislar dichas variaciones con los cambios inducidos por daños en el sistema estructural, y puede conducir a ocultar modificaciones en su comportamiento, Moutinho, (2007)

El método se basa en el hecho de que cualquier estructura tiene modos naturales de vibración que son propiedades fundamentales de la estructura y no cambian a menos que haya cambios en la distribución y magnitud de la rigidez o de la masa, Silva, (2009). Sin embargo, cabe mencionar que en las estructuras marinas sus modos de vibrar son continuamente excitados por acciones extremas como el viento, el oleaje, las corrientes marinas, fuerzas periódicas producidas por maquinaria o equipos en operación, etc., por lo cual es relevante determinar sus características modales con la ayuda de la instrumentación y técnicas de medición adecuadas, que permitan exhibir los posibles daños estructurales y cambios en su rigidez.

El potencial del método de vibración ambiental (AVM) no sólo se limita a la evaluación de la condición real de una estructura, sino que también ofrece una variedad de más aplicaciones, tales como: análisis de cargas por flujo vehicular, evaluación ambiental, predicciones del ciclo de vida, planificación del mantenimiento, control de calidad, etc. Este método es de carácter importante en la Ingeniería estructural comparable con los principales métodos de inspección utilizados en la actualidad. Al evaluar el comportamiento de vibración en una estructura se obtienen valores “reales”, si bien el método tiene ciertas restricciones en cuanto a su aplicación, las cuales ya se han mencionado con anterioridad, estas no están sujetas a las circunstancias o del personal que lleve a cabo las pruebas, ya que el estado o condiciones de la estructura examinada se determinan por una evaluación analítica y sistemática, Nagayama y Spencer, (2007).

### 2.1.3 Vigilancia y monitoreo de la salud estructural (SHM)

La implementación de detección de daños y caracterización de estructuras de ingeniería es un proceso conocido como Structural Health Monitoring (SHM). El proceso de vigilancia y monitoreo de la salud estructural, implica la inspección de una estructura en el tiempo, empleando mediciones de respuesta dinámica, las cuales deben ser muestreadas periódicamente mediante un arreglo de sensores, con la finalidad de determinar el estado actual de la salud del sistema, Farrar *et al.* (1999).

El método de SHM puede realizarse a largo plazo, actualizando periódicamente la información sobre la capacidad de la estructura, y determinar si está puede realizar la función para la cual fue diseñada, previendo su degradación resultante de entornos operativos. También es común su aplicación después de eventos extremos, tales como sismos, para la detección rápida en tiempo “real”, de las condiciones estructurales actuales, proporcionando información confiable sobre la integridad de la estructura.

## 2.2 Equipos de medición

Una vez descritas las principales técnicas experimentales de monitoreo, es necesario describir las características de los equipos de medición y lo referente al procesamiento de señales.

Básicamente la parte experimental para el monitoreo de vibraciones, requiere del uso de ciertos elementos muy importantes, aunque puede haber diferencias, sin embargo, por lo regular casi siempre son utilizados los que se mencionan a continuación, Ferreira da Silva, (2007):

1. Un mecanismo de excitación.
2. Un sistema de transductores, con el cual se medirán los diferentes parámetros de interés.
3. Un convertidor analógico-digital (ADC) incorporado en el hardware de adquisición de datos.
4. Un acondicionador de señales.
5. Un analizador para extraer la información deseada, mediante el uso de una computadora para procesar toda la información de la señal digital.

Estos equipos generalmente se pueden dividir principalmente en tres grupos: (a) los mecanismos de excitación, (b) los transductores de respuesta, y (c) los sistemas de adquisición de datos. Las principales características de estos componentes se describen a continuación.

### 2.2.1 Mecanismos de excitación

Los mecanismos de excitación utilizados con más frecuencia en pruebas dinámicas en estructuras de ingeniería civil son los excitadores, martillos de impacto y sistemas de caída de peso. Los excitadores se utilizan para estudiar respuestas dinámicas estacionarias y pueden inducir grandes fuerzas a la estructura. Existen tres tipos, excitador mecánico, electro-magnético y electro-hidráulico. Dichos excitadores tienen que ser fijados a la estructura para la transmisión de la fuerza correcta, sin embargo su aplicación es costosa y como ya se ha mencionado la mayoría de las veces para su aplicación es necesario limitar el uso de la estructura, Escobar y García, (1997).

En cuanto a los otros sistemas ya mencionados, se utilizan para estudiar respuestas transitorias, y suele ser más económicos de implementar que los excitadores mecánicos.

### 2.2.2 Transductores de respuesta

Un transductor es un equipo capaz de transformar una cantidad física, que por lo general define la respuesta del sistema, además de ser un componente capaz de procesar información y energía. En la práctica es común que a los transductores se les conozca como sensores y son comúnmente utilizados en los estudios de vibración ambiental. Los transductores tienen la capacidad de registrar parámetros como desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, etc, en una señal eléctrica proporcional, dicha señal estará lista para ser procesada por el sistema de adquisición de datos, Bolton, (2002).

En teoría, la medida de la respuesta dinámica puede obtenerse por cualquiera de las cantidades físicas anteriormente mencionadas. Sin embargo, al registrar desplazamientos, estos son excelentes en la obtención de respuestas de baja frecuencia, por ejemplo, en estructuras de ingeniería civil, pero también las mediciones de aceleración son más convenientes para componentes de mayor frecuencia, por ejemplo, en maquinaria.

### 2.2.3 Acelerómetros Piezo-eléctricos

Un acelerómetro Piezo-eléctrico es un transductor con un sistema de resorte-masa-amortiguador que produce señales proporcionales a la aceleración en una banda de frecuencias por debajo de su frecuencia resonante. La parte activa del acelerómetro está hecho de cristales de cuarzo o materiales cerámicos, que producen una señal de salida eléctrica proporcional a la aceleración.

La desventaja principal de algunos acelerómetros de este tipo, se refiere a la imposibilidad de poder medir los componentes de DC (0 Hz), como la aceleración de la gravedad, “g”. Esta característica es desfavorable para medir estructuras muy flexibles, en las cuales los valores de frecuencias naturales pueden ser cercanos a cero. Sin embargo, existen transductores Piezo-eléctricos con rangos de frecuencia cercanos a cero y con alta sensibilidad, y esta precisión permite usarlos para caracterizar estructuras flexibles, por otro lado tienen la desventaja de ser costosos, Allen y Mills, (2004).

#### **2.2.4 Acelerómetros Piezo-resistivos y capacitivos**

Estos acelerómetros son capaces de medir señales de aceleración uniforme, lo cual es una ventaja con respecto a los Piezo-eléctricos. También puede responder a diferentes eventos de aceleración, y con un alcance máximo de 1000 Hz. Por lo general, son aún más costosos que los Piezo-eléctricos.

El elemento de detección de este tipo de acelerómetro, se compone de dos condensadores de placas paralelas que actúan en un modo diferencial. Estos condensadores operan en un circuito de puente, junto con dos condensadores fijos, de manera que la salida diferencial medida es proporcional a la aceleración.

#### **2.2.5 Servo-acelerómetros (Fuerza-equilibrio)**

Al igual que los acelerómetros Piezo-resistivos y capacitivos, los acelerómetros fuerza-equilibrio son transductores pasivos y están compuestos por un sistema de masa-resorte, de manera que, bajo alguna excitación, conducen a una señal eléctrica proporcional a la aceleración diferencial. Este tipo de transductores son ampliamente utilizados en la Ingeniería estructural para examinar estructuras flexibles. También son ampliamente recomendables para realizar las pruebas de vibración ambiental, debido a su alta sensibilidad ya que pueden configurarse en un rango dinámico igual a  $\pm 0.5$ ,  $\pm 1$ ,  $\pm 2$  y  $\pm 4$  g, cuentan con un rango de frecuencia desde 0 a 100 Hz y una resolución máxima de 1 mg, por lo cual este tipo de Servo-acelerómetro es ideal para monitorear tanto estructuras como equipos mecánicos, en donde se requieran aplicaciones con sensores altamente sensibles y resistentes, con un mantenimiento mínimo y un método sencillo para pruebas periódicas. Debido a su pequeño tamaño, a sus amplios rangos de sensibilidad y de frecuencias útiles, es el más utilizado en la práctica.

El servo-acelerómetro mostrado en la fig. 2.1, se basa en el equilibrio de fuerzas, y su gran masa mejora la relación señal-ruido. El sistema magnético y sensores de posición capacitivos ofrecen controles simétricos para un centrado electrónico exacto de la masa. En reposo el mecanismo del servo-acelerómetro está en equilibrio y no se genera potencia eléctrica. El sensor dará lugar a una salida eléctrica proporcional a la corriente utilizada para mantener la masa centrada. Este servo-acelerómetro, cuenta con un sistema de posicionamiento simétrico incorporado con el principio de equilibrio de fuerzas, este no puede cambiar arbitrariamente su escala y salir de su calibración.



Fig. 2.1. Acelerómetro Triaxial, GEOSIG modelo AC-6X.

Existen dos factores muy importantes a tomar en cuenta al seleccionar el equipo de medición más adecuado, el primero es el grado en el que influye la presencia del acelerómetro sobre la estructura en el proceso que se está midiendo; el segundo es la variación de la respuesta dinámica del acelerómetro por lo que es muy relevante la forma en que debe fijarse a la estructura.

#### 2.2.6 Sistemas de acelerómetros con GPS integrado

En la última década se han incrementado las investigaciones, que han validado la factibilidad del uso de esta nueva tecnología integrando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el monitoreo del comportamiento dinámico de estructuras. El GPS, proporciona una posición tridimensional de alta precisión, proyectando las coordenadas geográficas de un punto (latitud, longitud, altitud, rumbos, etc.) de forma permanente y en cualquier región del planeta. Debido a estas características y a los resultados reportados en investigaciones recientes, se motivó al desarrollo del monitoreo estructural utilizando sistemas de acelerómetros con la integración del GPS, X. Li *et al.* (2006).

Es tipo de monitoreo in situ, permite determinar las respuestas estructurales bajo condiciones estáticas o cuasi-estáticas, sometidas a cargas extremas y también ante eventos sísmicos, efectos de viento, flujo vehicular, etc. Este sistema de monitoreo es actualmente aplicado a estructuras de gran magnitud y relevancia, como edificios altos, torres, puentes, estructuras marinas, etc. Mediante su implementación puede realizarse la evaluación de daños, la validación de diseños, así como también permite plantear las medidas de mitigación necesarias ante posibles daños estructurales.

Tradicionalmente los acelerómetros han sido comúnmente utilizados, en el monitoreo de la respuesta dinámica en estructuras y haciendo uso de la doble integración numérica a partir de las señales registradas (aceleración vs. tiempo), se obtiene la respuesta de la estructura en función de sus desplazamientos, no obstante, estos resultados exhiben una desviación no deseable, y además sus respuestas no pueden determinarse en tiempo "real", sin embargo, a diferencia de los sistemas de acelerómetros con el GPS integrado, se consiguen adquirir desplazamientos en tiempo real, pero con frecuencias de registro de datos mucho menores.

### 2.2.7 Sistemas de registro y adquisición de datos

Un sistema de registro y adquisición de datos, permite capturar las señales de respuesta de la excitación, mediante series de tiempo-discreto. En ocasiones, es imposible procesar directamente la información dada por un transductor, antes se requiere un acondicionamiento de la señal para poder procesar su información. Un sistema es un proceso (o un dispositivo) que permite la transformación de señales. Se distinguen por tanto, una señal de entrada, una de salida y un mecanismo de transformación representado matemáticamente por un operador. Las funciones más comunes de un acondicionador de señal se describen a continuación:

El tipo más común de acondicionamiento es la amplificación de nivel bajo de señales para aumentar la resolución y reducir o eliminar el ruido, así como para lograr mayor exactitud, la señal debe ser amplificada de modo que la gama de voltajes máximos de la señal condicionada, sea igual al rango de entrada máxima del Convertidor Análogo Digital (ADC). El (ADC) reduce problemas en la solución del muestreo de las señales y el proceso de digitalización, este debe asegurar la exactitud de la señal digital, dicha exactitud depende del número de dígitos binarios utilizados para representar la señal análoga. Es decir se requiere aislar las señales del transductor desde una

computadora, ya que el sistema de medición puede contener registros de aceleraciones muy altas a la que se espera localizar, y también para asegurarse de que las mediciones son representativas del comportamiento estructural, por lo anterior se deben filtrar las señales no deseadas de las señales de interés, Wenzel y Pichler, (2005). Debido a la importancia de filtrar una señal para su procesamiento, más adelante se describirán los filtros que se utilizan con mayor frecuencia.

# CAPÍTULO 3

---

## *Metodología para el análisis de señales*

---

### **3.1 Antecedentes**

El Procesamiento de Señales es una disciplina de las ciencias de la Ingeniería que desarrolla las técnicas de procesamiento, análisis e interpretación de señales. Sus aplicaciones son amplias en telecomunicaciones, audio, video, imagen (médica, satelital), geofísica, etc., sin embargo su aplicación en la Ingeniería Civil surge hasta hace algunas décadas atrás. Entre las operaciones posibles con las señales tenemos el control, filtrado, compresión de datos, predicción, etc. Sus principales objetivos son la detección de una señal, la estimación de sus valores, codificación, compresión para su almacenamiento y transmisión., Medina, (2010).

En la ejecución del monitoreo de vibraciones, a cualquier estructura, las mediciones de campo son registradas a través de un sistema de adquisición de datos, y de varios arreglos compuestos por acelerómetros, acondicionadores de señales, amplificadores, filtros y analizadores de espectros y una computadora personal; mediante la cual se almacena la información de todos los acelerómetros utilizados simultáneamente. Posterior a este proceso se requiere, que una vez registradas las señales de aceleración mediante el uso de una computadora digital, se efectúe el procesamiento de las señales capturadas.

### 3.2 Análisis de señales

La información de las señales se ingresa en el equipo de cómputo en el dominio del tiempo, sin embargo por cuestiones prácticas y de cálculo, es más fácil trabajar en el dominio de la frecuencia. Esta conversión se logra mediante un análisis espectral que permita cambiar del dominio del tiempo al de la frecuencia, basándose en la teoría de la transformada de Fourier, Chopra, (1995).

Por lo que en los siguientes apartados de este capítulo, se presentarán algunos elementos que involucran el Análisis de Fourier, el filtrado y el muestreo de señales, relacionados con el estudio y procesamiento de señales, con la finalidad de implementar su aplicación para la obtención de las propiedades dinámicas de una estructura.

### 3.3 Tipos de señales

La noción de señal es bastante amplia y surge en diferentes situaciones en las cuales ciertas cantidades varían en el tiempo o el espacio de una magnitud física o de otra naturaleza, por ejemplo: la velocidad, la aceleración, la intensidad de corriente, un sonido, etc. y está ligada al concepto de función, Medina, (2010).

La representación matemática de una señal corresponde a la noción de función de una o varias variables: tiempo, espacio, etc. Sin embargo las distribuciones (o funciones generalizadas) constituyen un modelo más general y satisfactorio. Se pueden procesar señales analógicas (representadas por funciones continuas) o señales digitales (dadas por funciones discretas).

Una señal está representada por  $x(t)$ , donde  $t$  es la variable independiente, y está sujeta diferentes atributos y características, mismas que se describen a continuación. En general una señal puede combinar varios de estos atributos los cuales deben ser tomados en cuenta para su procesamiento, Medina, (2010).

- a) Según la presencia o no de elementos probabilísticos: Estocástica y Determinística.
- b) Según la variable independiente: Continua (Analógica) si la variable es continua y Discreta (Digital). Una señal discreta puede ser obtenida por discretización de una señal analógica, mediante un convertidor, en otros casos algunas señales son discretas por su propia naturaleza, por ejemplo las edades de una población.

- c) Según la periodicidad: En periódica y no periódicas. Una señal es periódica si se repite cada cierto intervalo  $T$  (Periodo) de la variable independiente. La frecuencia  $\lambda$  es una medida para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo, y está dada por:  $\lambda = \frac{1}{T}$
- d) Según la exactitud de los valores: Exactas si los valores de la señal (función) sean reales o complejos se consideran exactos (precisión infinita), y aproximadas si sus valores son aproximados, para ser utilizarlos computacionalmente.

A continuación se describen algunas señales elementales:

1. Escalón unitario de Heaviside: esta señal se denota por  $u(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t > 0 \\ 0 & \text{si } t < 0 \end{cases}$

No está definida para  $t = 0$ . También se le expresa como  $H(t)$ , en ocasiones se le asigna el valor  $H(0) = 1/2$ , para obtener su simetría, fig. 3.1.

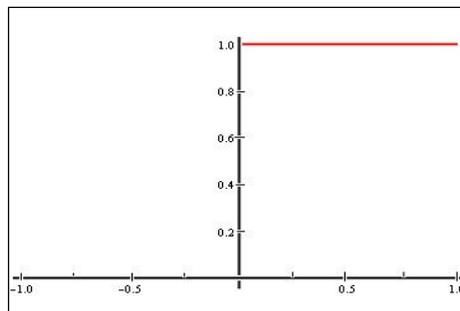


Fig. 3.1. Representación de la Función escalón unitario.

2. Señal rectangular : está definida por  $r_a(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } |t| < a \\ 0 & \text{si } |t| > a \end{cases}$ , donde  $a > 0$

3. Señal sinusoidal: se define por  $x(t) = a \operatorname{sen}(\omega t + \phi)$ , otra representación común es  $x(t) = a \operatorname{cos}(\omega t + \phi)$ , fig. 3.2.

donde:

$|a| = \max|x(t)|$  : es la amplitud

$\omega$  : es la velocidad angular

$T = \frac{2\pi}{\omega}$  : es el periodo

$\lambda = \frac{1}{T}$  : es la frecuencia, o número de veces que la señal periódica se repite en el tiempo

$\omega t + \phi$  : es el ángulo de fase

$\phi$  : es la fase inicial, para  $t = 0$

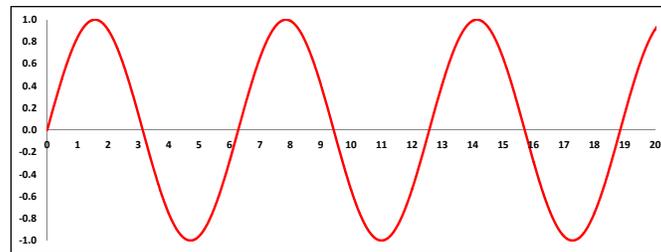


Fig. 3.2. Representación de una Función Sinusoidal.

### 3.4 Series de Fourier

El ingeniero, Joseph Fourier, a principios del siglo XIX se encargó de recopilar información para convencer al mundo científico, de que una función periódica de periodo  $T$  puede ser representada como una suma trigonométrica de senos y cosenos del mismo periodo  $T$ , esta es la idea básica de las *series de Fourier*.

Las series de Fourier permiten representar una señal en función del tiempo, como superposición de señales más simples sinusoides de varias frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental  $1/T$ . El espectro de frecuencia es una medida de la distribución de amplitudes o de las fases de cada frecuencia. El proceso que cuantifica las diversas intensidades de cada frecuencia se conoce como análisis espectral.

A continuación se muestran formas más comunes para su representación:

- Está representada en su forma real por:

$$S_N(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^N [a_n \cos(2\pi nt/T) + b_n \sen(2\pi nt/T)]$$

- En su forma compleja por:  $S_N(t) = \sum_{n=-N}^N C_n e^{2i\pi nt/T}$

- A partir de una función armónico sinusoidal:  $S_N(t) = C_0 + \sum_{n=1}^N C_n \cos(2\pi nt/T - \phi_n)$

donde:

$$C_0 = \frac{1}{2}a_0 = c_0$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 2|c_n|$$

$$\phi_n = \tan^{-1}(b_n / a_n)$$

Las representaciones mostradas anteriormente son equivalentes, su utilización depende del tipo de aplicación. Para el caso de funciones no periódicas estas son expresadas por medio de integrales y se le conoce como la transformada de Fourier.

### 3.5 Transformada de Fourier

Las series de Fourier permiten involucrar funciones periódicas, sin embargo ahora se busca extender este análisis cuando las funciones no son periódicas para asociarles un espectro en frecuencias. Sea  $x(t)$  una señal integrable y  $F(f)$  será su transformada de Fourier, Ec.3.1.

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{j2\pi ft} df \quad ; \quad F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(s) e^{-j2\pi fs} ds \quad (\text{Ec.3.1})$$

La serie de Fourier juega un papel importante en el procesamiento de una señal, haciendo posible representar una señal de aceleración  $x(t)$ , con periodo  $T$ . La transformada de Fourier de dicha señal se representa mediante la siguiente expresión:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i2\pi ft} dt \quad (\text{Ec.3.2})$$

La transformada de Fourier es una función compleja, por lo que aplicando la identidad de Euler a la Ec.3.2 esta puede escribirse como:

$$X(f) = \int_0^T x(t) \cos(2\pi ft) dt + i \int_0^T x(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (\text{Ec.3.3})$$

Para expresar una señal  $x(t)$  en el dominio de la frecuencia, una de las formas consiste en calcular su función de densidad espectral, también conocida como espectro de potencia  $G_{XX}$ , la cual es una función que representa la distribución de potencia de la señal con respecto de la frecuencia, y se define de la siguiente manera:

$$S_{XX}(f) = X^*(f) \cdot X(f) \quad (\text{Ec.3.4})$$

donde:

$X^*(f)$ , es el conjugado de la transformada de Fourier de la señal.

$X(f)$ , es la transformada de Fourier de la señal de aceleración.

Debido a que dicha función es simétrica, la información de las frecuencias negativas y positivas de la función de densidad espectral es la misma. Esto hace que sea más conveniente realizar el análisis de un solo lado del espectro, como se expresa a continuación:

$$G_{XX}(f) = 2S_{XX}(f) \quad (\text{Ec.3.5})$$

donde la función  $G_{XX}(f)$  se define como:

$$G_{XX}(f) = \begin{cases} 2S_{XX}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{XX}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases}$$

Tomando dos registros o señales de aceleración correspondientes a dos puntos instrumentados de la estructura,  $x(t)$  y  $y(t)$ , sus transformadas de Fourier estarán representadas por:

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{Ec.3.6})$$

$$Y(f) = \int_0^T y(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (\text{Ec.3.7})$$

### 3.5.1 Transformada discreta de Fourier DFT

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

El equivalente a la transformada de Fourier para señales continuas es la transformada de Fourier discreta (DFT), la cual puede expresarse a través de las relaciones:

$$F_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi i k / n} \Delta t \quad x_i = \sum_{k=0}^{n-1} F_k e^{j2\pi i k / n} \Delta f \quad (\text{Ec.3.8})$$

La transformada de Fourier discreta, permite evaluar una representación espectral (en frecuencias) discreta de una señal discreta por medio de una ventana de tiempo finita. Este análisis es relativamente sencillo y además eficaz en aplicaciones de eliminación del ruido que contamina una señal y en otros tipos de filtrados (pasa-bajos, pasa-altos, pasa-banda, etc.), Medina, (2010).

Al multiplicar la Ec.3.8 por  $\Delta f, F_k$  entonces, representa una amplitud de densidad espectral. Esta amplitud es la forma final de lo que se conoce como transformada discreta de Fourier, DFT, de la forma:

$$F_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{-j2\pi i k / n} \quad x_i = \sum_{k=0}^{n-1} F_k e^{j2\pi i k / n} \quad (\text{Ec.3.9})$$

$$\text{Para } k = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \quad \text{para } i = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

### 3.5.2 Transformada rápida de Fourier o FFT

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo originalmente presentado por Cooley y Tukey, (1965), el cual permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y su inversa. Su aplicación permite el tratamiento digital de funciones y filtrado digital entre otras.

La implantación directa de la Ec.3.9 presentada en el apartado anterior, requiere aproximadamente  $n^2$  operaciones complejas. Sin embargo, cuando el tamaño de la secuencia es  $n = 2m$ , para  $m=1,2,3$ , entonces el cómputo de la DFT puede mejorar en aproximadamente  $n \log_2(n)$  operaciones. En procesamiento digital se conoce a este caso particular como la transformada rápida de Fourier o FFT. La señal se muestrea de tal manera que produce una cantidad específica de números binarios que representan el segmento de la función de entrada. Estos números se transforman a través de la FFT en valores complejos en el dominio de frecuencias. Cada punto de frecuencia,  $A(f)$  se calcula con el promedio de las amplitudes  $A_i$  de acuerdo con la Ec.3.10.

$$A(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2(f)} \quad (\text{Ec.3.10})$$

### 3.6 Espectro cruzado

El espectro cruzado entre dos señales  $x(t)$  y  $y(t)$ , se define como:

$$S_{xx} = X^*(f) \cdot Y(f) \quad (\text{Ec.3.11})$$

### 3.7 Espectro de potencia

El espectro de potencia de  $x(t)$  se calcula utilizando la Ec.3.12, donde  $X(f)$  es la transformada de Fourier de la señal  $x(t)$  y  $X^*(f)$  es el conjugado complejo de  $X(f)$ .

$$S(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 \quad (\text{Ec.3.12})$$

Por lo que procediendo de la misma forma que con el espectro de potencia, este se expresa como sigue:

$$G_{XY}(f) = 2S_{XY}(f) \quad (\text{Ec.3.13})$$

Una vez obtenidos los espectros de potencia de ambas señales de aceleración y sus respectivos espectros cruzados de potencia entre estas, procedemos a obtener las correlaciones entre dichas funciones, que permitirán estimar las propiedades dinámicas del sistema estructural.

Al realizar el análisis espectral, se recomienda utilizar el mayor número de registros posible, con la finalidad de contar con la señal más representativa del sistema estructural, ya que realizando un promedio de los espectros de potencia, el ruido registrado y ajeno a las propiedades del sistema tiende a eliminarse.

Para la determinación de las propiedades dinámicas de una estructura, requerimos como ya se mencionó, que la información se encuentre en el dominio de la frecuencia, y de esta forma se obtengan las frecuencias propias del sistema en estudio. Para conseguir esto se deben obtener las funciones de transferencia en amplitud, los ángulos de fase, y las funciones de coherencia entre pares de señales, por lo que a continuación se describen las expresiones que las definen.

### 3.8 Función de transferencia

Si contamos con un par de señales de aceleración, sean  $x(t)$  y  $y(t)$ , y además de estas sus correspondientes transformadas de Fourier  $X(f)$  y  $Y(f)$ , podemos obtener sus funciones de transferencia entre estas dos señales, por lo que la función de transferencia se define a continuación:

$$FT = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (\text{Ec.3.14})$$

La función de transferencia nos permite encontrar la relación de amplitudes que hay entre dos señales, esta función de transferencia también puede obtenerse por medio de los espectros de potencia de las señales y su obtención está dada por la siguiente expresión:

$$FT = \frac{|S_{YY}(f)|^{\frac{1}{2}}}{|S_{XX}(f)|^{\frac{1}{2}}} = \frac{|G_{YY}(f)|^{\frac{1}{2}}}{|G_{XX}(f)|^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Ec.3.15})$$

Las relaciones dinámicas entre las señales de entrada y salida se establecen mediante la función de transferencia  $H(f)$ , Ec.3.16, donde  $S_{XX}(f)$  es el espectro de potencia de la señal  $x(t)$  y  $S_{YY}(f)$  es el espectro de potencia de la señal de salida  $y(t)$ .

$$S_{YY}(f) = |H(f)|^2 S_{XX}(f) \quad (\text{Ec.3.16})$$

Es importante mencionar que la Ec.3.16 es teórica y normalmente en mediciones experimentales pueden existir complicaciones en el cálculo de la función  $H(f)$ , debido a señales adicionales que puedan existir en la salida del sistema en forma de ruido. Al considerar que el espectro cruzado entre  $x(t)$  y  $N(t)$ , el cual asume que no son correlacionados, al realizar promedios de eventos, este término tiende a cero, por lo tanto, es posible recuperar  $H(f)$ , aún en la presencia del ruido, mediante el uso del espectro cruzado y el espectro de potencia  $S_{XX}(f)$  de la señal de entrada. De esta forma, la función de transferencia se calcula con la Ec.3.17.

$$|H(f)|^2 = \frac{S_{XY}(f)}{S_{XX}(f)} \quad (\text{Ec.3.17})$$

### 3.9 Función de coherencia

Otro de los parámetros importantes dentro de las mediciones en un sistema es la función de coherencia, que es adimensional en el dominio de frecuencias, con valores de 0 a 1 y que en cada frecuencia, el valor de la función representa la fracción de la salida del sistema que se relaciona directamente con la entrada. En otras palabras, es una función de correlación cruzada en el

dominio de las frecuencias. De esta forma, la función de coherencia  $\gamma^2(f)$  se obtiene al aplicar la Ec.3.18.

$$\gamma^2(f) = \frac{|G_{YX}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad (\text{Ec.3.18})$$

En el cálculo de la función de transferencia se utiliza el cociente entre el espectro cruzado  $S_{XY}$  y el espectro  $S_{XX}$ . Sin embargo, existen componentes complejas en  $S_{XY}$ , por lo que a través de descomposición polar, es posible obtener también la transferencia de fase.

La función de coherencia permite estimar, el grado de linealidad entre dos señales de aceleración  $x(t)$  y  $y(t)$ , y se obtiene en función de la frecuencia. La linealidad entre dos señales se puede medir en una escala de 0 a 1.

Coherencias con valor de uno indican que la relación entre las señales de aceleración es completamente lineal. Por el contrario para coherencias menores a uno pueden indicar que las señales  $x(t)$  y  $y(t)$  no están correlacionadas entre sí, también podrían deberse a desfases introducidos por el dispositivo experimental, al ruido, a errores por falta de resolución numérica, y a efectos no lineales entre las señales. La función de coherencia está definida por:

$$\gamma^2_{XY} = \frac{|S_{YX}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} = \frac{|G_{YX}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad (\text{Ec.3.19})$$

donde:  $0 \leq \gamma^2_{XY} \leq 1$

### 3.10 Ángulo de fase

La fase es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales, aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos del ángulo, ya sea en grados o radianes. El valor realmente útil del correspondiente al ángulo de fase entre dos señales de aceleración es la diferencia de fase 0 “desfase” entre dos sitios, dos instantes o dos señales. El valor obtenido permite conocer la polaridad del movimiento entre dos puntos analizados espectralmente.

Un valor absoluto de ángulo de fase menor a  $90^\circ$  nos indica que las dos señales se encuentran en fase y por el contrario un valor absoluto del ángulo de fase mayor de  $90^\circ$  representa que las señales están “desfasadas” en su movimiento.

Para determinar el ángulo fase se retoma el espectro cruzado y de potencia entre dos señales de aceleración  $x(t)$  y  $y(t)$  los cuales fueron definidos anteriormente. Por definición el espectro de potencia es el resultado de la multiplicación de dos números complejos  $G_{XY}(f) \in \mathbb{C}$ , sin embargo, por conveniencia este puede ser expresado en forma polar, y se expresa de la siguiente manera:

$$G_{XY}(f) = |G_{XY}(f)| e^{-i\theta_{XY}(f)} \quad (\text{Ec.3.20})$$

Las relaciones  $|G_{XY}(f)|$  y  $\theta(f)$  corresponden al valor absoluto y al ángulo de fase respectivamente, los términos  $G_{XY}$  y  $Q_{XY}$  pertenecen a la parte real e imaginaria de  $Q_{XY}(f)$  respectivamente; dichas relaciones se determinan mediante las expresiones siguientes:

$$|G_{XY}(f)| = \sqrt{C_{XY}^2 + Q_{XY}^2} \quad (\text{Ec.3.21})$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} \quad (\text{Ec.3.22})$$

### 3.11 Correlación espectral entre señales

La correlación espectral entre dos señales de cada componente frecuencial, se determina recurriendo a la relación que existe entre ambas funciones del espectro cruzado y de los espectros de potencia de cada señal. Dicha correlación se obtiene a partir de las siguientes desigualdades que se cumplan para toda  $(f)$ :

$$|G_{XY}(f)|^2 \leq G_{XX}(f)G_{YY}(f) \quad (\text{Ec.3.23})$$

$$|S_{XY}(f)|^2 \leq S_{XX}(f)S_{YY}(f) \quad (\text{Ec.3.24})$$

### 3.12 Tipos de Filtros Digitales

Los filtros digitales modifican una señal discreta mediante operaciones matemáticas, estos operan mediante circuitos integrados, procesadores programables o software de una computadora. En tanto que los filtros analógicos emplean componentes físicas, tales como resistencias, condensadores, transistores, etc., Medina, (2010).

Los filtros son utilizados para aumentar la precisión de una señal registrada, mediante la exclusión de las frecuencias que se encuentran fuera de la gama de frecuencias del sistema estructural en estudio, así como también se emplean para la eliminación del ruido ambiental. Los filtros más comúnmente utilizados son los Pasa-baja y Pasa-alta, los primeros eliminan todos los componentes de frecuencias más altas, lo cual es importante ya que dos señales a diferentes frecuencias pueden producir la misma señal medida. Esto es posible si se emplea un rango de muestreo bajo para medir la señal de respuesta, debido a que una alta frecuencia puede presentarse como una frecuencia baja. Para evitar este problema se utilizan, los filtros de Pasa-baja, usando una línea de corte cercana a la frecuencia de interés. En cuanto a filtros Pasa-alta, permiten la eliminación de frecuencias demasiado pequeñas con respeto a la de interés, Brincker, (2001).

Según el teorema de Nyquist-Shannon, se recomienda que la frecuencia,  $f_s$  de muestreo sea el doble de la máxima frecuencia a muestrear, también se aconseja usar un factor de 2.5, con respecto a la frecuencia de interés. A esta frecuencia límite se le conoce como frecuencia de Nyquist, Gasquet C. *et al.* (1999).

### 3.13 Muestreo

El muestreo es un proceso que consiste en tomar muestras periódicas de los valores de una señal continua analógica a intervalos regulares de tiempo, además esta operación permite la conversión de una señal analógica a digital. La frecuencia a la cual se registran los valores se conoce como frecuencia de muestreo,  $f_s$ .

Los otros procesos matemáticos, son la cuantificación que consiste en la asignación de un margen de valor a un único nivel de salida y la codificación que permite la conversión de los valores medidos a un código, que generalmente es el binario. Dicha codificación no es reversible ya que

origina una pérdida de información, esta se traduce en un error comúnmente llamado ruido. Durante el proceso de muestreo la señal todavía es analógica y puede asumir cualquier valor y mediante la cuantificación la señal se convierte a digital asumiendo valores finitos, por medio de esta conversión a digital, se facilita su procesamiento, compresión, etc., dando a la señal resultante mayor inmunidad al ruido y a otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas, Medina, (2010).

### 3.14 Interpretación de señales para determinar las propiedades dinámicas

La principal utilidad de los conceptos anteriormente descritos dentro de un contexto de análisis estructural, radica en la estimación de las frecuencias naturales de vibración y modos de vibración correspondientes a los sistemas analizados, para traducirlos en resultados ingenieriles, Allen y Mills, (2004). A continuación se describen los pasos de la metodología aplicada en este proyecto de investigación para determinar los parámetros dinámicos de la estructura en estudio:

1. De los espectros de Fourier o de potencia obtenidos de las señales, se determinan las frecuencias en las cuales se generan los picos más grandes. Normalmente la estimación de las frecuencias se realiza calculando espectros promedio, a partir de segmentos de señales de igual longitud y filtrando cada uno de estos mediante el uso de ventanas tipo Hanning. Estos espectros muestran la señal en el dominio de la frecuencia, así como, estimaciones preliminares de las frecuencias naturales de vibración. Es de interés mencionar que las amplitudes más importantes del espectro no necesariamente corresponden a las frecuencias propias de un sistema estructural estudiado, ya que algunos máximos corresponden a frecuencias de las fuentes de excitación o al ruido. En la mayoría de los casos, el contar con una estimación basada en resultados de estudios previos, analíticos o experimentales, permite identificar el rango de frecuencias que deben estudiarse en los espectros.
2. En ocasiones, no basta con analizar las amplitudes del espectro de potencia para el cálculo de las frecuencias de resonancia del sistema, por lo que es conveniente calcular las transformadas de Fourier de las funciones de correlación entre dos señales registradas en un mismo experimento o medición. También a estas transformadas se les obtiene su módulo y se eleva al cuadrado y los resultados se dibujan en función de la frecuencia. En estas gráficas se detectan los valores de frecuencia en que ocurren los picos o valores máximos. Aquellos picos

que coincidan con los detectados en el inciso anterior se podrán considerar como los asociados a las frecuencias naturales de vibración.

3. Se obtiene el ángulo de fase entre las señales utilizadas y se dibujan en función de la frecuencia. Para aquellos valores detectados como frecuencias naturales de vibración se obtiene la magnitud del ángulo de fase y de acuerdo con ello se define el modo dominante de vibración (lateral, vertical, torsional, etc.), asociado a la frecuencia pico.
4. Se dibujan las funciones de coherencia entre las señales analizadas con el objeto de estimar la magnitud de los posibles ruidos registrados durante el proceso de medición de las señales. La función de coherencia es útil para determinar la validez de la fase asociada a una frecuencia y por lo tanto, es posible corroborar que estas frecuencias corresponden a las del sistema. La coherencia mostrará valores pequeños para aquellas frecuencias que contienen una presencia importante de ruido.
5. Una vez conocidas las frecuencias de interés, se procede a calcular la forma relativa de los modos.

### 3.15 Determinación de los periodos naturales

El tiempo requerido para completar un ciclo de vibración libre en una estructura, es lo que se conoce como periodo natural o fundamental de vibración, y es una propiedad única de cada estructura, que depende de la masa y la rigidez de la estructura, Chopra, (1995). Dicha propiedad es afectada por factores tales como la regularidad de la estructura, el número de pisos y claros, las dimensiones de las secciones, el nivel de carga, etc. Su valor varía desde 0.1 s, para sistemas simples, hasta varios segundos para sistemas de varios niveles. Su obtención puede determinarse mediante el análisis de señales registradas, y su identificación generalmente dependerá de la configuración estructural y de las acciones prevalecientes durante la medición.

La determinación de los periodos naturales de vibración de las estructuras en estudio, se consiguió mediante el análisis de los registros de vibración ambiental y a continuación se describe el procedimiento para su obtención:

1. Las señales de aceleración-tiempo registradas en los puntos medidos en la estructura mediante el uso de sensores (acelerómetros), se obtienen en un formato propio de los equipos, por ejemplo con la extensión, (.GSR), Allview, (1995). Posterior a su obtención es necesario convertirlas a un formato en código (ASCII), para realizar esta conversión de formatos existen varios programas de cómputo, tanto de uso comercial, como para fines de investigación, por mencionar algunos se encuentra el “Geodas”, “Espectralab”, “Matlab”, “Labview”, “Degtra”, este último creado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ordaz y Montoya, (2005).
2. Después las señales de aceleraciones-tiempo obtenidas en código (ASCII), deben ser corregidas y filtradas a través de programas de cómputo, como los mencionados anteriormente, los cuales son utilizados entre otras cosas para filtrar las señales y dejar pasar el ancho de banda de interés, así como para eliminar o descartar las frecuencias altas y bajas, que se encuentren fuera del rango en estudio.
3. Posteriormente de las aceleraciones filtradas y corregidas se generan los espectros de Fourier, de potencia y cruzados, para finalmente realizar la correlación entre pares de señales, obteniendo para esto sus respectivas funciones de coherencia y ángulos de fase.

### 3.16 Determinación de las formas modales

Para la determinación de las formas modales puede aplicarse el procedimiento basado en las técnicas del análisis de Fourier, el cual fue descrito anteriormente y mediante la correlación de señales de aceleración para cada uno de los puntos ensayados, se obtiene la forma modal del primer modo transversal y longitudinal respectivamente.

Para su obtención también puede seguirse el método que a continuación se describe, Ruiz *et al.*, (1997):

- a) Realizado el proceso de filtrado y corrección de las señales de aceleración en el dominio del tiempo y de la frecuencia, se determina el periodo natural de vibración correspondiente a la dirección y forma modal de interés, obtenidos de sus respectivos espectros de Fourier. Los registros de aceleración (acelerogramas) se filtran mediante algún filtro tipo (pasa-baja, pasa-altas, etc.), y seguidamente se calculan los desplazamientos en el dominio del tiempo

haciendo uso de la integración, con la finalidad de obtener a partir de las aceleraciones ensayadas, las correspondientes historias de velocidad y de desplazamientos, como función del tiempo, es decir  $[a(t), v(t), d(t) - t]$ , Ordaz y Montoya, (2009).

- b) Después se realiza el cociente de los desplazamientos obtenidos entre cada nivel de la estructura, por conveniencia se aconseja utilizar un punto fijo de la estructura como referencia, para cada uno de los eventos registrados, por ejemplo la base del sistema. Sin embargo también es común que se elija como referencia el punto más alto de la estructura, debido a que en esa ubicación es en donde se presentan los mayores desplazamientos asociados al primer modo longitudinal y transversal ya que se obtienen cocientes menores a la unidad entre cada uno de los niveles, de esta manera las formas modales quedarán normalizadas en cada etapa, esto permite comparar el cambio de forma, aunque no la magnitud del desplazamiento, Bendat y Piersol, (1980).
- c) Una vez obtenidos los cocientes de los desplazamientos, para cada uno de los puntos registrados se procede a graficarlos, con la finalidad de encontrar el cociente que surja el mayor número de veces entre dos niveles y asociado a la mayor cantidad de datos asociados.
- d) Posteriormente para cada evento se calcula el valor promedio del máximo pico entre cocientes representados en las gráficas anteriores para cada nivel. Finalmente se obtienen las formas modales, las cuales se construyen a partir de los valores promedio encontrados.

### 3.17 Determinación del amortiguamiento

El cálculo de la fracción de amortiguamiento crítico de un sistema estructural, puede ser determinado a partir de mediciones experimentales, y utilizando diferentes teorías, a continuación se describen dos de las más utilizadas:

1. El método de ancho de banda consiste a grandes rasgos, en utilizar los espectros cruzados entre dos registros y de diferentes niveles, correlacionando dos series de registros de aceleración en función de la frecuencia, este método es válido siempre y cuando el amortiguamiento sea menor o igual al 5%, Bendat y Piersol, (1980).

2. El método de Kawasumi y Shima, (1965), está basado en las amplitudes de un espectro de potencia definidos en forma clara, con buena resolución y suponiendo condiciones de ruido blanco. En la fig. 3.1 se muestran las expresiones para su aplicación, en donde los valores de frecuencia  $\omega_1$  y  $\omega_2$  se obtienen al trazar una línea horizontal a una altura de  $Y_{max} / \lambda$ , siendo común utilizar un valor de 2 para la constante  $\lambda$ .

La descripción del método es la siguiente:

- a) Se elige arbitrariamente un valor  $\lambda$  (comúnmente se elige  $\lambda = 2$ ).
- b) Localizamos el máximo del espectro de potencia.
- c) Dividimos el máximo valor entre  $\lambda$ , y procedemos a identificar las frecuencias asociadas a ese valor en el espectro de potencia, por lo que se obtendrían  $\omega_1$  y  $\omega_2$ .
- d) Calculamos el parámetro  $A$  (es la amplitud de la respuesta), mediante la expresión mostrada en la fig. 3.3.

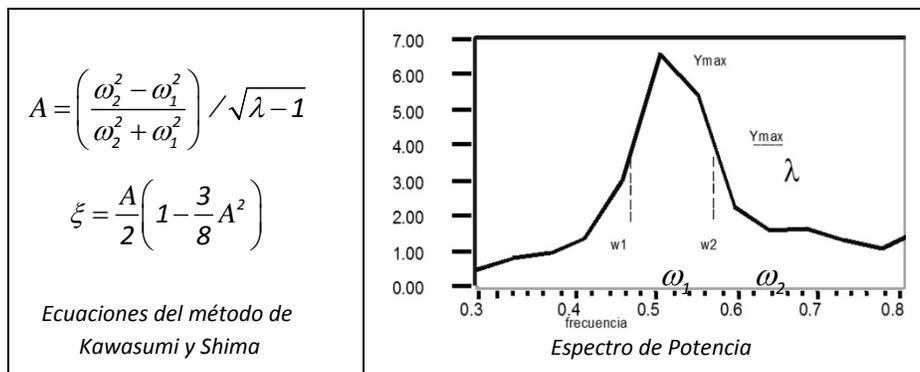


Fig. 3.3. Obtención de la fracción del amortiguamiento crítico, método de Kawasumi y Shima, (1965).

Es de interés mencionar que en este trabajo de investigación, la determinación de la fracción del amortiguamiento crítico de las estructuras en estudio, se realizará utilizando el método de Kawasumi y Shima, (1965) descrito anteriormente, su elección se debe a que su aplicación es factible para el tipo de pruebas experimentales que se realizarán en este estudio.

# CAPÍTULO 4

---

## *Ejemplo de aplicación*

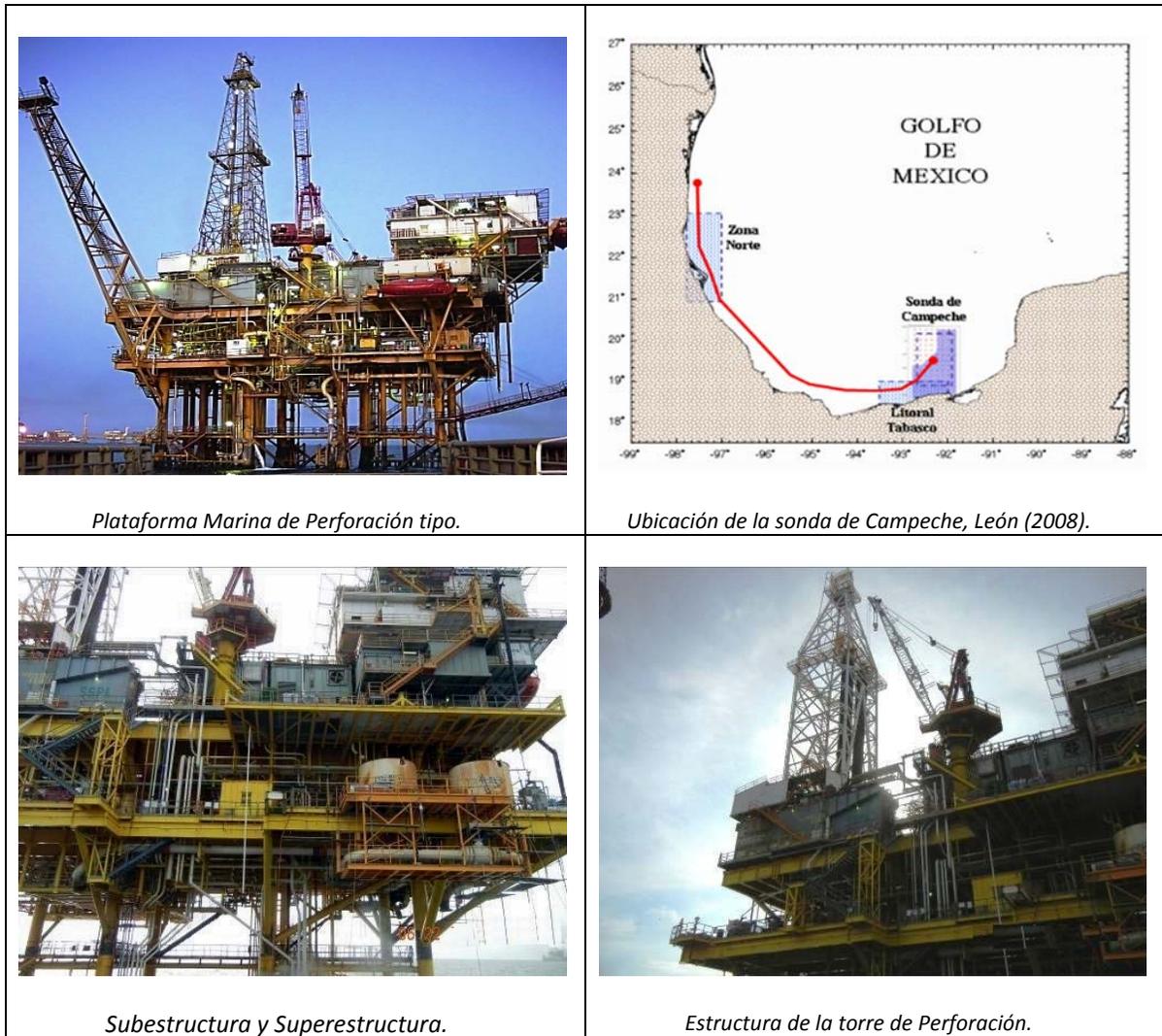
---

### **4.1 Descripción de la estructura en estudio**

Se tiene una Plataforma marina de perforación localizada en la sonda de Campeche, la cual presenta desplazamientos laterales superiores a lo normal, que producen oscilaciones visibles en la lingada o tubería de perforación de la mesa de la rotaria. La amplitud de estos movimientos ha originado afectaciones en las actividades de perforación, fig.4.1.

Como ya se mencionó la estructura en estudio, enfrenta un deficiente funcionamiento y, ocasionalmente, la suspensión de temporal de la operación de los equipos de perforación por causas desconocidas. Las hipótesis que se tienen sobre este mal funcionamiento son varias, una de ellas es la aparente vibración excesiva que se genera en la cubierta del segundo nivel y en la torre de perforación en donde se ubica el sistema de tuberías de perforación.

Con base en lo anterior, se propone realizar mediciones de vibración ambiental con la finalidad de evaluar la magnitud de las vibraciones en sitio y, mediante el análisis de las señales registradas y de los resultados obtenidos, proporcionar elementos técnicos para determinar el comportamiento dinámico de la cubierta y de la torre de perforación, mediante la calibración de los modelos analíticos de computadora. Finalmente se pretende plantear los escenarios de operación futuros que podrían incluir el reforzamiento del sistema plataforma/torre/tubería de perforación.



*Fig. 4.1. Plataforma Marina de Perforación tipo.*

#### 4.2 Metodología propuesta para la solución del problema

A continuación se describe la metodología propuesta para la solución del problema presentado en este trabajo de investigación:

1. Revisión de la información técnica existente de la estructura de la plataforma y de sus componentes, así como de la estructura de la torre de perforación (planos estructurales, fotografías, videos, estudios previos, etc.).
2. Previamente a la campaña de mediciones, se realizará una inspección en situ para verificar el sistema estructural de la superestructura y subestructura, con la finalidad de identificar las

- características preliminares de vibración de la plataforma marina de perforación y de sus componentes. Esta actividad preliminar permitirá revisar las condiciones operativas de la plataforma e identificar las posibles fuentes de vibración, así como la preparación y calibración de los equipos de medición a utilizarse.
3. Se realizarán mediciones preliminares de vibraciones en diferentes puntos de la estructura, la torre de perforación y la subestructura para que, con base en los resultados del análisis de esas señales registradas, se diseñen los arreglos más adecuados de instrumentos de medición, los cuales serán colocados en puntos que permitan identificar con mayor precisión el comportamiento prevaleciente y las propiedades dinámicas de la estructura. Esta actividad se plantea realizar mediante la colocación estratégica en las cubiertas de la plataforma y en sus componentes, 2 equipos de medición con acelerómetros en tres direcciones, funcionando independientes y de manera síncrona. Los resultados de estas mediciones preliminares, servirán de base para planear las campañas de mediciones que permita identificar con mayor precisión el comportamiento dinámico de la estructura de la plataforma marina y de su torre de perforación, producto de las fuerzas actuantes en condiciones normales y de servicio.
  4. Planeación y ejecución de las campañas de mediciones a realizar, posteriormente se realizará el procesamiento, análisis e interpretación de las señales registradas durante las campañas de medición, y finalmente traducirlas en resultados ingenieriles que permitan caracterizar dinámicamente a las estructuras en estudio, en función de sus propiedades dinámicas, con la finalidad de reproducir los modelos estructurales representativos de la estructura existente.
  5. El procesamiento de las señales se realizará mediante técnicas basadas en análisis de Fourier, para determinar las propiedades dinámicas y las características actuales de operación de la estructura en cuestión.
  6. Se calculará la magnitud de los desplazamientos en los distintos niveles o cubiertas de la plataforma, así como en la torre de perforación, los desplazamientos obtenidos se compararán con los aceptados por las normativas vigentes, y se verificará si estos son anómalos para el buen funcionamiento de los equipos de perforación.
  7. Finalmente se expondrán los resultados obtenidos y se realizaran los comentarios pertinentes sobre el funcionamiento actual de la estructura.

### 4.3 Descripción de los instrumentos de medición utilizados

El registro de las señales de vibración de la estructura en estudio, se realizó con 6 acelerómetros digitales GSR, Terra Technology, su rango de medición de aceleración máxima es de 0.25 a 2 veces de la gravedad. Estos equipos de medición no solo permiten el registro de movimientos de alta intensidad como el caso de sismos, sino también el registro de vibraciones de pequeñas amplitudes producto de excitaciones ambientales. Los equipos de adquisición se distribuyeron de acuerdo a los 5 arreglos instrumentales realizados.

Cada equipo registra señales de vibración en 3 direcciones ortogonales (2 horizontales y una vertical), las cuales serán almacenadas inicialmente en la memoria de estado sólido del instrumento para su posterior extracción y recolección en un equipo de cómputo, para finalmente realizar su análisis y procesamiento en gabinete.

En la tabla 4.1, se muestra la identificación de los instrumentos de medición empleados, así como el número de sensores de cada equipo, así como su sensibilidad.

*Tabla 4.1. Identificación de los Equipos de medición.*

No. de Estación	Nombre del equipo	Tipo de sensor [2D-Bidimensional ] [3D-Tridimensional]	Sensibilidad
1	E1	3D	12 bits
2	E2	3D	16 bits
3	E3	2D	12 bits
4	E4	3D	12 bits
5	E5	2D	12 bits
6	E6	3D	16 bits

En la tabla 4.2 se presentan las imágenes correspondientes a cada uno de los equipos de medición utilizados y en la tabla 4.3 se describen sus características técnicas.

Tabla 4.2. Equipos de Medición utilizados (Acelerómetros).

 <p>Equipo E1</p>	 <p>Equipo E2</p>
 <p>Equipo E3</p>	 <p>Equipo E4</p>
 <p>Equipo E5</p>	 <p>Equipo E6</p>

Tabla 4.3. Características técnicas de los instrumentos de medición utilizados.

<p style="text-align: center;"><b>Estación No. 1.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: GSR-12 F/B S/N 318</li> <li>• PART # 80-445058-42</li> <li>• Nombre del Equipo: E1</li> <li>• 3 canales de registro ( Sensor triaxial interno )</li> <li>• Sensibilidad: 12 Bits</li> <li>• Tipo de montaje: vertical</li> <li>• Memoria RAM: 4.0 MB</li> <li>• Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g</li> <li>• Umbral de disparo: por software</li> <li>• Tiempo de pre-evento: 25 seg.</li> <li>• Tiempo de post-evento: 20 seg.</li> <li>• Muestras por segundo: 100 mps.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Estación No. 2.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: GSR-16 F/B S/N 319</li> <li>• PART # 80-445058-44</li> <li>• Nombre del Equipo: E2.</li> <li>• 3 canales de registro ( Sensor triaxial interno )</li> <li>• Sensibilidad: 16 bits</li> <li>• Tipo de montaje: vertical</li> <li>• Memoria RAM: 4.0 MB</li> <li>• Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 2.00 g</li> <li>• Umbral de disparo: por software</li> <li>• Tiempo de pre-evento: 25 seg.</li> <li>• Tiempo de post-evento: 20 seg.</li> <li>• Muestras por segundo: 100 mps.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Estación No. 3.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: GSR-12 F/B S/N 316</li> <li>• PART # 80-445058-43</li> <li>• Nombre del Equipo: E3.</li> <li>• 2 canales de registro ( Sensor biaxial interno )</li> <li>• Sensibilidad: 12 bits</li> <li>• Tipo de montaje: vertical</li> <li>• Memoria RAM: 4.0 MB</li> <li>• Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g</li> <li>• Umbral de disparo: por software</li> <li>• Tiempo de pre-evento: 25 seg.</li> <li>• Tiempo de post-evento: 20 seg.</li> <li>• Muestras por segundo: 100 mps.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Estación No. 4.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: GSR-12 F/B S/N 320</li> <li>• PART # 80-445058-41</li> <li>• Nombre del Equipo: E4.</li> <li>• 3 canales de registro ( Sensor triaxial interno )</li> <li>• Sensibilidad: 12 bits</li> <li>• Tipo de montaje: vertical</li> <li>• Memoria RAM: 4.0 MB</li> <li>• Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 0.50 g</li> <li>• Umbral de disparo: por software</li> <li>• Tiempo de pre-evento: 25 seg.</li> <li>• Tiempo de post-evento: 20 seg.</li> <li>• Muestras por segundo: 100 mps.</li> </ul>
<p style="text-align: center;"><b>Estación No. 5.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: GSR-12 F/B S/N 317</li> <li>• PART # 80-445058-43</li> <li>• Nombre del Equipo: E5.</li> <li>• 2 canales de registro ( Sensor biaxial interno )</li> <li>• Sensibilidad: 12 bits</li> <li>• Tipo de montaje: vertical</li> <li>• Memoria RAM: 4.0 MB</li> <li>• Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g</li> <li>• Umbral de disparo: por software</li> <li>• Tiempo de pre-evento: 25 seg.</li> <li>• Tiempo de post-evento: 20 seg.</li> <li>• Muestras por segundo: 100 mps.</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Estación No. 6.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: GSR-16 F/B S/N 322</li> <li>• PART # 80-445058-45</li> <li>• Nombre del Equipo: E6.</li> <li>• 3 canales de registro ( Sensor triaxial interno )</li> <li>• Sensibilidad: 16 bits</li> <li>• Tipo de montaje: Horizontal</li> <li>• Memoria RAM: 4.0 MB</li> <li>• Nivel máximo de aceleración que puede registrarse: 1.00 g</li> <li>• Umbral de disparo: por software</li> <li>• Tiempo de pre-evento: 30 seg.</li> <li>• Tiempo de post-evento: 20 seg.</li> <li>• Muestras por segundo: 100 mps.</li> </ul>

#### 4.4 Arreglos instrumentales para la medición de señales

Se realizó un programa de mediciones, el cual se dividió en dos etapas y su descripción detallada se presenta más adelante. Los instrumentos de medición se ubicaron de forma estratégica en la plataforma y en sus componentes estructurales, colocando hasta 6 aparatos de registro con acelerómetros en tres direcciones, funcionando independientes y de manera síncrona. Es de interés mencionar que se requiere contar con señales síncronas, ya que es de vital importancia para identificar correctamente las frecuencias propias del sistema y de las otras características dinámicas de relevancia para la definición de los modelos de análisis.

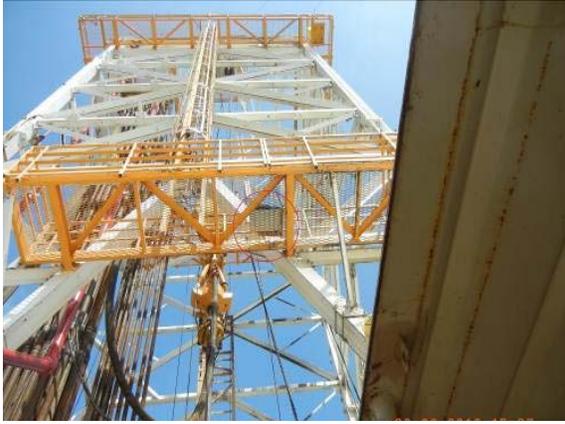
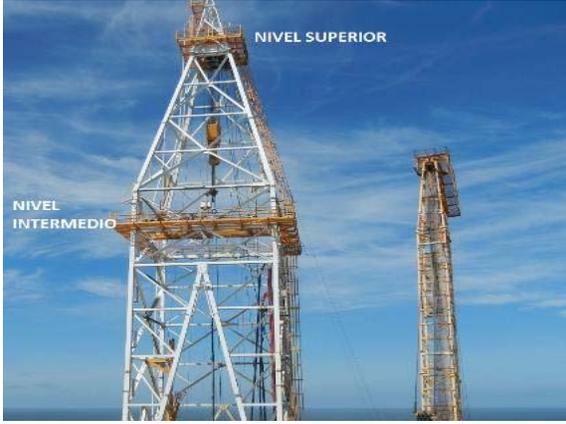
A continuación se describen las zonas en donde se realizaron los arreglos mencionados anteriormente:

- Cubierta inferior, con elevación 15.850 m, a la que en lo sucesivo nos referiremos como cubierta No.1.
- Cubierta superior, con elevación 24.689 m, a la que en lo sucesivo nos referiremos como cubierta No.2.
- Subestructura, con elevación 6.669 m, a la que en lo sucesivo nos referiremos como Pasillos de acceso al embarcadero.
- Base de la mesa rotatoria en la torre de perforación, así como en el nivel intermedio y superior de la misma (Estructura de la torre de perforación).

En seguida se presenta la descripción de las dos etapas que conforman el programa de mediciones, para lo cual se definió un total siete arreglos instrumentales:

- La primera etapa del programa de mediciones, está conformado por cinco arreglos de instrumentación, efectuados en la superestructura y subestructura de la plataforma marina, las ubicaciones instrumentadas en estos arreglos se pueden observar en las figuras de la tabla 4.4.
- En la segunda etapa, con la finalidad de conocer más a fondo el comportamiento dinámico de la estructura de la torre de perforación y dadas las características de la torre de perforación, el programa de mediciones estuvo conformado por 2 arreglos de instrumentales, los cuales consideraron la selección de puntos de medición en la cubierta superior de la plataforma, en la base de la torre y en diferentes elevaciones de la misma, identificadas como “nivel intermedio” y “nivel superior”, tabla. 4.4.

Tabla. 4.4. Identificación de las diferentes zonas instrumentadas en los siete arreglos instrumentales.

 <p><b>Subestructura y Superestructura de la plataforma.</b></p>	 <p><b>Subestructura: Zona de pasillos de acceso al embarcadero</b></p>
 <p><b>Nivel inferior de la Torre de Perforación.</b></p>	 <p><b>Niveles intermedio y superior de la Torre de perforación.</b></p>
 <p><b>Base de la torre de perforación.</b></p>	 <p><b>Base de la mesa rotatoria, Lingada o tubería de perforación, ( Torre de perforación)</b></p>

En la primera etapa del programa de mediciones, los arreglos Instrumentados son los siguientes:

Arreglo No.1: Corresponde a la distribución vertical de los equipos o sensores de medición, instalados sobre la superestructura y subestructura.

- 2 Equipos ubicados en la cubierta con elevación 15.850 m (cubierta No.1 o Inferior).
- 2 Equipos ubicados en la cubierta con elevación 24.689 m (cubierta No.2 o Superior).
- 2 Equipos ubicados en la subestructura con elevación 6.669 m (zona de pasillos de acceso al embarcadero).

Arreglo No.2: Corresponde a la distribución en planta de los equipos o sensores de medición, instalados sobre la cubierta No.1 (elevación 15.850 m).

- 4 Equipos ubicados en las columnas A1, B1, A4 y B4.
- 1 Equipo ubicado sobre el voladizo localizado entre los ejes 1 y 2.
- 1 Equipo ubicado al centro de la planta de la cubierta No.1.

Arreglo No.3: Corresponde a la distribución en planta de los equipos o sensores de medición, instalados sobre la cubierta No.2 (elevación 24.689 m).

- 4 Equipos ubicados en las columnas A1, B1, A4 y B4.
- 1 Equipo ubicado al centro de la planta de la cubierta No.2.

Arreglo No.4: Corresponde a la distribución vertical de los equipos o sensores de medición, instalados sobre la torre de perforación.

- 2 Equipos ubicados sobre la cubierta del piso de perforación (base de torre de perforación).
- 1 Equipo ubicado sobre el primer nivel de pasillos de la torre.

Arreglo No.5: Corresponde a la distribución en planta de los equipos o sensores de medición, instalados sobre la subestructura o zona de pasillos de acceso al embarcadero, (elevación 6.669 m).

- 4 Equipos ubicados en las columnas A2, B2, A3 y B4.
- 1 Equipo ubicado en el centro, entre los ejes A-B y 2-3.

En la segunda etapa del programa de mediciones, los arreglos Instrumentales se realizaron de la siguiente manera:

Arreglo No.6: Corresponde a la distribución vertical de los equipos o sensores de medición, instalados sobre la Torre de perforación y la superestructura (elevación 24.689 m).

- 1 Equipo (E1) sobre la cubierta superior de la plataforma con elevación 24.689 m.
- 2 Equipos a nivel de la mesa de la rotatoria de la torre de perforación (E2 y E3).
- 2 Equipos en el nivel intermedio de la torre (E4 y E5).
- 1 Equipo en el nivel superior de la torre (E6).

Arreglo No.7: Corresponde a la distribución vertical de los equipos o sensores de medición, instalados sobre los primeros niveles de la Torre de perforación.

- 2 Equipos a nivel de la mesa de la rotatoria de la torre de perforación (E1 y E2).
- 4 Equipos en el nivel intermedio de la torre (E3, E4, E5 y E6).

En las siguientes figs. 4.2 a 4.8, se muestra la distribución de los equipos, para los primeros cinco arreglos de medición mencionados anteriormente y que corresponden a la primera etapa de las campañas de mediciones, además se muestra la ubicación de los equipos, también se presenta su orientación en el plano horizontal de sus ejes de medición. Para este caso, las direcciones horizontales de medición (2) y (3) corresponden, respectivamente, a la dirección longitudinal y transversal de la plataforma, vista en planta.

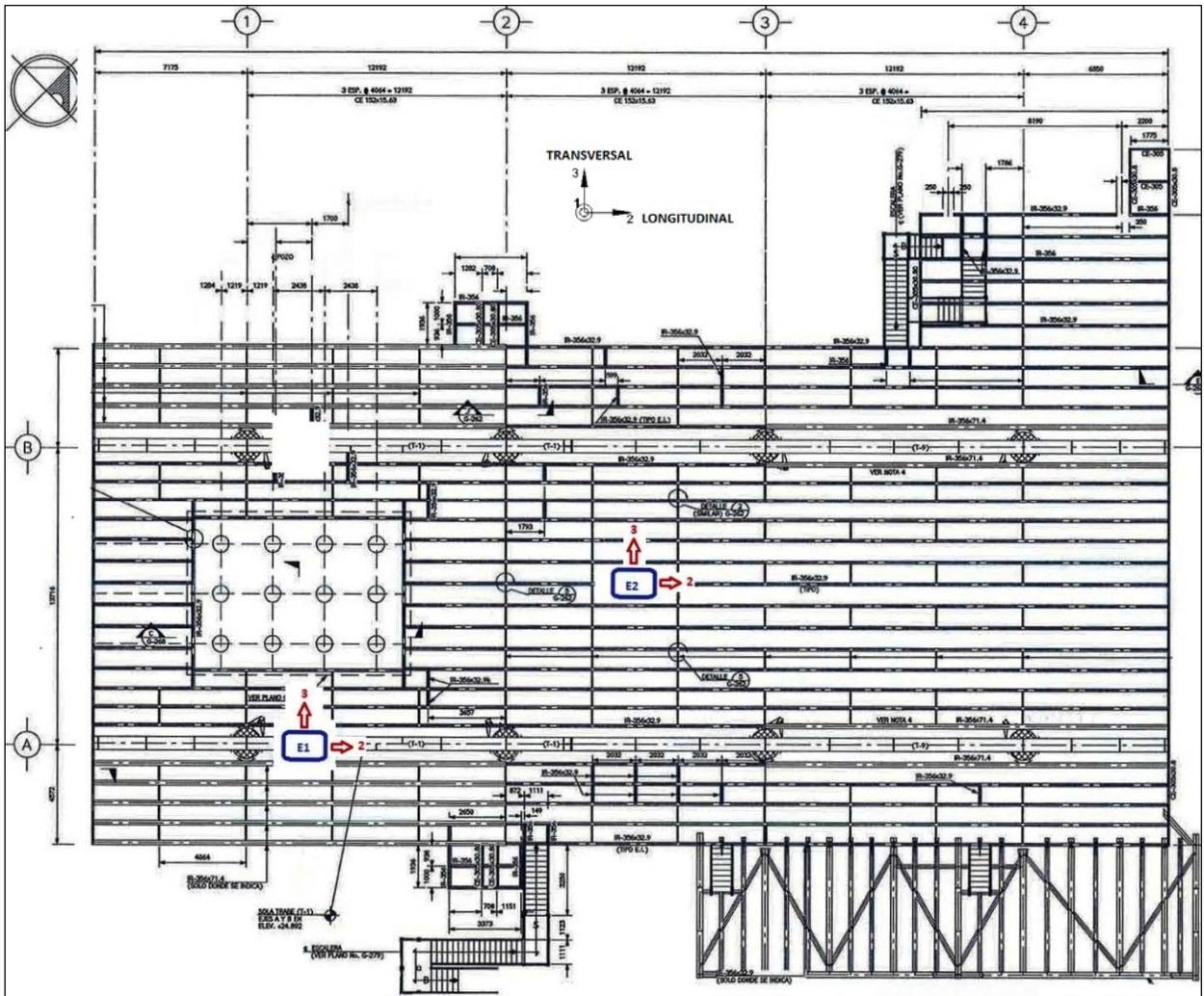


Fig. 4.2. Distribución en planta de los equipos de medición sobre la cubierta No.2, del Arreglo No.1.

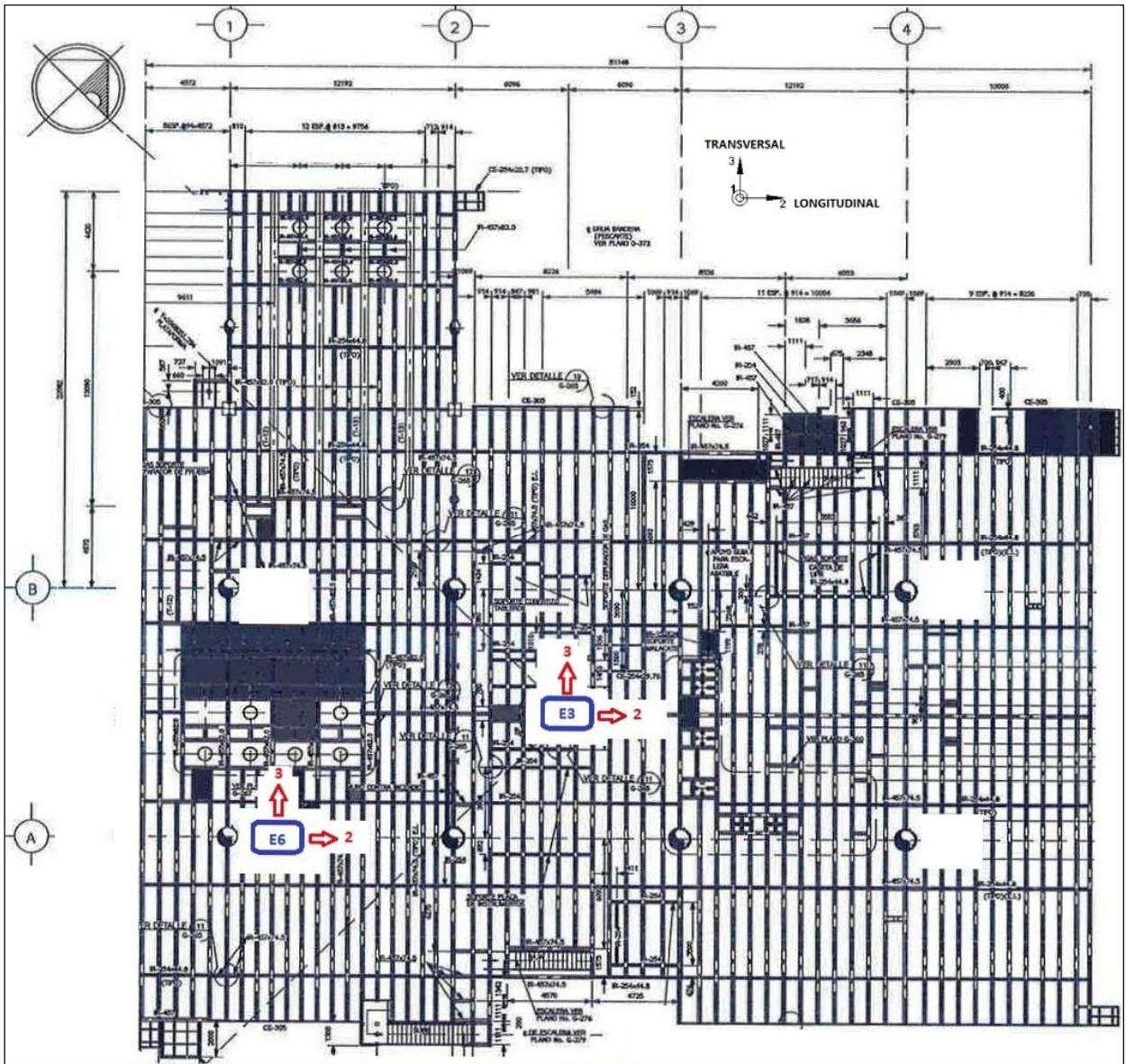


Fig. 4.3. Distribución en planta de los equipos de medición sobre la cubierta No.1, del Arreglo No.1.



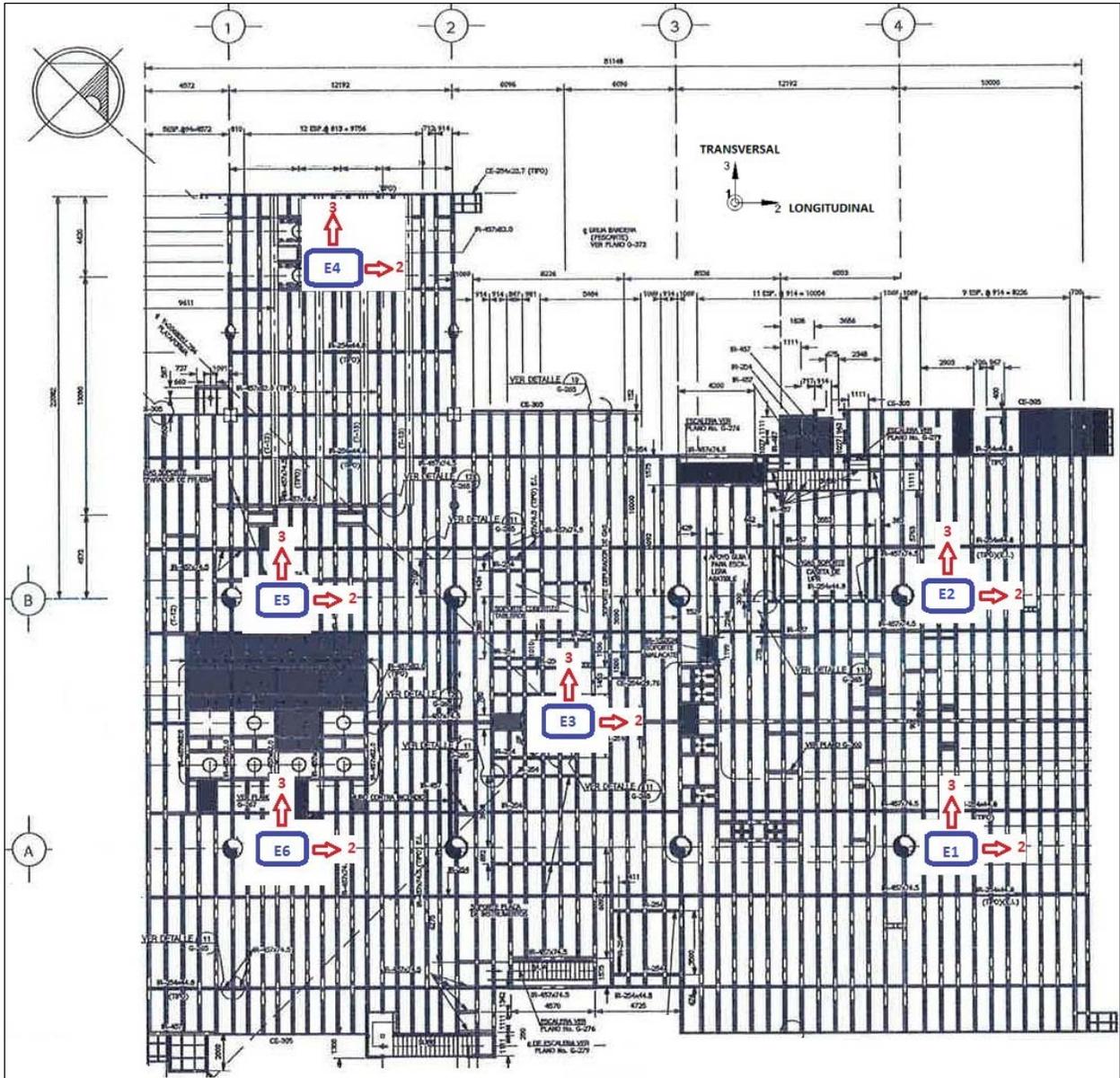


Fig. 4.5. Distribución en planta de los equipos de medición sobre la cubierta No.1 (inferior), del Arreglo No.2.

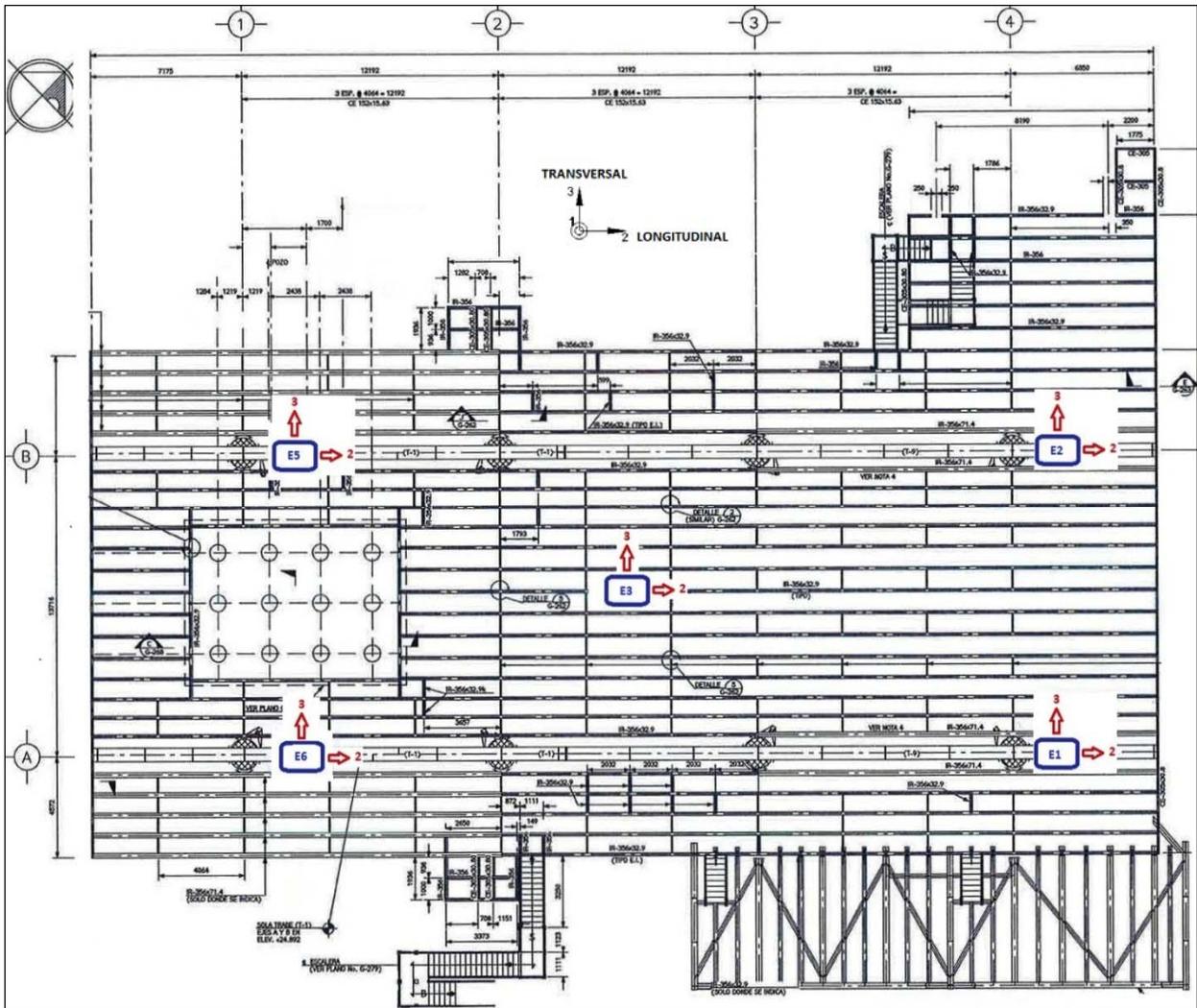


Fig. 4.6. Distribución en planta de los equipos de medición sobre la cubierta No.2 (superior), del Arreglo No.3.

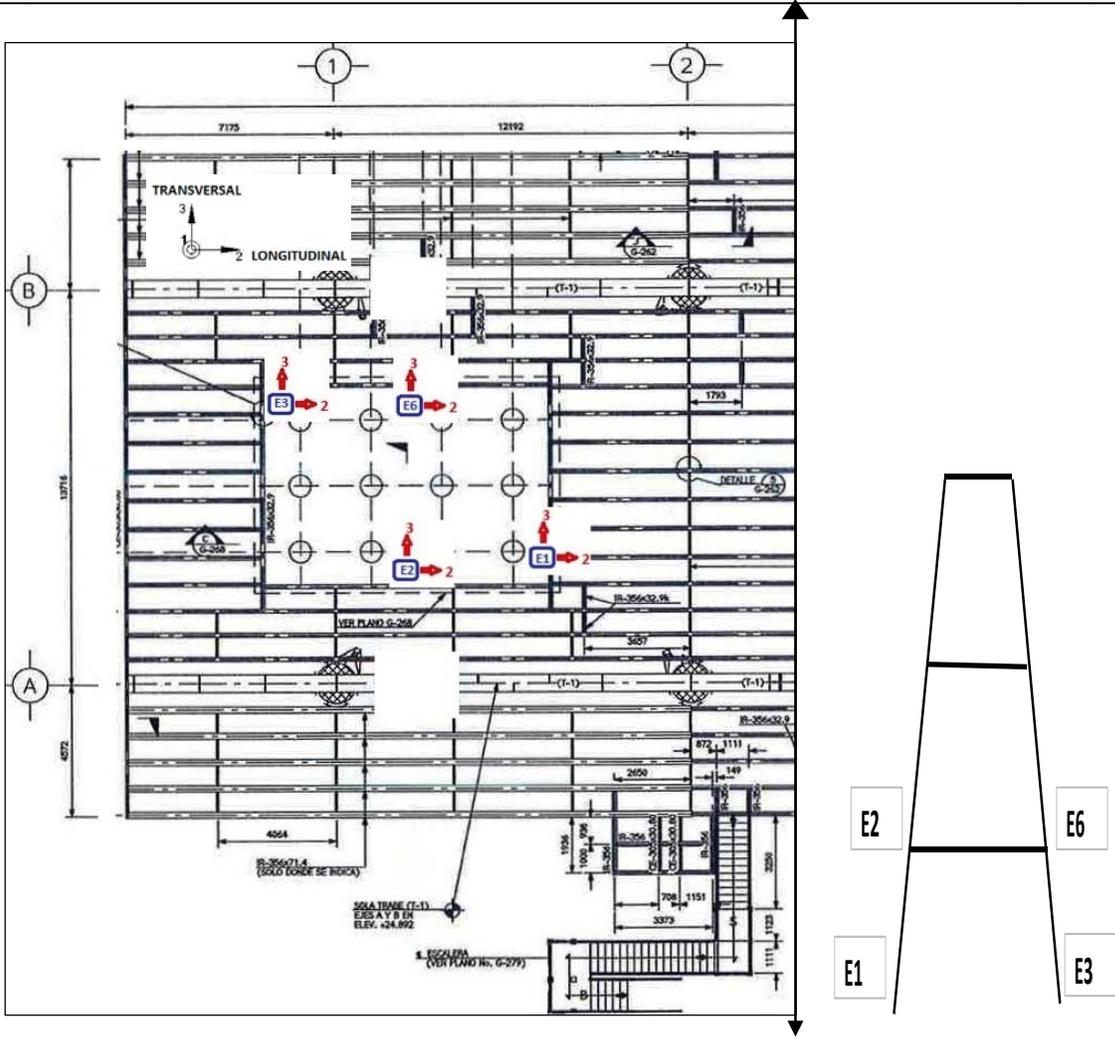


Fig. 4.7. Croquis de la vista en planta y elevación de la localización de los equipos en la estructura de la torre de perforación, del Arreglo No.4.

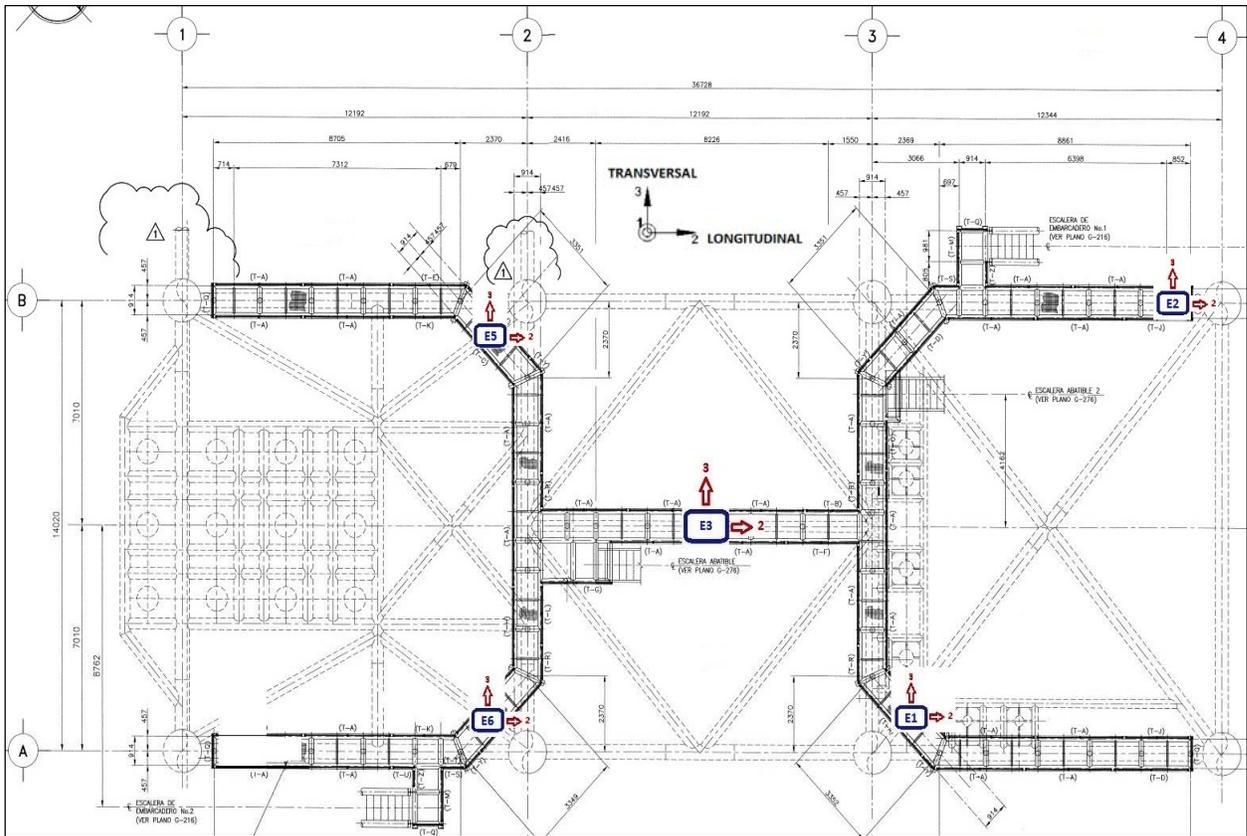


Fig. 4.8. Distribución en planta de los equipos de medición sobre la subestructura o zona de acceso al embarcadero, del Arreglo No.5.

A continuación en las figs. 4.9 a 4.14, se muestra la distribución en planta de los equipos instalados en los arreglos No. 6 y No.7, los cuales corresponden a la segunda etapa del programa de mediciones descrita anteriormente. En dichas figuras se presentan los instrumentos de medición ubicados sobre la torre de perforación, también se muestra su orientación en el plano horizontal de sus ejes de medición, dirección longitudinal (2) y transversal (3), tomando como referencia la vista en planta de la plataforma.

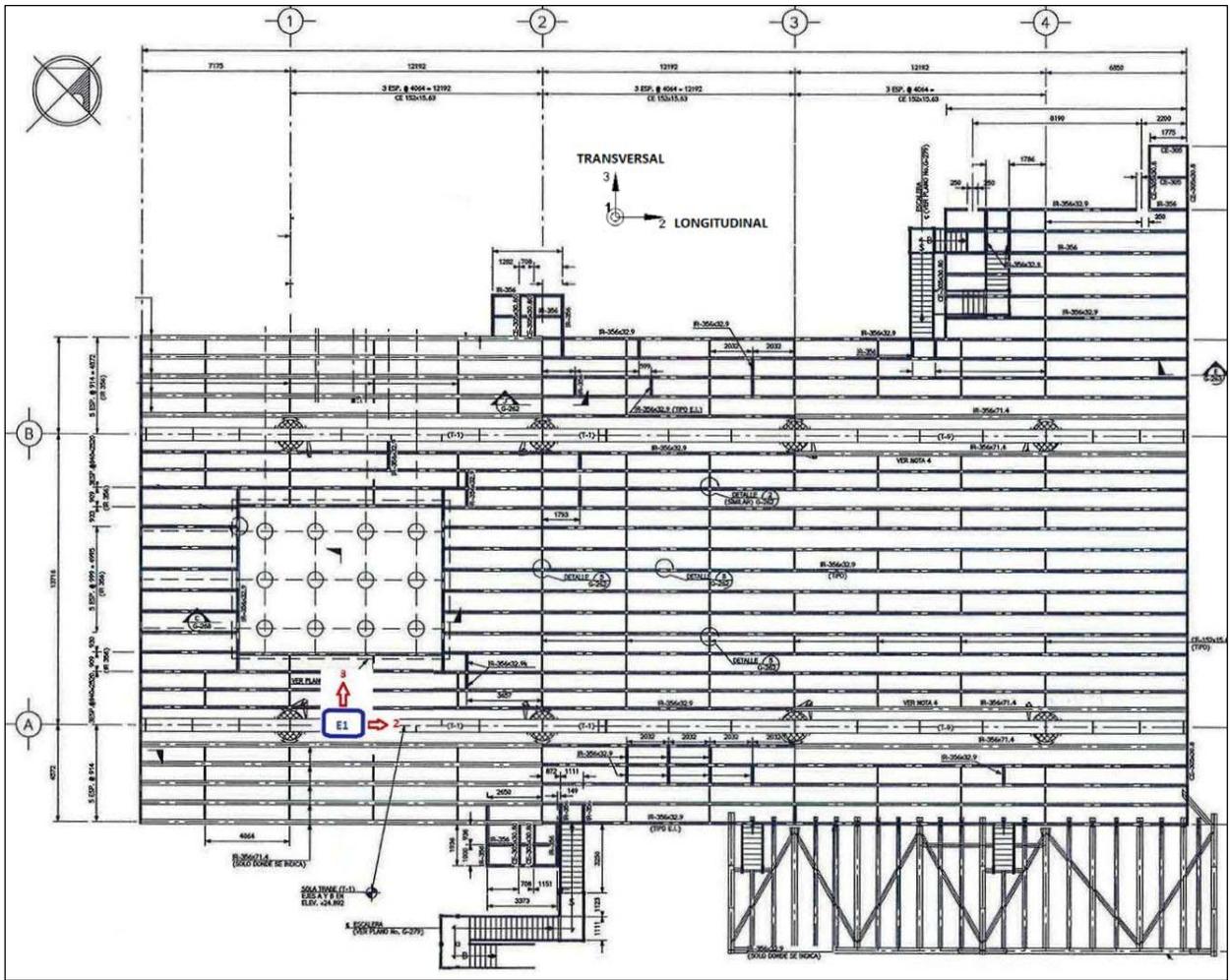


Fig. 4.9. Distribución en planta del equipo E1 ubicado en la cubierta No.2 (superior) de la plataforma, del Arreglo No.6.

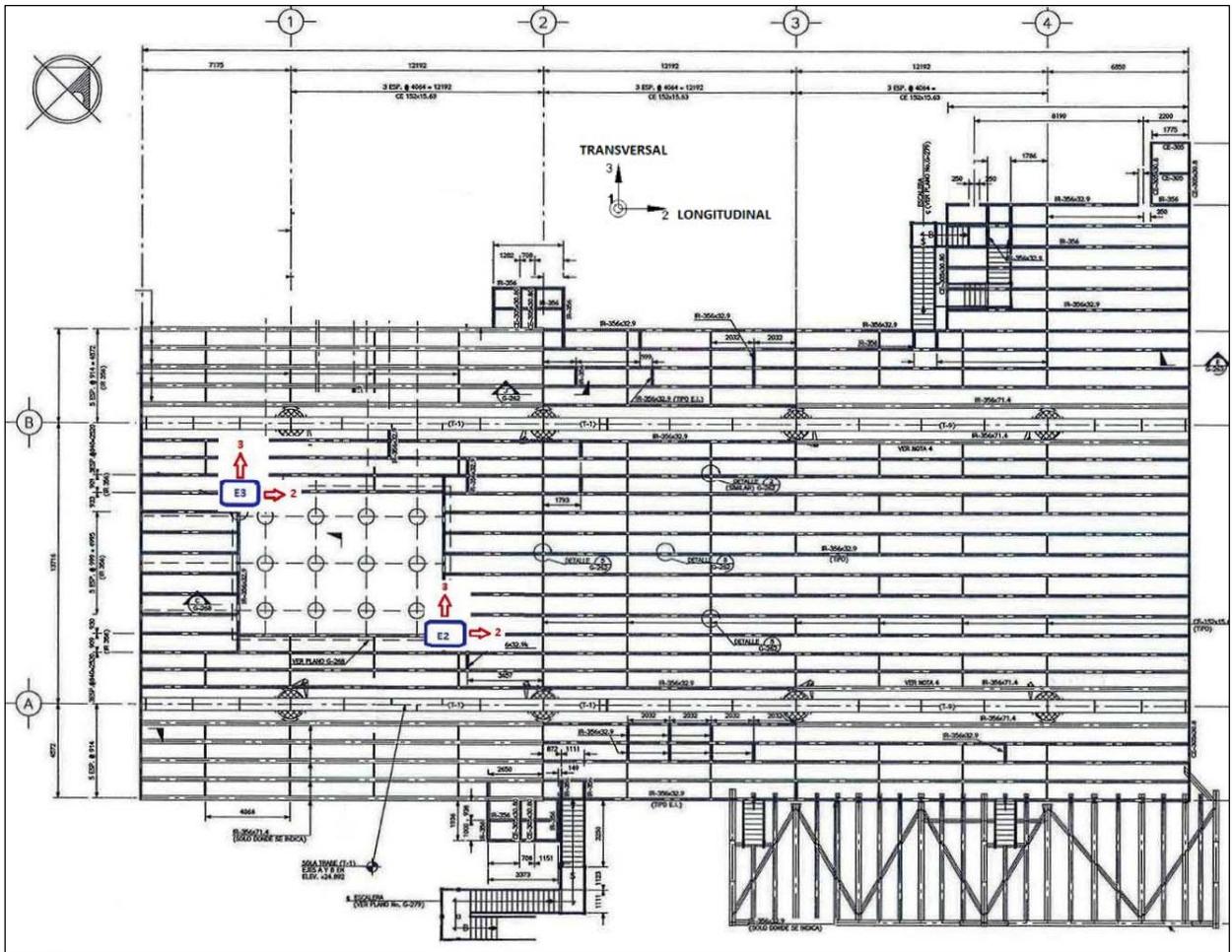


Fig. 4.10. Distribución en planta de los equipos E2 y E3 instalados en la base de la estructura de la torre de perforación, del Arreglo No.6.

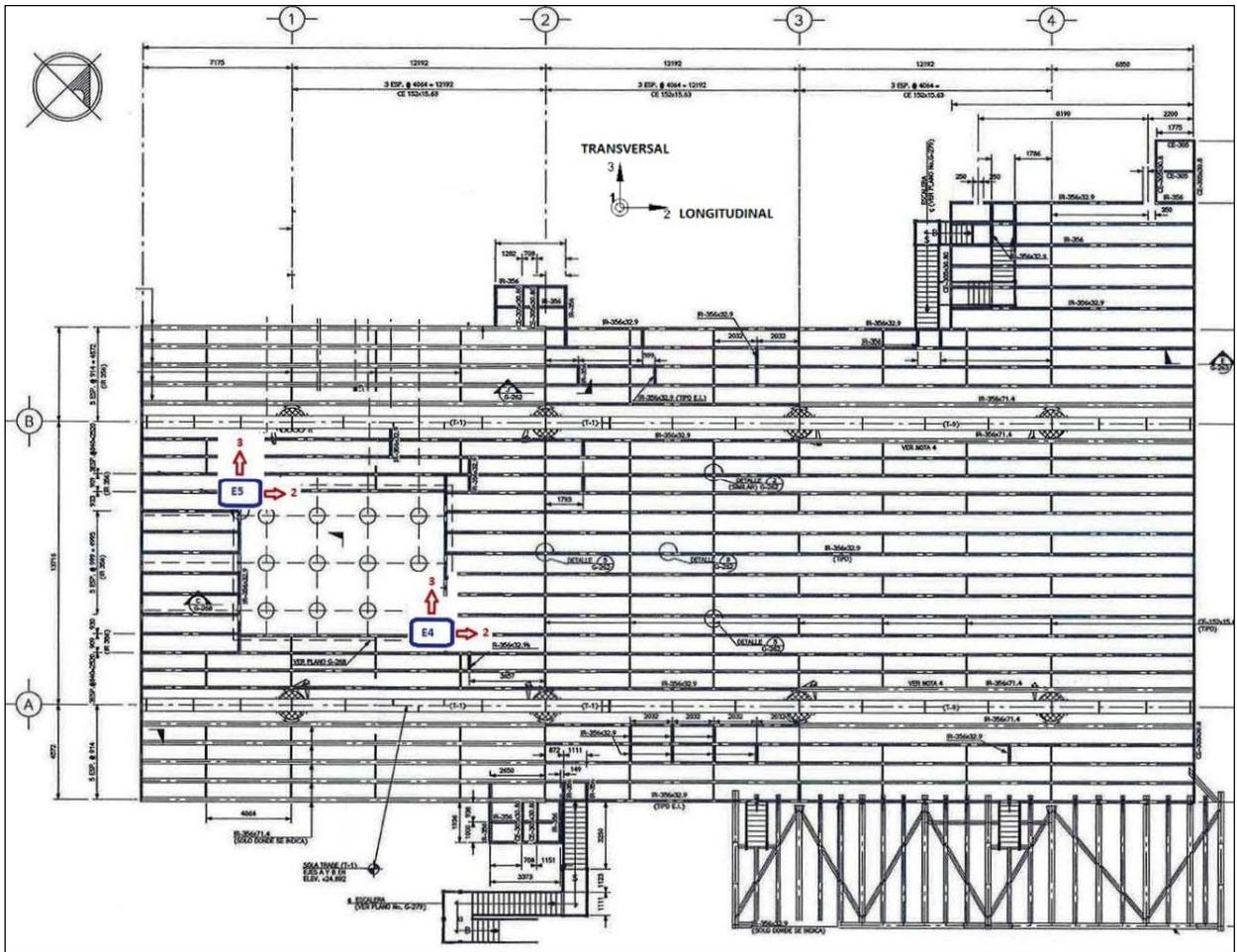


Fig. 4.11. Distribución en planta de los equipos E4 y E5 instalados en el nivel intermedio de la estructura de la torre de perforación, del Arreglo No.6.

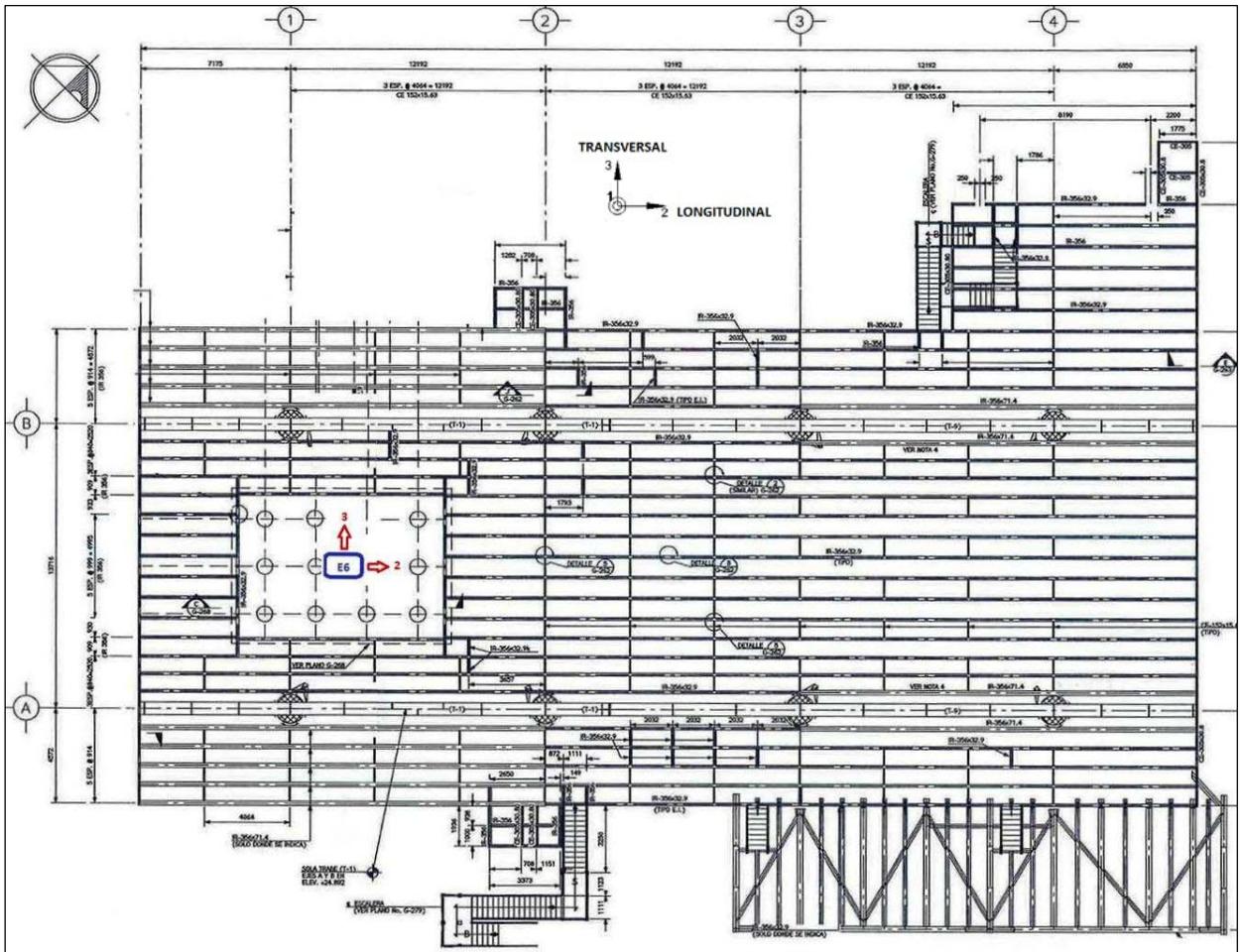


Fig. 4.12. Distribución en planta del equipo E6 instalado en el nivel superior de la estructura de la torre de perforación, del Arreglo No.6.

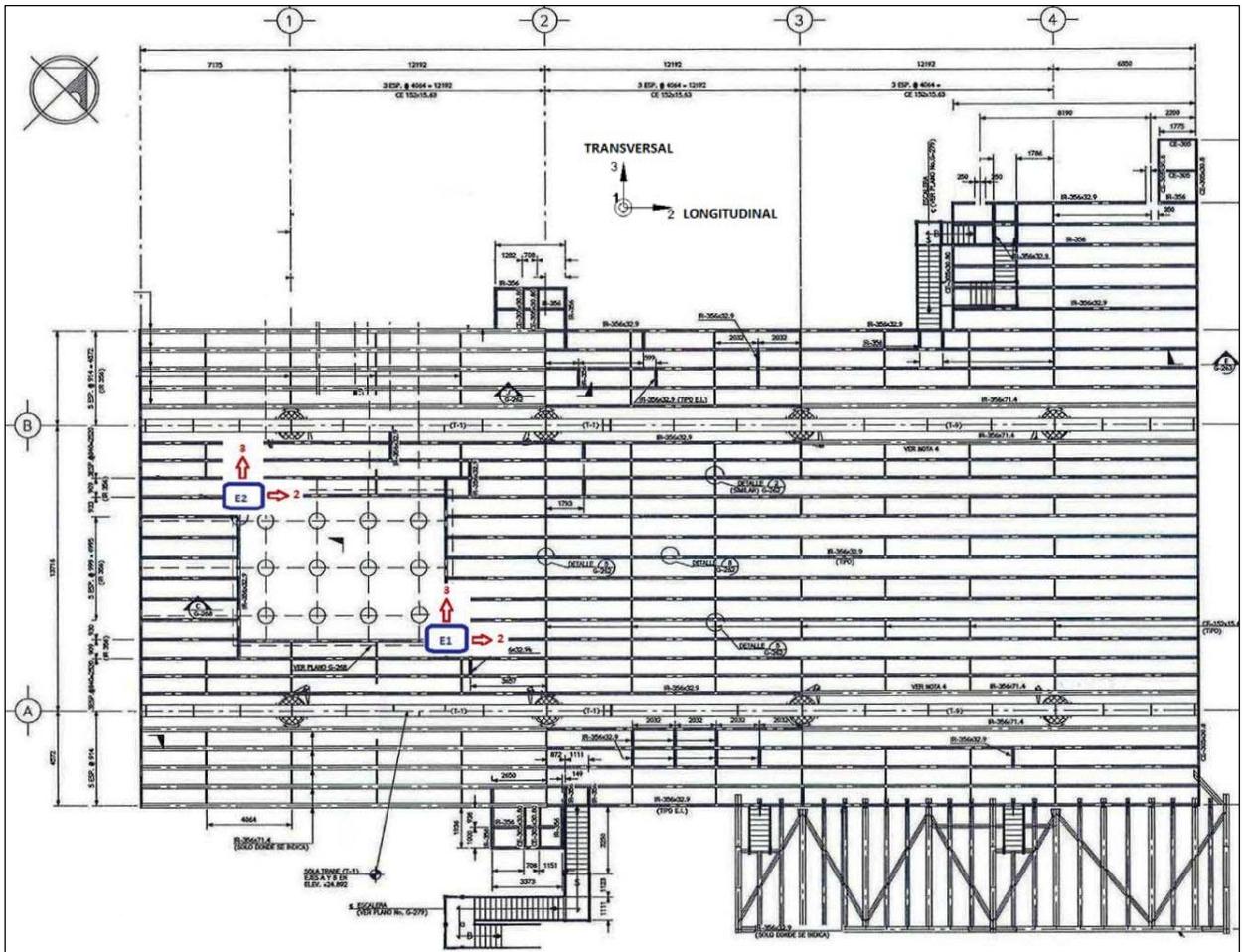


Fig. 4.13. Distribución en planta de los equipos E1 y E2 instalados en la base de la estructura de la torre de perforación, del Arreglo No.7.

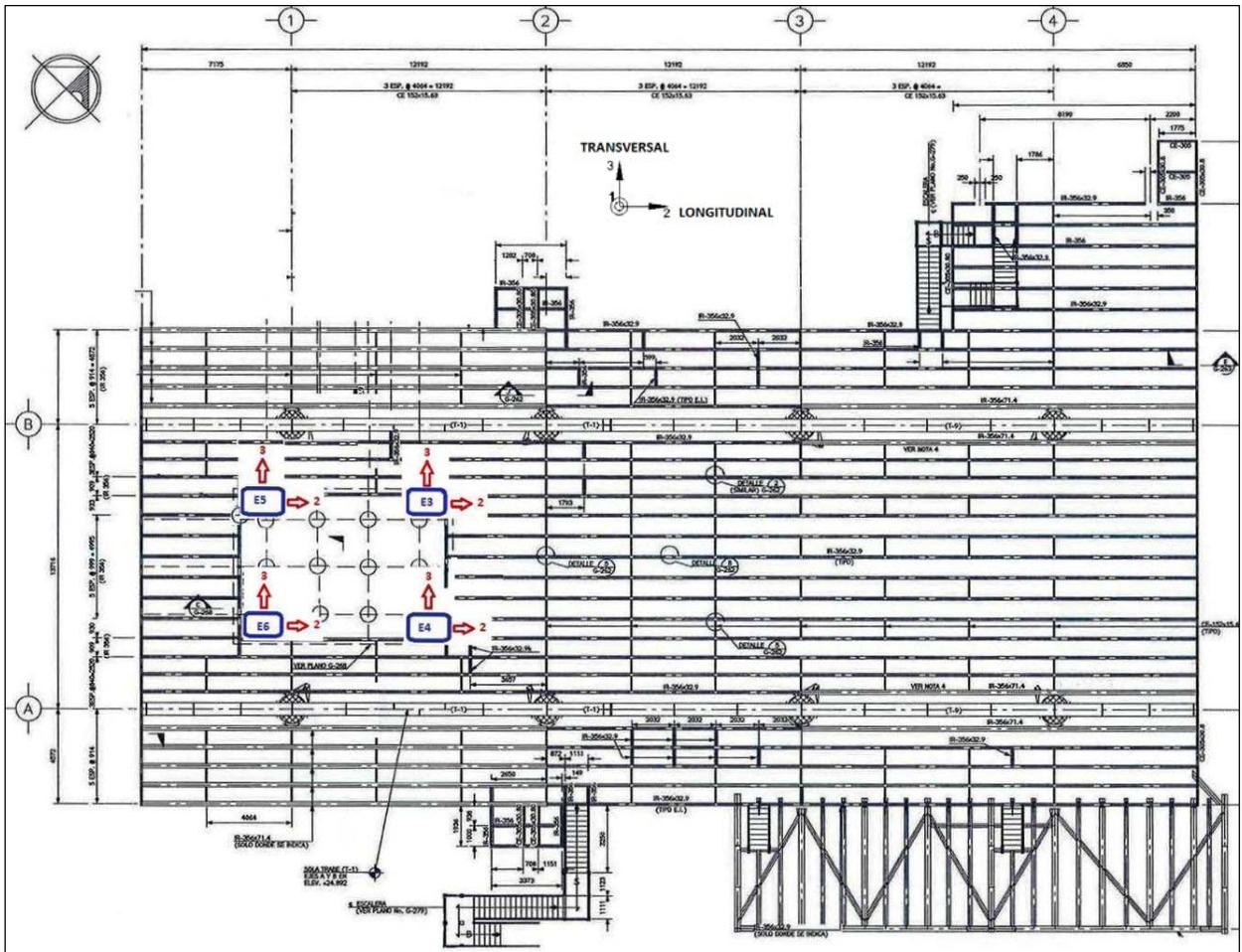


Fig. 4.14. Distribución en planta de los equipos E3, E4, E5 y E6 instalados en el nivel intermedio de la estructura de la torre de perforación, Arreglo No.7.

#### 4.5 Herramienta utilizada para el procesamiento de señales

En este trabajo de investigación el análisis espectral descrito con anterioridad, se realizó utilizando un software para el procesamiento de las señales de aceleración vs. tiempo y la aplicación de una rutina ejecutada por medio del sistema LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), el cual es un lenguaje representativo del estado del arte en el tema de análisis de señales. Dicha herramienta fue desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la UNAM para el procesamiento de señales, Castelán, (2001).

El sistema utilizado se basa en un procedimiento numérico para el análisis e interpretación de señales registradas, y permite calcular las propiedades dinámicas necesarias para estimar el comportamiento dinámico de las estructuras en estudio, bajo sus condiciones actuales, para finalmente calibrar los modelos analíticos. La aplicación de esta herramienta ha sido repetidamente utilizada y validada por los autores en diferentes proyectos de identificación estructural en edificios, puentes, entre otras, Castelán *et al*, (2002).

La herramienta utilizada es de uso extensivo en la identificación de sistemas estructurales mediante el análisis de registros de vibraciones reales, está permite procesar la información y analizar señales de par en par, esto debido a que las funciones espectrales requieren del manejo de dos señales a la vez. Dicha aplicación realiza rutinas de análisis de señales y permite calcular los espectros de Fourier, cruzados y de potencia, así como también las funciones de coherencia y ángulos de fase.

En la siguiente fig. 4.15, se muestra el panel del instrumento virtual utilizado, el cual presenta los espectros promedio de Fourier y de potencia para cada una de las señales y sus respectivas funciones de correlación: espectro cruzado, coherencia, fase y función de transferencia, necesarias para lograr la identificación de las frecuencias propias de vibrar del sistema. Es mediante la interpretación de estos parámetros como se determinarán las frecuencias y modos de vibrar asociados al comportamiento dinámico de las estructuras en estudio.

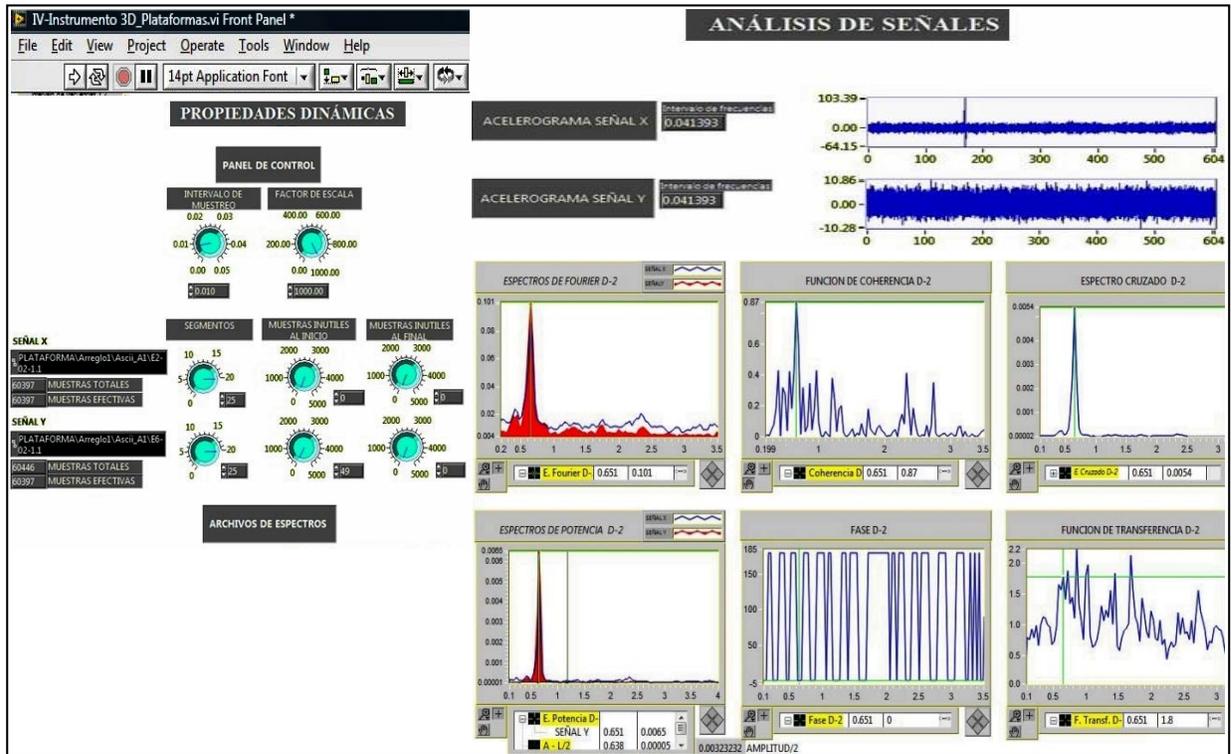


Fig. 4.15. Panel del instrumento virtual para el análisis de señales, Castelán et al, (2002).

# CAPÍTULO 5

---

## *Análisis de resultados*

---

### 5.1 Metodología para el procesamiento de la información registrada

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del proceso y análisis de las señales de vibración registradas para identificar: 1) Los desplazamientos registrados en las diversas zonas de la plataforma marina que fueron instrumentadas y 2) Las propiedades dinámicas de la estructura, dadas por los periodos o frecuencias propias de vibrar del sistema estructural, asociadas a sus correspondientes modos de vibrar y los porcentajes de amortiguamiento crítico.

Los registros de aceleración vs. tiempo, como ya se mencionó fueron grabados en la memoria de estado sólido de cada uno de los equipos de medición y después se exportaron a una computadora personal en formato (.GSR) (formato en el que se grabaron dentro de los equipos), a través del software que controla el funcionamiento de estos equipos.

Dependiendo del número de sensores internos de los equipos, cada una de estas señales fue grabada en formato binario, en 2 o 3 direcciones ortogonales, las cuales tuvieron que ser convertidas a formato (Ascii) y posteriormente divididas por canales o direcciones de medición para su posterior procesamiento numérico y análisis final, con ayuda de la herramienta antes descrita para el análisis de señales (instrumento virtual) desarrollada en el lenguaje de programación de objetos LabVIEW, se pudo realizar el procesamiento y análisis detallado de las señales registradas en las dos etapas de medición.

Para la obtención de propiedades dinámicas de la plataforma, se requirió realizar el análisis de señales, el cual se basó en la teoría de Fourier, cuyo planteamiento permite transformar las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. El procedimiento para la obtención de las propiedades dinámicas, así como la aplicación de las técnicas de Fourier fue descrito en capítulos anteriores.

## 5.2 Organización de las señales de aceleración registradas

La sincronía en el registro de las señales de aceleración en los equipos de medición es fundamental para identificar correctamente las frecuencias propias del sistema. Por lo que en cada punto de medición establecido se grabaron, de 5 a 10 registros de señales de vibración por efectos ambientales con una duración aproximada de 8 a 10 minutos cada una y una frecuencia de muestreo de 100 mps.

En las tablas 5.1 a 5.5 se presenta la relación detallada de los registros de aceleración vs. tiempo, correspondientes a las 135 señales obtenidas en los puntos de medición de los cinco arreglos instrumentados en la primera etapa del programa de mediciones, cabe mencionar que el nombre de cada registro se compone de la siguiente manera: los dos primeros dígitos indican el nombre del equipo con el cual se realizó la medición, los tres siguientes indican el día que se efectuó el registro y finalmente los dos últimos dígitos indican el número de disparo o evento realizado.

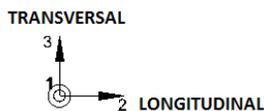


Tabla 5.1. Señales registradas en el Arreglo No.1.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio	Duración (s)
1	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17501	16:24:04	585
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17501	16:24:04	585
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17501	16:23:59	584
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17501	16:24:01	583
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17501	16:24:02	583
	E6	Cubierta 1,Columna A1	E6_17501	16:24:02	584
2	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17502	16:48:13	552
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17502	16:48:13	551
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17502	16:48:09	549
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17502	16:48:10	549
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17502	16:48:11	550
	E6	Cubierta 1,Columna A1	E6_17502	16:48:12	549
3	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17503	17:05:01	582
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17503	17:05:02	581
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17503	17:05:56	581
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17503	17:05:58	581
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17503	17:05:00	926
	E6	Cubierta 1,Columna A1	E6_17503	17:05:00	581
4	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_176-4	10:50:21	562
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_176-4	10:50:21	560
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_176-4	10:50:16	559
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_176-4	10:50:18	559
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_176-4	10:50:19	560
	E6	Cubierta 1,Columna A1	E6_176-4	10:50:20	560
5	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_176-5	11:09:04	569
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_176-5	11:09:05	568
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_176-5	11:09:01	566
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_176-5	11:09:02	567
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_176-5	11:09:02	567
	E6	Cubierta 1,Columna A1	E6_176-5	11:09:02	568

Tabla 5.2. Señales registradas en el Arreglo No.2.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio	Duración (s)
1	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17601	14:45:11	579
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17601	14:45:11	579
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17601	14:45:11	580
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17601	14:45:11	579
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17601	14:45:11	580
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17601	14:45:11	580
2	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17602	15:03:11	500
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17602	15:03:11	499
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17602	15:03:11	501
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17602	15:03:11	500
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17602	15:03:11	500
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17602	15:03:11	500
3	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17603	15:20:05	556
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17603	15:20:05	556
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17603	15:20:05	557
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17603	15:20:05	556
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17603	15:20:05	556
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17603	15:20:05	556
4	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17604	15:49:30	559
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17604	15:49:30	559
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17604	15:49:30	560
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17604	15:49:30	559
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17604	15:49:30	560
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17604	15:49:30	559
5	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17605	16:20:13	553
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17605	16:20:13	553
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17605	16:20:13	554
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17605	16:20:13	553
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17605	16:20:13	554
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17605	16:20:13	553

Tabla 5.3. Señales registradas en el Arreglo No.3.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio	Duración (s)
1	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17701	17:41:24	571
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17701	17:41:24	570
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17701	17:41:21	568
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17701	17:41:23	567
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17701	17:41:24	567
2	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17702	17:53:47	549
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17702	17:53:48	548
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17702	17:53:44	549
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17702	17:53:45	548
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17702	17:53:46	548
3	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17703	18:04:25	531
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17703	18:04:25	532
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17703	18:04:25	528
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17703	18:04:26	528
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17703	18:04:26	529
4	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17704	18:17:11	552
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17704	18:17:11	551
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17704	18:17:08	550
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17704	18:17:09	550
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17704	18:17:10	550
5	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17705	18:28:11	612
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17705	18:28:11	611
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17705	18:28:07	611
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17705	18:28:09	610
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17705	18:28:10	610
6	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17706	18:40:56	504
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17706	18:40:56	503
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17706	18:40:52	502
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17706	18:40:54	502
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17706	18:40:55	502

Tabla 5.4. Señales registradas en el Arreglo No.4.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio	Duración (s)
1	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17801	15:08:04	736
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17801	15:08:04	734
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17801	15:08:04	736
	E6	Primer nivel de pasillos, lado NO	E6_17801	15:08:04	736
2	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17802	15:26:09	474
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17802	15:26:09	473
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17802	15:26:09	475
	E6	Primer nivel de pasillos, lado NO	E6_17802	15:26:09	474
3	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17803	15:37:05	608
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17803	15:37:05	607
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17803	15:37:05	609
	E6	Primer nivel de pasillos, lado NO	E6_17803	15:37:05	609
4	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17804	15:50:08	506
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17804	15:50:08	506
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17804	15:50:07	507
	E6	Primer nivel de pasillos, lado NO	E6_17804	15:50:08	506
5	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17805	16:02:07	613
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17805	16:02:07	613
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17805	16:02:06	614
	E6	Primer nivel de pasillos, lado NO	E6_17805	16:02:07	613

Tabla 5.5. Señales registradas en el Arreglo No.5.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio	Duración (s)
1	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17901	16:28:40	548
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17901	16:28:40	548
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17901	16:28:39	549
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17901	16:28:40	549
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17901	16:28:40	548
2	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17902	16:40:30	549
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17902	16:40:30	549
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17902	16:40:29	550
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17902	16:40:30	550
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17902	16:40:30	549
3	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17903	17:00:45	557
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17903	17:00:45	557
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17903	17:00:44	558
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17903	17:00:45	558
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17903	17:00:45	557
4	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17904	17:12:35	554
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17904	17:12:35	553
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17904	17:12:34	555
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17904	17:12:35	555
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17904	17:12:35	554
5	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17905	17:25:18	619
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17905	17:25:18	620
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17905	17:25:18	620
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17905	17:25:18	620
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17905	17:25:18	620

Por las características específicas del sistema estructural de la torre de perforación, fue necesario explorar, con mayor detalle, los movimientos de diversos puntos sobre esta, particularmente en el punto donde está colgada la lingada o tubería de perforación, con respecto a los de su base y de la cubierta superior de la plataforma, por tal motivo se llevó a cabo una segunda etapa en el programa de mediciones, realizando para esto los Arreglos No.6 y No.7, por lo que a continuación

en las tablas 5.6 a 5.8 se muestra la relación detallada de los registros de aceleración vs tiempo, correspondientes a las 120 señales obtenidas en los puntos de medición de dichos arreglos instrumentales.

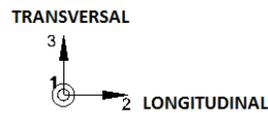


Tabla 5.6. Relación de señales registradas en el Arreglo No.6 (Equipos 1, 2, 3, 4, 5,6).

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio
1	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23001	20:26:07
	E2	Base de la torre	E2_23001	20:26:07
	E3	Base de la torre	E3_23001	20:26:02
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23001	20:26:03
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23001	20:26:04
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23001	20:26:05
2	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23002	20:36:16
	E2	Base de la torre	E2_23002	20:36:16
	E3	Base de la torre	E3_23002	20:36:12
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23002	20:36:13
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23002	20:36:14
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23002	20:36:15
3	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23003	20:51:34
	E2	Base de la torre	E2_23003	20:51:34
	E3	Base de la torre	E3_23003	20:51:29
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23003	20:51:30
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23003	20:51:31
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23003	20:51:31
4	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23004	21:10:32
	E2	Base de la torre	E2_23004	21:10:32
	E3	Base de la torre	E3_23004	21:10:25
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23004	21:10:27
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23004	21:10:28
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23004	21:10:29
5	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23005	21:19:10
	E2	Base de la torre	E2_23005	21:19:10
	E3	Base de la torre	E3_23005	21:19:04
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23005	21:19:05
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23005	21:19:08
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23005	21:19:09

Tabla 5.7. Continuación de la relación de señales registradas en el Arreglo No.6.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio
6	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23006	21:30:07
	E2	Base de la torre	E2_23006	21:30:07
	E3	Base de la torre	E3_23006	21:30:02
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23006	21:30:04
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23006	21:30:05
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23006	21:30:06
7	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23007	21:41:01
	E2	Base de la torre	E2_23007	21:41:02
	E3	Base de la torre	E3_23007	21:41:18
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23007	21:41:58
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23007	21:41:59
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23007	21:41:00
8	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23008	22:01:55
	E2	Base de la torre	E2_23008	22:01:56
	E3	Base de la torre	E3_23008	22:01:51
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23008	22:01:52
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23008	22:01:59
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23008	22:01:54
9	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23009	11:31:20
	E2	Base de la torre	E2_23009	11:31:21
	E3	Base de la torre	E3_23009	11:31:16
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23009	11:31:17
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23009	11:31:18
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23009	11:31:19
10	E1	Cubierta superior de la plataforma	E1_23010	11:46:19
	E2	Base de la torre	E2_23010	11:46:20
	E3	Base de la torre	E3_23010	11:46:16
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23010	11:46:16
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23010	11:46:17
	E6	Nivel superior de la torre	E6_23010	11:46:18

Tabla 5.8. Relación de señales registradas en el Arreglo No.7.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio
1	E1	Base de la torre	E1_23101	15:51:06 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23101	15:51:06 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23101	15:51:05 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23101	15:51:06 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23101	15:51:06 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23101	15:51:06 p.m.
2	E1	Base de la torre	E1_23102	15:57:02 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23102	15:57:02 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23102	15:57:02 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23102	15:57:02 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23102	15:57:02 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23102	15:57:02 p.m.
3	E1	Base de la torre	E1_23103	16:08:41 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23103	16:08:41 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23103	16:08:41 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23103	16:08:41 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23103	16:08:41 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23103	16:08:41 p.m.
4	E1	Base de la torre	E1_23104	16:14:33 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23104	16:14:33 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23104	16:14:33 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23104	16:14:33 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23104	16:14:33 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23104	16:14:33 p.m.
5	E1	Base de la torre	E1_23105	16:20:12 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23105	16:20:12 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23105	16:20:11 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23105	16:20:12 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23105	16:20:12 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23105	16:20:12 p.m.

Tabla 5.8. Continuación de la relación de señales registradas en el Arreglo No.7.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Hora de inicio
6	E1	Base de la torre	E1_23106	16:33:57 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23106	16:33:57 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23106	16:33:57 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23106	16:33:57 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23106	16:33:57 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23106	16:33:57 p.m.
7	E1	Base de la torre	E1_23107	16:41:19 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23107	16:41:26 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23107	16:41:58 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23107	16:41:19 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23107	16:41:19 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23107	16:41:19 p.m.
8	E1	Base de la torre	E1_23108	16:47:34 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23108	16:47:34 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23108	16:47:34 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23108	16:47:34 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23108	16:47:34 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23108	16:47:34 p.m.
9	E1	Base de la torre	E1_23109	17:06:28 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23109	17:06:28 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23109	17:06:27 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23109	17:06:28 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23109	17:06:28 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23109	17:06:49 p.m.
10	E1	Base de la torre	E1_23110	17:25:36 p.m.
	E2	Base de la torre	E2_23110	17:25:37 p.m.
	E3	Nivel intermedio de la torre	E3_23110	17:25:37 p.m.
	E4	Nivel intermedio de la torre	E4_23110	17:25:37 p.m.
	E5	Nivel intermedio de la torre	E5_23110	17:25:37 p.m.
	E6	Nivel intermedio de la torre	E6_23110	17:25:12 p.m.

### 5.3 Determinación de las aceleraciones pico de las señales registradas

Las características del movimiento de una estructura está directamente asociadas a los niveles de aceleración que se generan en ella, dichos niveles son utilizados para ser comparados con los criterios y/o reglamentación existentes, con la finalidad de determinar si son aceptables o no para cierto nivel de vibración. Por ello, fue de interés graficar las aceleraciones pico o máximas que se registraron en cada uno de los equipos colocados en las distintas zonas de la plataforma marina, por lo que en las figs. 5.2 a 5.6 se presentan los valores de las aceleraciones pico, correspondientes a los cinco primeros arreglos instrumentados (las direcciones de medición, indicadas en las gráficas, corresponden a las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) de la vista en planta de la plataforma.

A manera de ejemplo en la fig. 5.1 se presenta gráficamente, una de las señales de aceleración vs tiempo, capturadas para el registro E1\_17501, cabe mencionar que el nombre de la señal se puede apreciar en la parte superior de esta gráfica, así como también se pueden ver los valores pico registrados en cada dirección de análisis: vertical (1), longitudinal (2) y transversal (3), la representación gráfica de las señales mostradas a continuación se realizó mediante el programa de computo Geodas, (Geosig Lt).

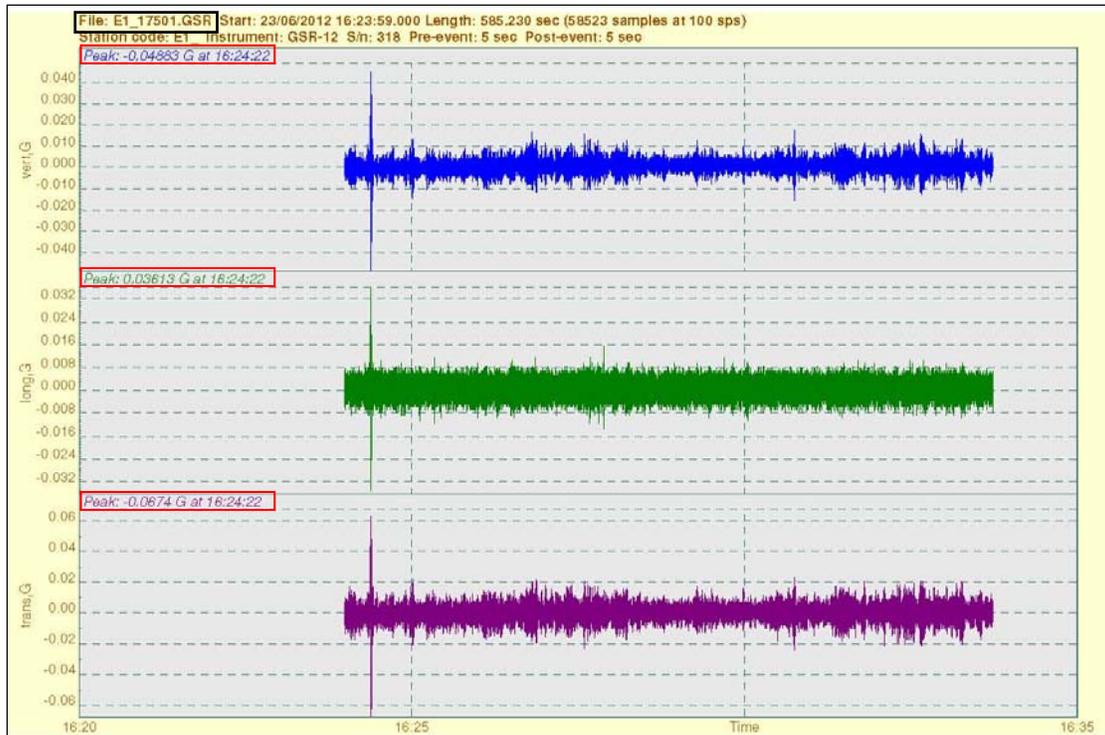


Fig. 5.1. Registro de aceleraciones vs tiempo, registro E1\_17501, disparo 1 del Arreglo No.1.

❖ Aceleraciones Pico del Arreglo No.1.

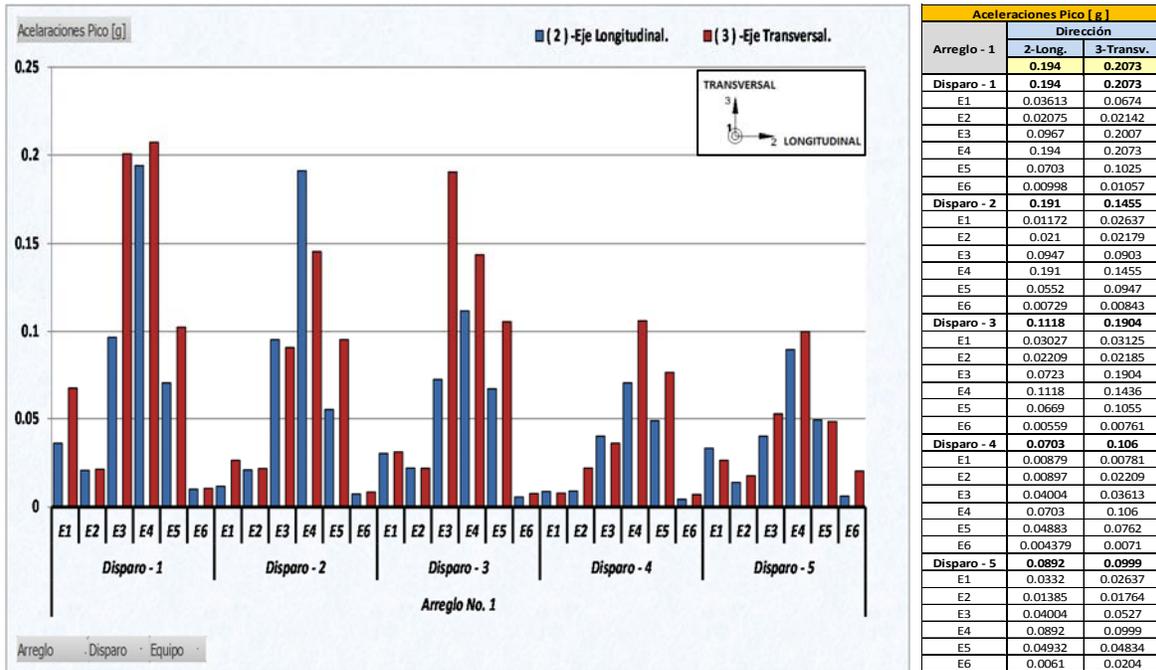


Fig. 5.2. Aceleraciones Pico del Arreglo No.1.

❖ Aceleraciones Pico del Arreglo No.2.

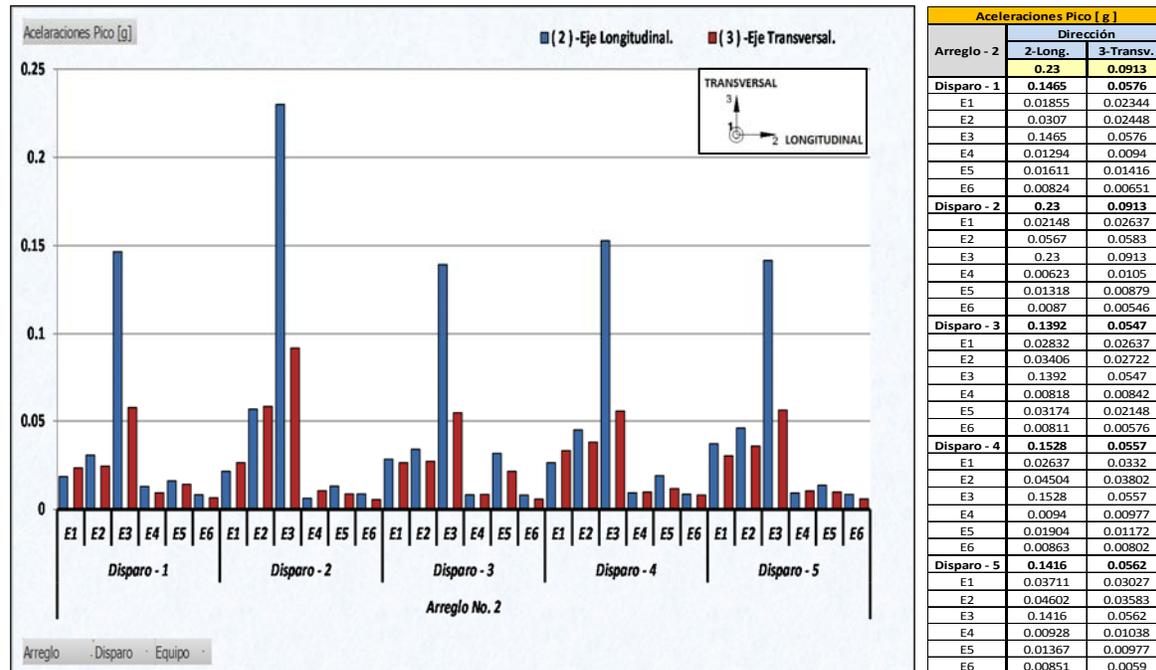
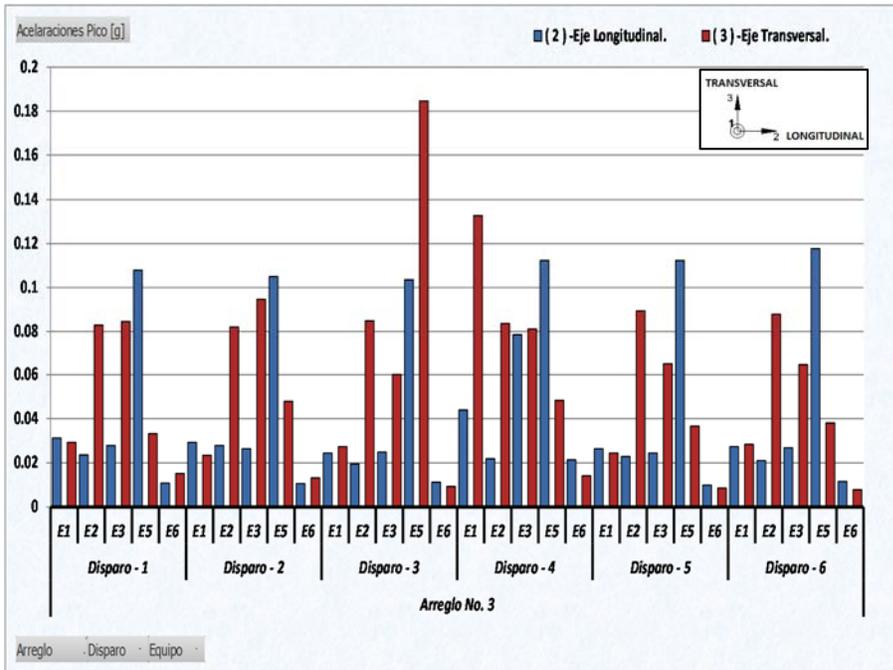


Fig. 5.3. Aceleraciones Pico del Arreglo No.2.

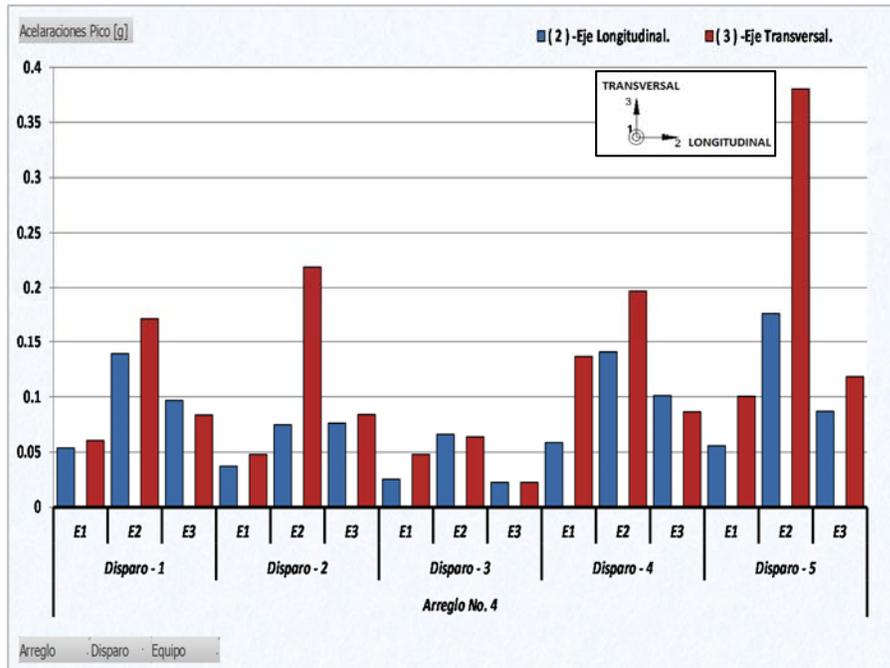
❖ Aceleraciones Pico del Arreglo No.3.



Aceleraciones Pico [g]		
Arreglo - 3	Dirección	
	2-Long.	3-Transv.
	<b>0.1177</b>	<b>0.1846</b>
Disparo - 1	<b>0.1079</b>	<b>0.0845</b>
E1	0.03125	0.0293
E2	0.02362	0.0829
E3	0.02783	0.0845
E5	0.1079	0.0332
E6	0.0108	0.01512
Disparo - 2	<b>0.105</b>	<b>0.0947</b>
E1	0.0293	0.02344
E2	0.02789	0.0821
E3	0.02637	0.0947
E5	0.105	0.04785
E6	0.01059	0.01323
Disparo - 3	<b>0.1035</b>	<b>0.1846</b>
E1	0.02441	0.02734
E2	0.01947	0.0848
E3	0.0249	0.0601
E5	0.1035	0.1846
E6	0.01125	0.00924
Disparo - 4	<b>0.1123</b>	<b>0.1328</b>
E1	0.04395	0.1328
E2	0.02185	0.0836
E3	0.0786	0.0811
E5	0.1123	0.04834
E6	0.0213	0.01411
Disparo - 5	<b>0.1123</b>	<b>0.0894</b>
E1	0.02637	0.02441
E2	0.02289	0.0894
E3	0.02441	0.0649
E5	0.1123	0.03662
E6	0.00986	0.00851
Disparo - 6	<b>0.1177</b>	<b>0.0878</b>
E1	0.02734	0.02832
E2	0.02106	0.0878
E3	0.02686	0.0645
E5	0.1177	0.03809
E6	0.01154	0.00786

Fig. 5.4. Aceleraciones Pico del Arreglo No.3.

❖ Aceleraciones Pico del Arreglo No.4.



Aceleraciones Pico [g]		
Arreglo - 4	Dirección	
	2-Long.	3-Transv.
	<b>0.1766</b>	<b>0.3804</b>
Disparo - 1	<b>0.1392</b>	<b>0.1718</b>
E1	0.0537	0.0605
E2	0.1392	0.1718
E3	0.0967	0.0835
Disparo - 2	<b>0.0762</b>	<b>0.2189</b>
E1	0.03711	0.04785
E2	0.0746	0.2189
E3	0.0762	0.084
Disparo - 3	<b>0.066</b>	<b>0.0637</b>
E1	0.02539	0.04785
E2	0.066	0.0637
E3	0.02246	0.02246
Disparo - 4	<b>0.1408</b>	<b>0.197</b>
E1	0.0586	0.1367
E2	0.1408	0.197
E3	0.1011	0.0864
Disparo - 5	<b>0.1766</b>	<b>0.3804</b>
E1	0.0557	0.1006
E2	0.1766	0.3804
E3	0.0869	0.1182

Fig. 5.5. Aceleraciones Pico del Arreglo No.4.

❖ **Aceleraciones Pico del Arreglo No.5.**

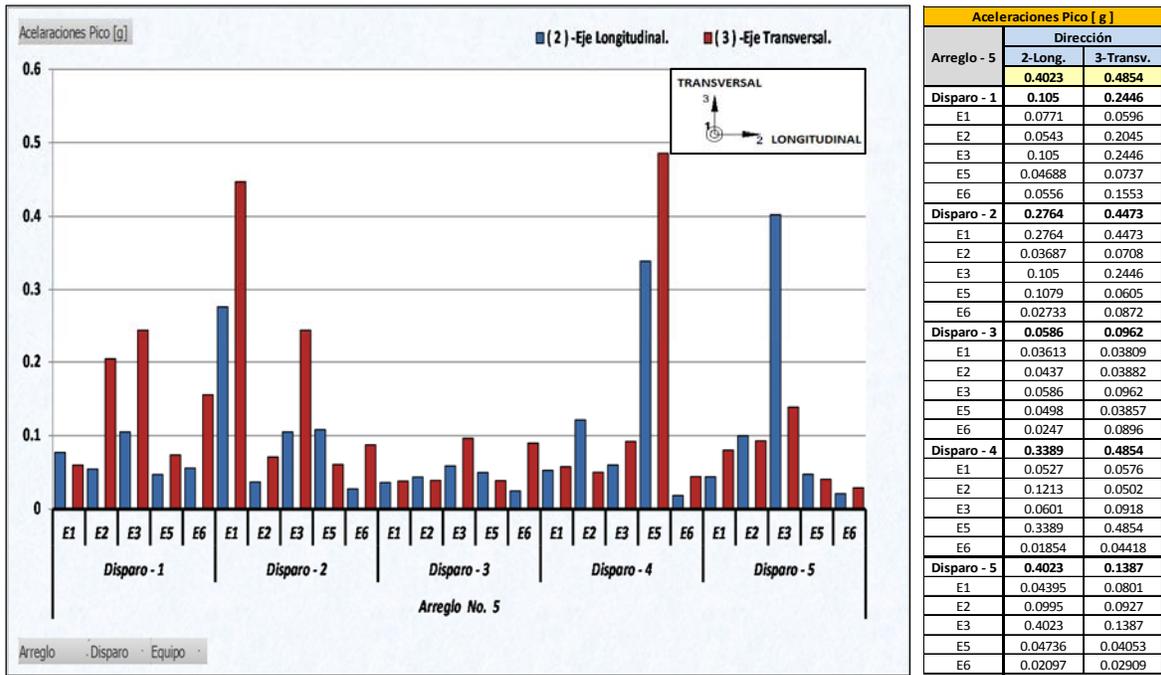


Fig. 5.6. Aceleraciones Pico del Arreglo No.5.

**5.3.1 Resultados de las Aceleraciones Pico**

En el Arreglo No.1, los equipos de medición fueron distribuidos verticalmente en las cubiertas de la plataforma, concluyendo de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de las aceleraciones pico, se verificó que los mayores valores se registraron en los equipos ubicados al centro de la cubierta inferior No. 1 y del pasillo de acceso al embarcadero.

En el Arreglo No.2, los equipos de medición fueron distribuidos sobre la cubierta inferior No.1, se puede concluir de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de las aceleraciones pico, se verificó que los valores mayores se presentaron en el equipo ubicado al centro de la cubierta, particularmente en la dirección longitudinal (2).

En el Arreglo No.3, los equipos de medición fueron distribuidos sobre la cubierta superior No.2, verificándose que las aceleraciones pico registradas fueron sensiblemente uniformes, en todas las direcciones.

Para el Arreglo No.4, los equipos de medición fueron distribuidos verticalmente sobre la base de la torre de perforación y uno más sobre el primer nivel de pasillos de la misma, por lo que se concluye de acuerdo a los resultados obtenidos a partir de las aceleraciones pico, que estas se presentaron en el equipo localizado a mayor elevación (E2), alcanzando valores de 0.38 veces la aceleración de la gravedad, en la dirección longitudinal (2) y transversal (3), para todos los disparos realizados en dicho arreglo.

Para el Arreglo No.5, todos los equipos de medición fueron distribuidos sobre los pasillos del acceso al embarcadero, verificándose que de los cinco arreglos instrumentados, fue en este en el cual se presentaron los mayores valores de aceleración pico, registrándose valores cercanos a 0.5 veces la aceleración de la gravedad.

#### **5.4 Determinación de los desplazamientos máximos de las señales registradas.**

En una estructura su movimiento está directamente asociado a los niveles de desplazamientos que se generan en esta, dichos niveles son comparados con los criterios o reglamentación existentes, con la finalidad de determinar si son aceptables o no.

El desplazamiento de un punto determinado, puede ser obtenido mediante la doble integración de su aceleración, por lo que para el cálculo de desplazamientos se utilizó un procedimiento de integración numérico de señales, que incluyó un proceso de filtrado y corrección de línea base previo a cada integración, para eliminar frecuencias alteradas asociadas a ruido y delimitar las frecuencias de interés.

Cabe mencionar que en los espectros de Fourier de algunas señales aparecieron, por efectos de ruido, picos de frecuencias cercanas a cero que afectaban el cálculo de las historias de desplazamientos, por lo que fue necesario aplicar antes un filtro “pasa-bajas” y un filtro “pasa-altas” con frecuencias límite de 15 Hz y 0.05 Hz respectivamente.

De los análisis anteriores, se obtuvieron gráficas de historias de desplazamientos para las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) de cada equipo que participó en los arreglos instrumentados. A partir de la información anterior, se identificaron y graficaron los desplazamientos máximos obtenidos en cada una de las 135 señales obtenidas de los 5 arreglos instrumentales pertenecientes a la primera etapa del programa de mediciones (arreglos No.1 al

No. 5), así como de las 120 señales registradas en los arreglos No.6 y No.7 de la segunda etapa. Finalmente se obtuvieron los desplazamientos relativos para el tiempo en el que se produce el desplazamiento máximo en cada uno de los equipos localizados en las distintas zonas de la plataforma, consideradas en el Arreglo No.1 (zona de pasillos de acceso al embarcadero y las dos cubiertas).

Debido a la gran cantidad de datos registrados del total de las señales grabadas, a manera de ejemplo en la fig. 5.7 se presentan gráficamente las historias de desplazamientos absolutos calculados para uno de los registros generados en el equipo E1 del Arreglo No.1 (E1\_17501), en dicha figura se pueden identificar los valores de desplazamiento mostrados en la tabla 5.9, correspondientes a esta señal registrada.

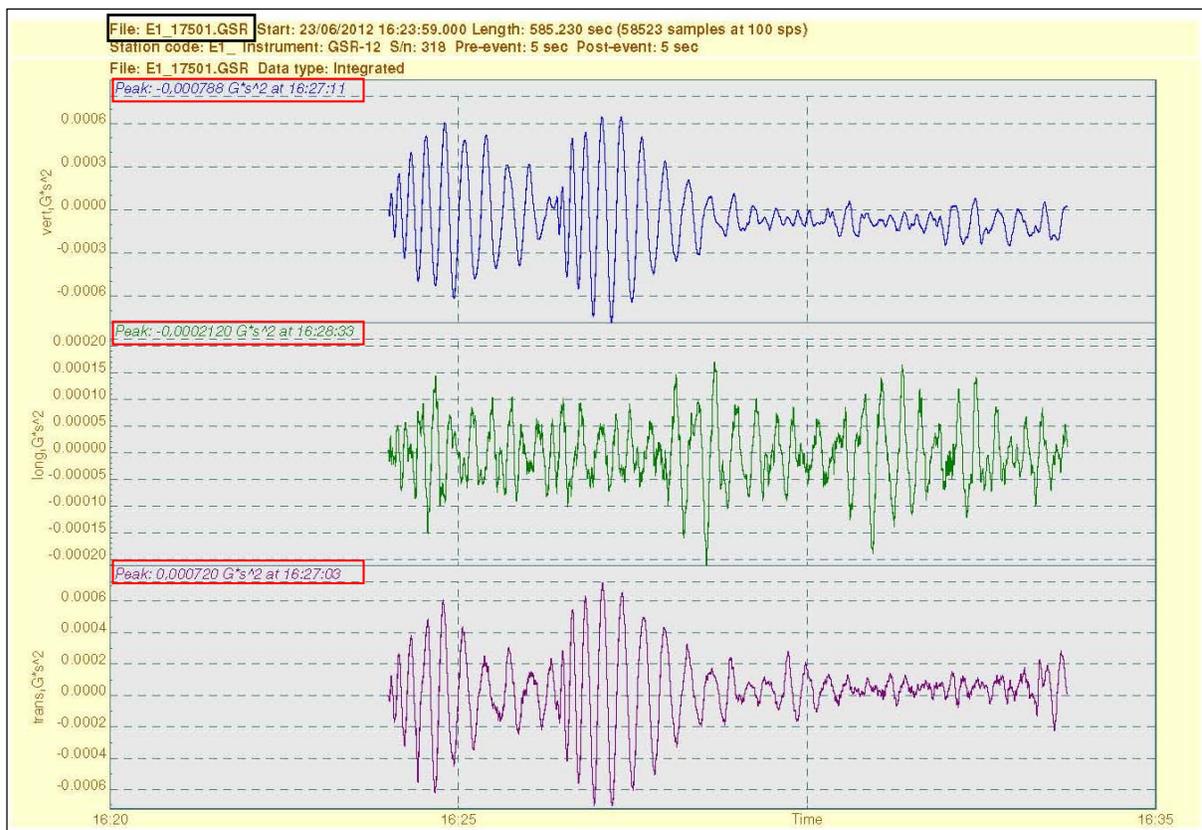


Fig. 5.7. Historial de aceleraciones vs tiempo y sus desplazamientos Máximos Absolutos, calculados para el registro E1\_17501, del Arreglo No.1, en sus tres direcciones registradas, Geodas (Geosig Lt).

**5.4.1 Desplazamientos máximos absolutos**

En las tablas 5.9 a 5.13, se muestran los valores de los desplazamientos máximos absolutos correspondientes a cada uno de los cinco arreglos instrumentales registrados en la primera etapa del programa de mediciones; estos valores fueron extraídos de las historias de desplazamientos vs. tiempo, y fueron obtenidos de la doble integración numérica de sus registros de aceleración en dirección longitudinal (2) y transversal (3). De forma gráfica, se presentan los desplazamientos obtenidos en las figs. 5.8 a 5.12.

*Tabla 5.9. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos del Arreglo No.1*

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Desplazamientos Máximos (cm)			
				Dirección		Dirección	
				Longitudinal (2)	Tiempo (2)	Transversal (3)	Tiempo (3)
1	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17501	0.2080	16:28:33	0.7063	16:27:03
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17501	0.1359	16:32:05	0.1528	16:26:39
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17501	0.8289	16:29:11	1.3656	16:28:48
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17501	-----	16:24:49	-----	16:28:10
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17501	0.2117	16:33:30	0.2063	16:26:22
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17501	0.0562	16:32:45	0.0935	16:32:11
2	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17502	0.1829	16:56:16	0.2398	16:54:49
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17502	0.1128	16:57:10	0.1707	16:57:11
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17502	0.1852	16:57:09	0.1355	16:52:38
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17502	-----	16:55:25	-----	16:52:50
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17502	0.1362	16:53:02	0.1797	16:51:52
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17502	0.0789	16:57:09	0.0877	16:56:47
3	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17503	0.3415	17:11:44	1.1958	17:12:00
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17503	0.0909	17:14:34	0.0977	17:11:13
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17503	0.5886	17:06:06	0.3109	17:05:22
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17503	0.1644	17:13:47	0.5415	17:13:40
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17503	0.3332	17:16:11	0.5552	17:05:16
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17503	0.0640	17:13:09	0.1135	17:07:27
4	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_176-4	0.7956	10:50:39	0.2229	10:51:38
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_176-4	0.0596	10:58:53	0.1178	10:50:40
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_176-4	0.1041	10:57:45	0.1136	10:51:49
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_176-4	0.1053	10:50:34	0.1146	10:55:56
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_176-4	0.1099	10:57:27	0.2723	10:50:35
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_176-4	0.0346	10:58:49	0.0778	10:59:13
5	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_176-5	0.2447	11:17:10	0.2668	11:16:38
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_176-5	0.0556	11:15:54	0.1005	11:17:58
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_176-5	0.1215	11:14:03	0.1691	11:18:17
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_176-5	0.0966	11:18:18	0.0793	11:09:25
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_176-5	0.1313	11:16:37	0.1094	11:14:24
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_176-5	0.0267	11:12:15	0.0904	11:15:05

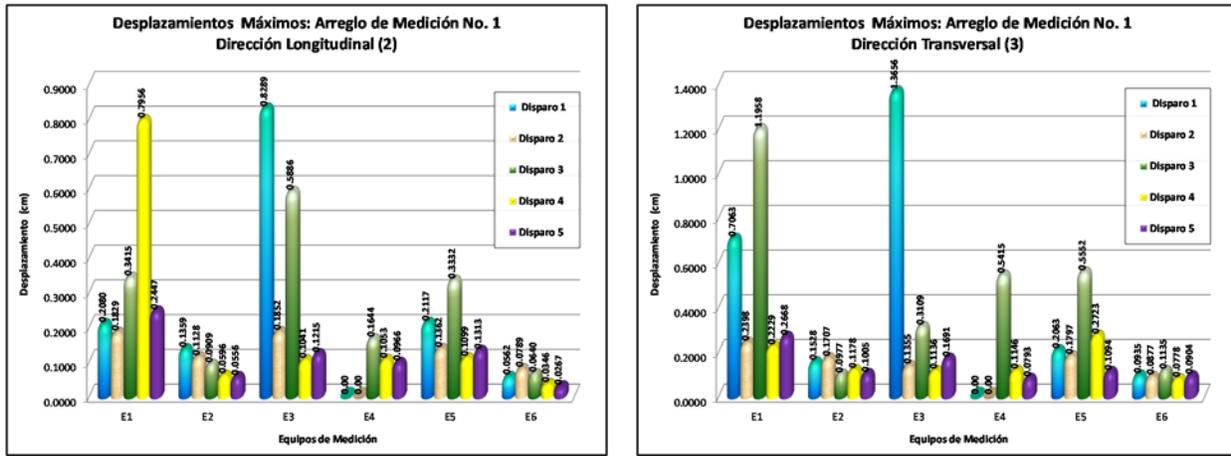


Fig. 5.8. Desplazamientos Máximos Absolutos en el Arreglo No.1, Dirección Long-(2) y Tras-(3).

Tabla 5.10. Relación de Desplazamientos Máximos absolutos del Arreglo No.2.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Desplazamientos Máximos (cm)			
				Dirección Longitudinal (2)		Dirección Transversal (3)	
				Desplazamiento	Tiempo (2)	Desplazamiento	Tiempo (3)
1	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17601	0.2075	14:52:33	0.1922	14:50:06
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17601	0.2116	14:53:38	0.1924	14:53:46
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17601	0.2136	14:45:51	0.1718	14:51:10
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17601	0.0525	14:46:37	0.0408	14:49:38
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17601	0.1586	14:54:32	0.1003	14:50:48
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17601	0.0523	14:50:00	0.0540	14:54:09
2	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17602	0.2091	15:10:43	0.2454	15:10:24
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17602	0.2393	15:11:07	0.8182	15:11:01
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17602	0.2153	15:03:28	0.2225	15:08:02
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17602	0.0513	15:08:09	0.0637	15:04:05
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17602	0.0840	15:09:54	0.1006	15:08:57
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17602	0.0556	15:11:12	0.0562	15:04:13
3	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17603	0.7936	15:22:24	0.2098	15:28:51
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17603	0.3651	15:20:14	0.1043	15:20:20
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17603	0.2388	15:20:37	0.1196	15:29:09
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17603	0.0488	15:23:31	0.1024	15:21:21
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17603	0.0914	15:25:47	0.0992	15:26:53
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17603	0.0548	15:26:41	0.0555	15:26:41
4	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17604	0.1833	15:58:25	0.1949	15:51:42
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17604	0.1597	15:58:14	0.2536	15:58:22
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17604	0.1703	15:55:23	0.1626	15:54:43
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17604	0.0640	15:58:00	0.1058	15:58:35
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17604	0.1031	15:54:21	0.1139	15:54:50
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17604	0.0474	15:54:46	0.0496	15:52:52
5	E1	Cubierta 1, Columna A4	E1_17605	0.1584	16:22:26	0.2004	16:26:22
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17605	0.1471	16:27:37	0.2181	16:28:21
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17605	0.2129	16:26:50	0.1846	16:29:13
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	E4_17605	0.0520	16:28:54	0.1021	16:29:12
	E5	Cubierta 1, Columna B1	E5_17605	0.1067	16:23:37	0.1030	16:28:57
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17605	0.0383	16:24:20	0.0446	16:22:44

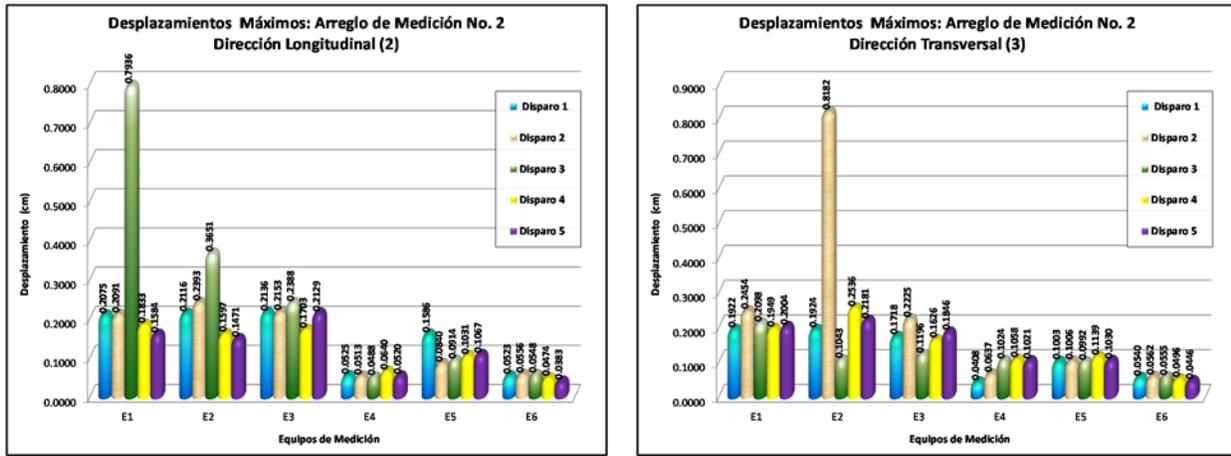


Fig. 5.9. Desplazamientos Máximos absolutos, Arreglo No.2, Dirección Long-(2) y Tras-(3).

Tabla 5.11. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos del Arreglo No.3.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Desplazamientos Máximos (cm)			
				Dirección Longitudinal (2)		Dirección Transversal (3)	
				Desplazamiento	Tiempo (2)	Desplazamiento	Tiempo (3)
1	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17701	0.1283	17:48:55	0.5847	17:47:54
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17701	0.1960	17:48:19	0.5063	17:47:31
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17701	0.1594	17:48:56	0.8005	17:49:55
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17701	0.2331	17:49:19	0.1130	17:44:35
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17701	0.0423	17:48:36	0.0685	17:49:13
2	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17702	0.5209	18:02:03	0.2037	17:59:30
	E2	Cubierta 1, Columna B4	E2_17702	0.1002	17:57:59	0.3326	17:58:14
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17702	0.0983	17:54:53	0.3221	17:53:39
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17702	0.2051	18:04:54	0.1187	18:02:27
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17702	0.0645	18:00:50	0.0770	17:58:40
3	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17703	0.1977	18:10:11	0.1921	18:05:21
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17703	0.0682	18:09:30	0.3047	18:09:43
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17703	0.1152	18:06:35	0.5317	18:05:42
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17703	0.1676	18:12:16	0.1334	18:08:36
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17703	0.0365	18:08:49	0.0586	18:11:30
4	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17704	0.1321	18:25:53	0.2020	18:23:01
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17704	0.0635	18:25:35	0.2098	18:17:42
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17704	0.3874	18:20:56	0.1833	18:22:46
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17704	0.2277	18:18:16	0.1155	18:25:01
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17704	0.0729	18:25:41	0.0627	18:22:17
5	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17705	0.1884	18:31:06	0.7740	18:30:01
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17705	0.0706	18:29:15	0.4604	18:28:14
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17705	0.2127	18:37:43	0.7102	18:37:42
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17705	0.2299	18:30:39	0.1111	18:35:04
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17705	0.0551	18:33:51	0.0623	18:31:39
6	E1	Cubierta 2, Columna A4	E1_17706	0.1780	18:48:29	0.2236	18:44:27
	E2	Cubierta 2, Columna B4	E2_17706	0.0692	18:44:23	0.1626	18:44:40
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17706	0.0821	18:43:41	0.1101	18:42:20
	E5	Cubierta 2, Columna B1	E5_17706	0.2260	18:46:44	0.3624	18:44:35
	E6	Cubierta 2, Columna A1	E6_17706	0.0670	18:45:00	0.0525	18:42:25

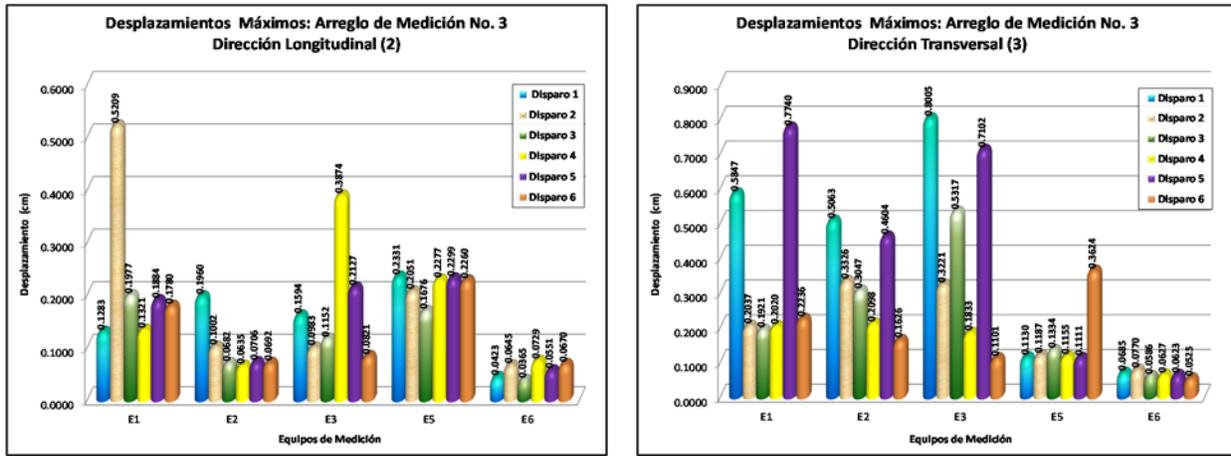


Fig. 5.10. Desplazamientos Máximos Absolutos, Arreglo No.3, Dirección Long-(2) y Tras-(3).

Tabla 5.12. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos del Arreglo No. 4.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Desplazamientos Máximos (cm)			
				Dirección Longitudinal (2)		Dirección Transversal (3)	
				Valor	Tiempo (2)	Valor	Tiempo (3)
1	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17801	0.7171	15:08:39	0.2457	15:11:34
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17801	0.2636	15:18:28	0.4125	15:18:18
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17801	0.1766	15:12:29	0.1862	15:19:33
2	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17802	0.2028	15:32:47	0.1560	15:33:35
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17802	0.3302	15:32:41	0.3791	15:27:15
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17802	0.1308	15:33:51	0.1463	15:29:30
3	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17803	0.7073	15:44:04	0.2329	15:43:08
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17803	0.2052	15:43:39	0.1906	15:40:02
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17803	0.3387	15:42:47	0.1392	15:43:02
4	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17804	0.2825	15:52:59	0.1971	15:53:54
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17804	0.3061	15:56:14	0.4306	15:51:11
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17804	0.1204	15:56:03	0.1598	15:58:04
5	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	E1_17805	0.5327	16:08:34	0.3435	16:08:18
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	E2_17805	0.3575	16:08:37	0.4801	16:08:58
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	E3_17805	0.2715	16:08:48	0.1599	16:04:11

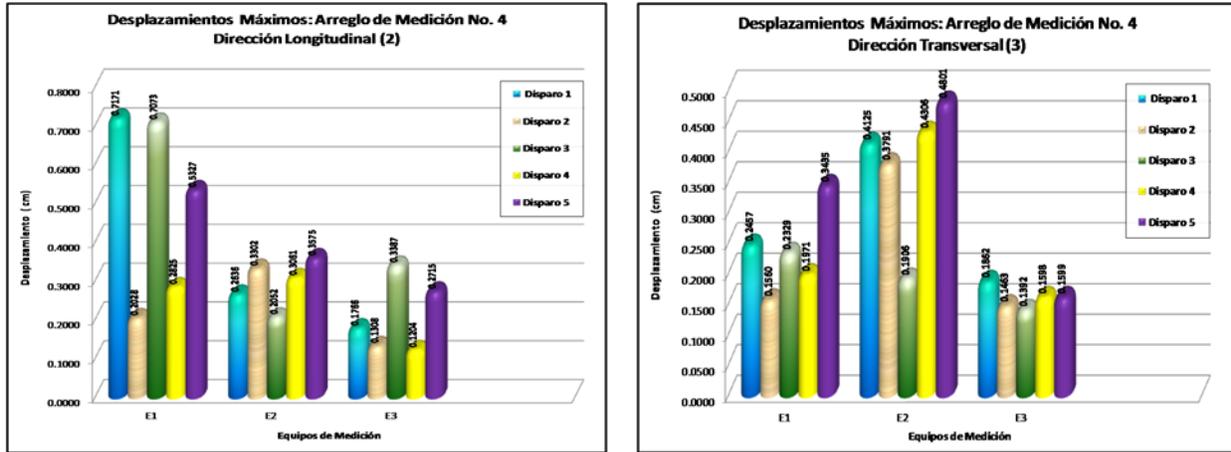


Fig. 5.11. Desplazamientos Máximos Absolutos, Arreglo No.4, Dirección Long-(2) y Tras-(3).

Tabla 5.13. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos del Arreglo No.5.

No.de Medición	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Nombre del registro	Desplazamientos Máximos (cm)			
				Dirección Longitudinal (2)		Dirección Transversal (3)	
				Longitudinal (2)	Tiempo (2)	Transversal (3)	Tiempo (3)
1	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17901	0.1557	16:37:24	0.1478	16:34:25
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17901	0.2355	16:36:29	0.4637	16:35:48
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17901	0.3621	16:37:26	0.7338	16:37:25
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17901	0.3676	16:37:39	0.0948	16:37:20
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17901	0.1743	16:32:56	0.5690	16:32:38
2	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17902	0.2975	16:42:31	0.4964	16:42:57
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17902	0.1271	16:44:00	0.2116	16:45:15
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17902	-----	16:46:28	-----	16:47:13
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17902	0.3481	16:45:45	0.3228	16:45:45
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17902	0.2409	16:43:11	0.3710	16:43:11
3	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17903	0.1626	17:04:23	0.1635	17:08:53
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17903	0.4747	17:01:58	0.4311	17:01:50
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17903	0.4252	17:08:49	1.1282	17:08:49
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17903	0.1138	17:08:52	0.0787	17:02:47
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17903	0.0746	17:08:51	0.1384	17:01:49
4	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17904	0.1933	17:21:10	0.1779	17:21:45
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17904	0.3477	17:21:14	0.3038	17:20:49
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17904	0.3625	17:19:26	0.4001	17:19:34
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17904	0.6700	17:13:43	0.9064	17:14:49
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17904	0.1486	17:13:56	0.2295	17:14:12
5	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	E1_17905	0.2569	17:34:13	0.2773	17:30:05
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	E2_17905	0.7760	17:32:19	0.5798	17:32:19
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17905	-----	17:31:07	-----	17:30:26
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	E5_17905	0.1326	17:35:07	0.0943	17:33:24
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	E6_17905	0.0426	17:31:09	0.0826	17:33:46

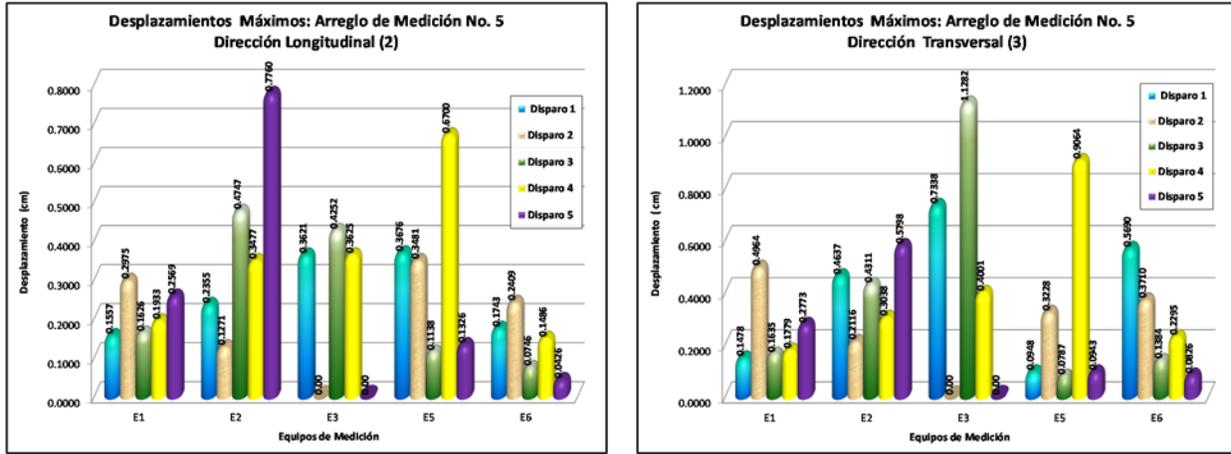


Fig. 5.12. Desplazamientos Máximos Absolutos, Arreglo No.5, Dirección Long-(2) y Tras-(3).

En las tablas 5.14 a 5.19 y 5.20 a 5.25 se presentan los desplazamientos máximos absolutos obtenidos del proceso numérico de las señales para el Arreglo No.6 y No.7, respectivamente. Es de interés mencionar que los desplazamientos calculados se obtuvieron expresados como fracción de la gravedad, multiplicados por (s<sup>2</sup>), por lo que para convertirlos a (cm) se tuvieron que multiplicar por 981. Así mismo en las Figs. 5.13 a 5.18 y 5.19 a 5.24, se presentan gráficamente los resultados para los Arreglos No.6 y No.7 respectivamente.

Tabla 5.14. Desplazamientos máximos Absolutos del equipo E1, Arreglo No.6.

Equipo E1	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.6 ]			
	Fracción de G*s <sup>2</sup>		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.000388	0.0001967	0.381	0.193
2	0.0003236	0.0002689	0.317	0.264
3	0.0002451	0.0002321	0.240	0.228
4	0.0003007	0.0001432	0.295	0.140
5	0.0004397	0.0002234	0.431	0.219
6	0.0002055	0.0001938	0.202	0.190
7	0.0002186	0.0001908	0.214	0.187
8	0.0002122	0.0001917	0.208	0.188
9	0.0001954	0.0001942	0.192	0.191
10	0.0002191	0.0001666	0.215	0.163

Tabla 5.15. Desplazamientos máximos del equipo E2, Arreglo No.6.

Equipo E2	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.6 ]			
	Fracción de G*s <sup>2</sup>		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.00005932	0.000071	0.058	0.070
2	0.00005587	0.00004586	0.055	0.045
3	0.00006682	0.0000611	0.066	0.060
4	0.00004089	0.0000685	0.040	0.067
5	0.00004679	0.0000842	0.046	0.083
6	0.00004892	0.00005138	0.048	0.050
7	0.00004764	0.0000674	0.047	0.066
8	0.00005212	0.0000677	0.051	0.066
9	0.00005167	0.0000578	0.051	0.057
10	0.0000979	0.0000641	0.096	0.063

Tabla 5.16. Desplazamientos máximos del equipo E3, Arreglo No.6.

Equipo E3	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.6 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0002521	0.0002651	0.247	0.260
2	0.0002252	0.000282	0.221	0.277
3	0.000582	0.0002408	0.571	0.236
4	0.000554	0.0004368	0.543	0.429
5	0.0002683	0.0002259	0.263	0.222
6	0.0002752	0.000169	0.270	0.166
7	0.0004812	0.0003435	0.472	0.337
8	0.0001968	0.0001926	0.193	0.189
9	0.0002313	0.0001212	0.227	0.119
10	0.0002038	0.000115	0.200	0.113

Tabla 5.17. Desplazamientos máximos del equipo E4, Arreglo No.6.

Equipo E4	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.6 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.00005467	0.00005344	0.054	0.052
2	0.00005046	0.0001089	0.050	0.107
3	0.0000847	0.0001063	0.083	0.104
4	0.00004675	0.0000721	0.046	0.071
5	0.00006338	0.00004767	0.062	0.047
6	---	---	---	---
7	0.000111	0.0001746	0.109	0.171
8	0.0000786	0.0000803	0.077	0.079
9	0.0000515	0.0000507	0.051	0.050
10	0.00005245	0.00004831	0.051	0.047

Tabla 5.18. Desplazamientos máximos del equipo E5, Arreglo No.6.

Equipo E5	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.6 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0001608	0.000077	0.158	0.076
2	0.0001031	0.0001238	0.101	0.121
3	0.0000928	0.0001052	0.091	0.103
4	0.0001919	0.0001666	0.188	0.163
5	0.0001078	0.0001139	0.106	0.112
6	0.0001191	0.0001141	0.117	0.112
7	0.0001811	0.0000991	0.178	0.097
8	0.0002078	0.0001859	0.204	0.182
9	0.0000969	0.0001205	0.095	0.118
10	0.0000825	0.0000873	0.081	0.086

Tabla 5.19. Desplazamientos máximos del equipo E6, Arreglo No.6.

Equipo E6	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.6 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0000359	0.00003893	0.035	0.038
2	0.00004213	0.00003585	0.041	0.035
3	0.0000457	0.00004091	0.045	0.040
4	0.00004344	0.0000396	0.043	0.039
5	0.00005118	0.00004136	0.050	0.041
6	0.00004126	0.0000592	0.040	0.058
7	0.0001108	0.000092	0.109	0.090
8	0.0000985	0.000089	0.097	0.087
9	0.00004399	0.000066	0.043	0.065
10	0.00004963	0.00004745	0.049	0.047

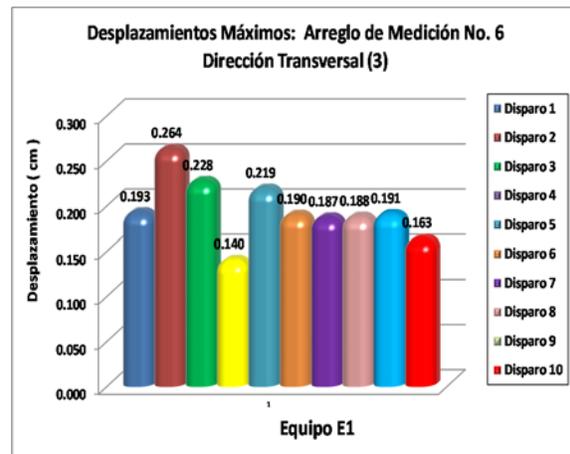
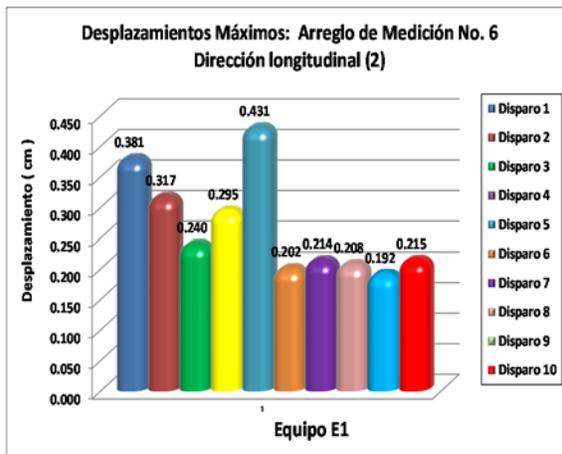


Fig. 5.13. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E1, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.6.

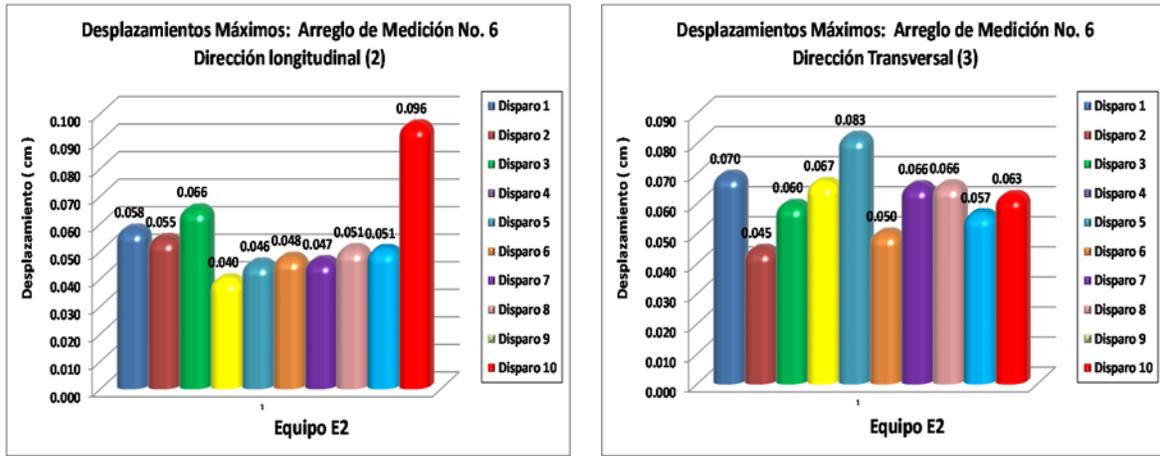


Fig. 5.14. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E2, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.6.

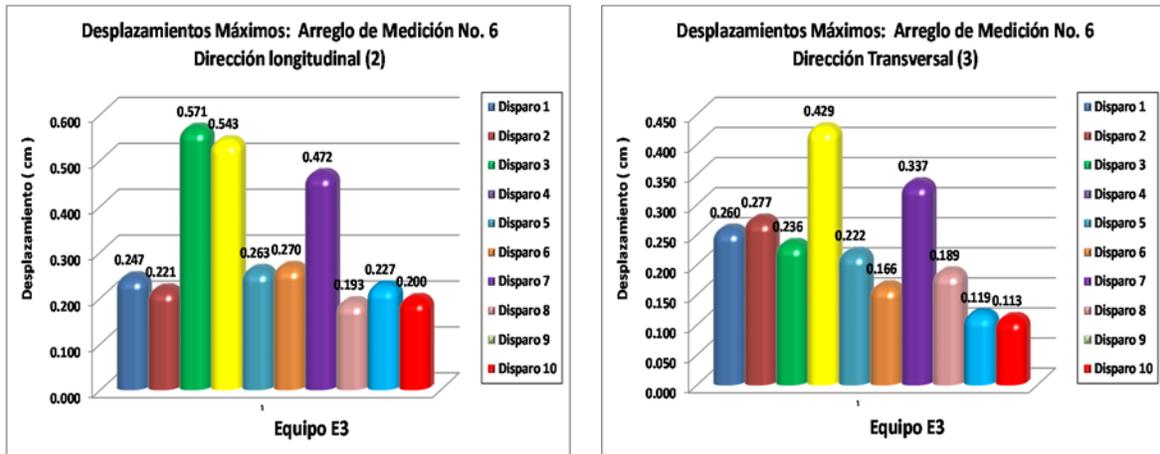


Fig. 5.15. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E3, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.6.

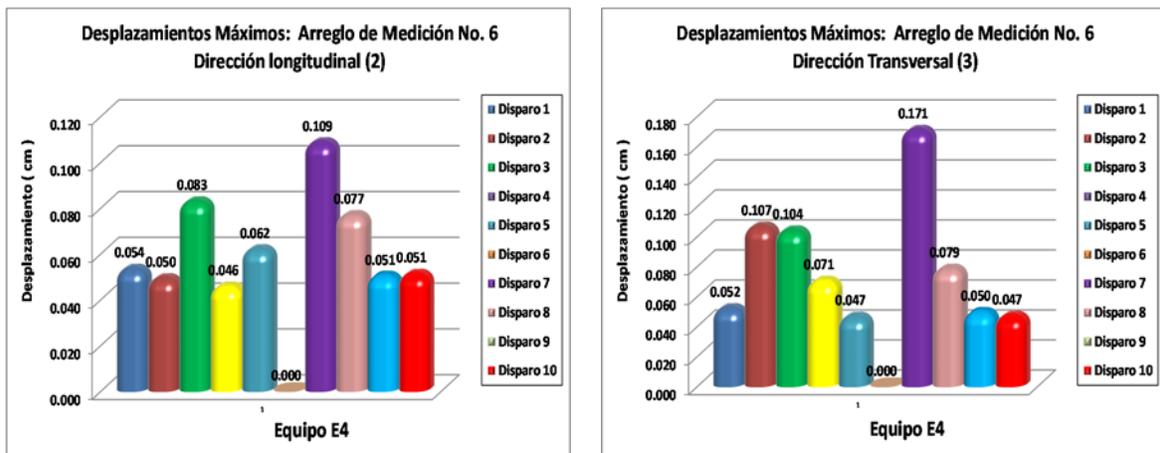


Fig. 5.16. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E4, las direcciones Long-(2) y Tran-(3), del Arreglo No.6. El disparo 6 del E4, fue omitido por presentar un pulso de aceleración muy grande, ocasionada por ruido blanco producto de una eventualidad en el momento del registro.

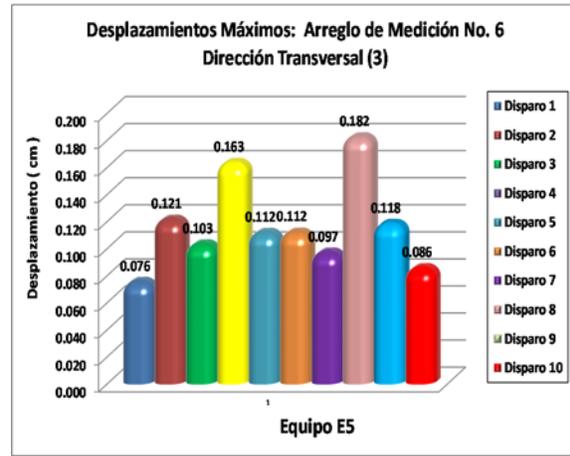
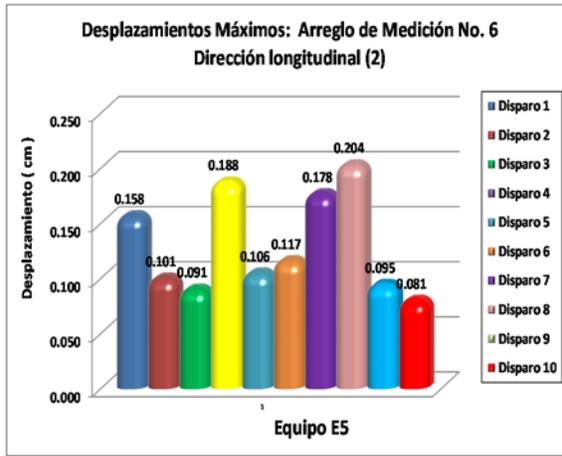


Fig. 5.17. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E5, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.6.

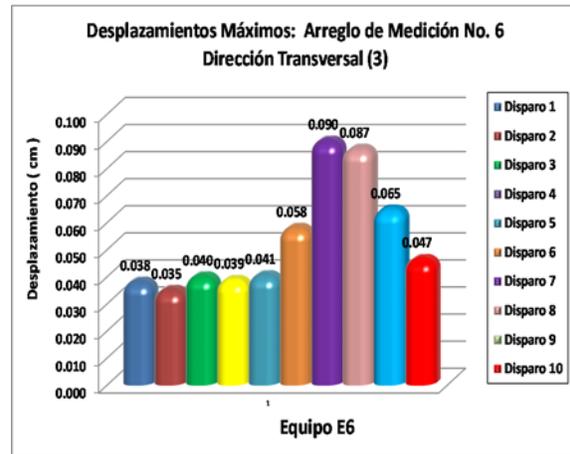
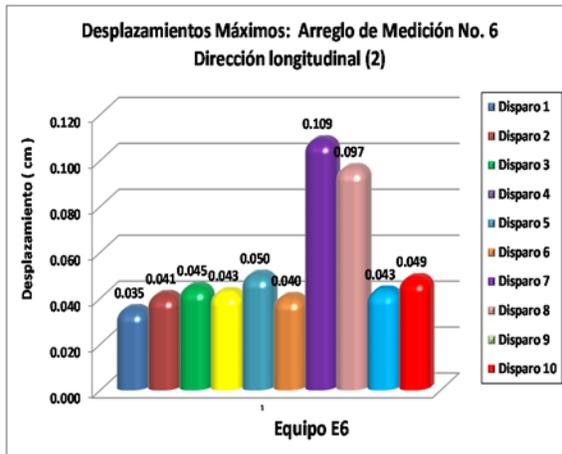


Fig. 5.18. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E6, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.6.

Tabla 5.20. Desplazamientos máximos del equipo E1, Arreglo No.7.

Equipo E1	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.7 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0001692	0.0002288	0.166	0.224
2	0.0002167	0.0001495	0.213	0.147
3	0.000669	0.0001788	0.656	0.175
4	0.0001645	0.000152	0.161	0.149
5	0.0001901	0.0001813	0.186	0.178
6	0.0001707	0.0002419	0.167	0.237
7	0.0001937	0.0001789	0.190	0.176
8	0.0001406	0.0001626	0.138	0.160
9	0.0001333	0.0001522	0.131	0.149
10	0.0001235	0.000617	0.121	0.605

Tabla 5.21. Desplazamientos máximos del equipo E2, Arreglo No.7.

Equipo E2	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.7 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0000621	0.00004407	0.061	0.043
2	0.0000556	0.00003217	0.055	0.032
3	0.0000685	0.00003776	0.067	0.037
4	0.0000518	0.0000462	0.051	0.045
5	0.0000601	0.0000624	0.059	0.061
6	0.00004048	0.0000553	0.040	0.054
7	0.00004843	0.00003376	0.048	0.033
8	0.00005011	0.00003788	0.049	0.037
9	0.00004923	0.00004871	0.048	0.048
10	0.0000355	0.00003836	0.035	0.038

Tabla 5.22. Desplazamientos máximos del equipo E3, Arreglo No.7.

Equipo E3	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.7 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.000099	0.000109	0.097	0.107
2	0.0000955	0.000312	0.094	0.306
3	0.0000776	0.0001082	0.076	0.106
4	0.0000821	0.0000929	0.081	0.091
5	0.000536	0.0000933	0.526	0.092
6	0.0000895	0.0000988	0.088	0.097
7	0.00007	0.0001062	0.069	0.104
8	0.0000814	0.0001309	0.080	0.128
9	0.000095	0.0000832	0.093	0.082
10	0.0000814	0.0000916	0.080	0.090

Tabla 5.23. Desplazamientos máximos del equipo E4, Arreglo No.7.

Equipo E4	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.7 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.00003499	0.00003982	0.034	0.039
2	0.00003626	0.0001011	0.036	0.099
3	0.00002849	0.00002914	0.028	0.029
4	0.00004273	0.00004283	0.042	0.042
5	0.00005162	0.0000609	0.051	0.060
6	0.00004838	0.0000586	0.047	0.057
7	0.00003469	0.00004623	0.034	0.045
8	0.00004373	0.0000533	0.043	0.052
9	0.00004287	0.0000949	0.042	0.093
10	0.00003246	0.00003008	0.032	0.030

Tabla 5.24. Desplazamientos máximos del equipo E5, Arreglo No.7.

Equipo E5	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.7 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0001331	0.000083	0.131	0.081
2	0.0001168	0.0001072	0.115	0.105
3	0.0001468	0.0004014	0.144	0.394
4	0.0001192	0.000098	0.117	0.096
5	0.0001037	0.0001193	0.102	0.117
6	0.0001326	0.0001073	0.130	0.105
7	0.0001355	0.0000813	0.133	0.080
8	0.0001061	0.000534	0.104	0.524
9	0.0004408	0.0000919	0.432	0.090
10	0.0001323	0.0001165	0.130	0.114

Tabla 5.25. Desplazamientos máximos del equipo E6, Arreglo No.7.

Equipo E6	Desplazamientos máximos [ Arreglo No.7 ]			
	Fracción de G*s2		cm	
Disparo	Longitudinal (2)	Transversal (3)	Longitudinal (2)	Transversal (3)
1	0.0000578	0.00004514	0.057	0.044
2	0.00005391	0.00005069	0.053	0.050
3	0.00004904	0.0000642	0.048	0.063
4	0.0000588	0.0000603	0.058	0.059
5	0.0000532	0.0000679	0.052	0.067
6	0.0000377	0.00003712	0.037	0.036
7	0.0000492	0.00005231	0.048	0.051
8	0.0000654	0.0000666	0.064	0.065
9	0.0002329	0.0001997	0.228	0.196
10	0.0000792	0.0000646	0.078	0.063

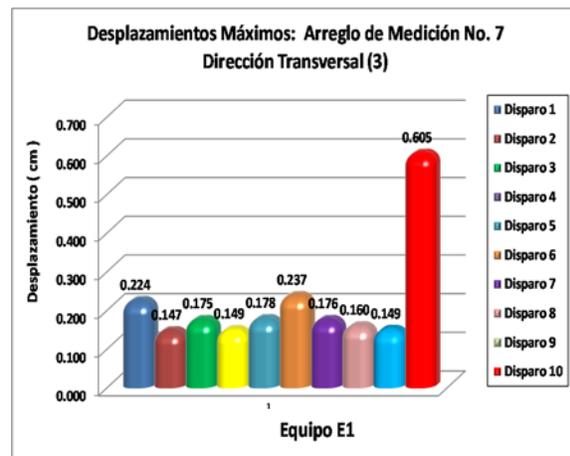
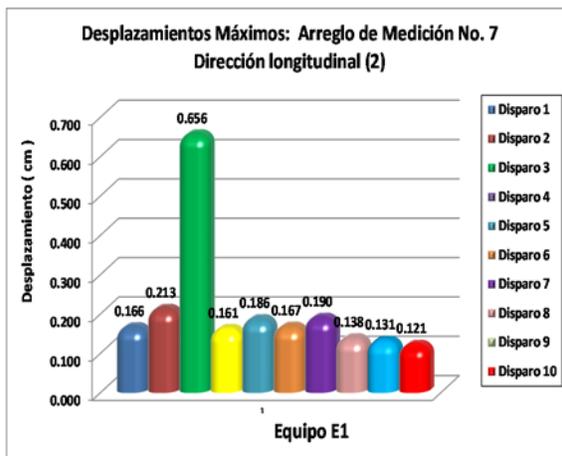


Fig. 5.19. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E1, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.7.

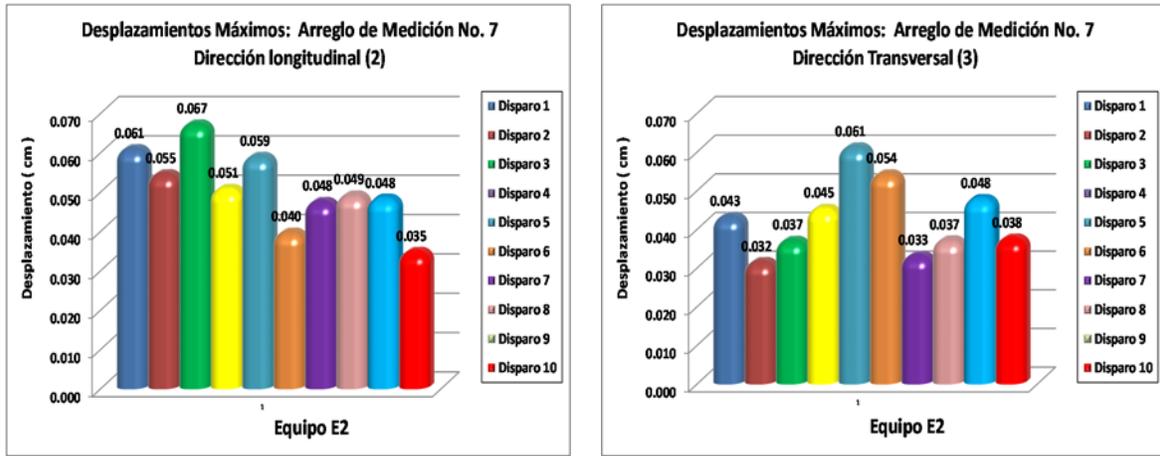


Fig. 5.20. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E2, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.7.

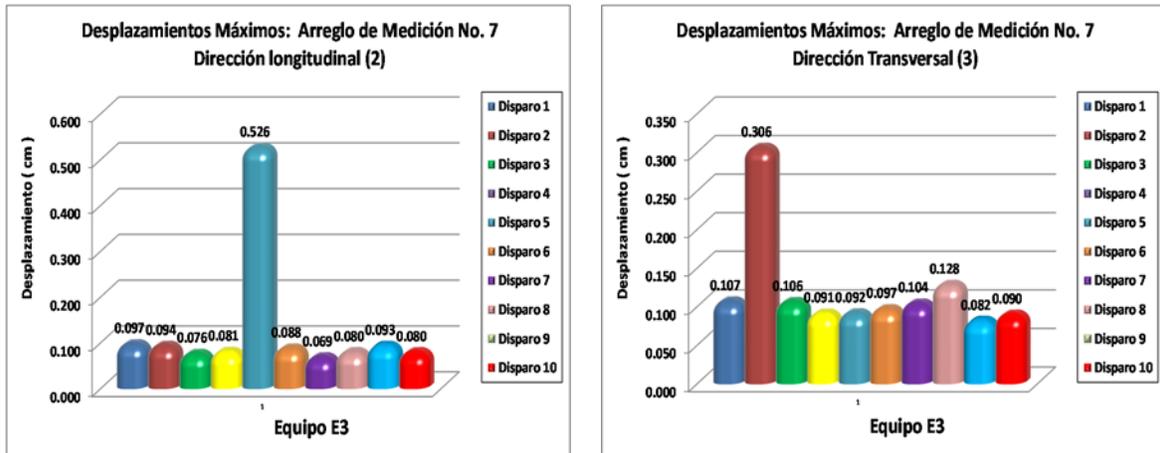


Fig. 5.21. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E3, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.7.

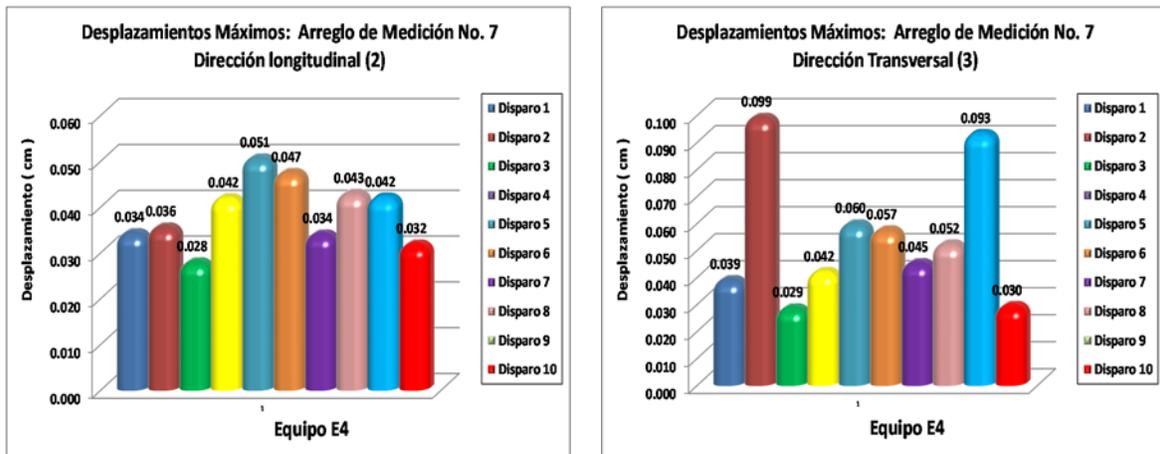


Fig. 5.22. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E4, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.7.

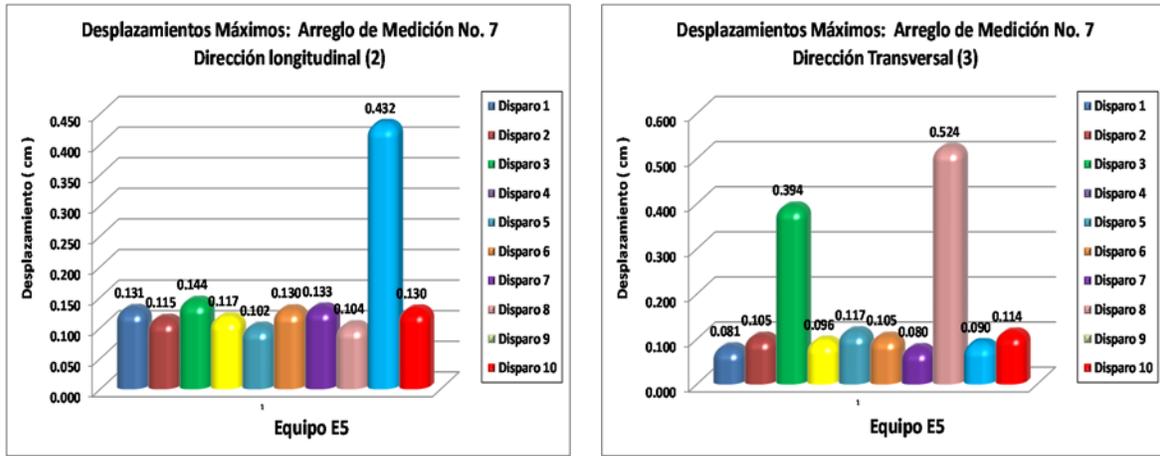


Fig. 5.23. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E5, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.7.

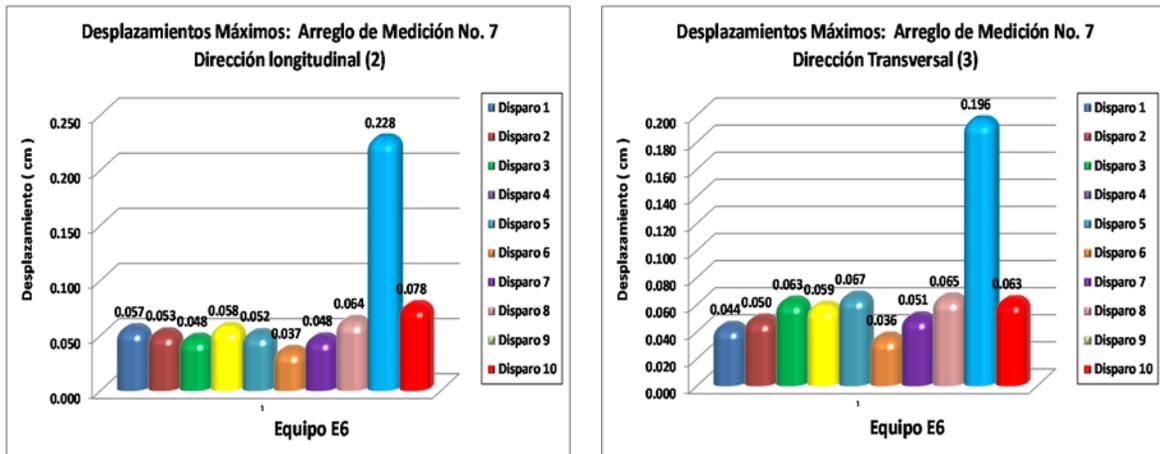


Fig. 5.24. Desplazamientos máximos obtenidos del equipo E6, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3), del Arreglo No.7.

### 5.4.2 Desplazamientos máximos absoluto promedio

En algunos casos resulta de interés práctico conocer los valores promedio correspondientes a los desplazamientos máximos, ya que dichos valores pueden ser utilizados para compararlos con los criterios o reglamentación establecida, y poder determinar si son aceptables o no. Por lo que, en las tablas 5.26 a 5.30, se presentan los valores de los desplazamientos máximos absoluto promedio correspondientes a cada uno de los cinco arreglos instrumentados en la primera etapa del programa de mediciones. También se muestra su representación gráfica en la dirección longitudinal (2) y transversal (3) en las figs. 5.25 (a), 5.25 (b), 5.26, 5.27, 5.28 y 5.29.

Tabla 5.26. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio del Arreglo No.1.

No.de Mediciones	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Desplazamientos Promedio (cm)	
			Dirección	
			Longitudinal (2)	Transversal (3)
3	E1	Cubierta 2, Columna A1	0.2441	0.7140
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	0.1132	0.1404
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	0.5343	0.6040
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	0.0548	0.1805
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	0.2270	0.3138
	E6	Cubierta 1,Columna A1	0.0663	0.0982
No.de Mediciones	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Dirección	
			Dirección	
			Longitudinal (2)	Transversal (3)
2	E1	Cubierta 2, Columna A1	0.5201	0.2449
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	0.0576	0.1091
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	0.1128	0.1414
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	0.1009	0.0969
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	0.1206	0.1909
	E6	Cubierta 1,Columna A1	0.0307	0.0841

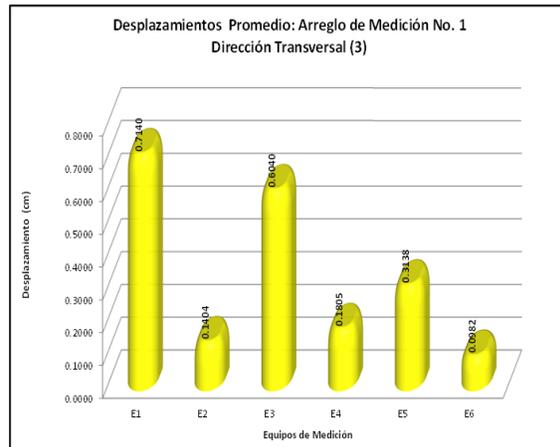
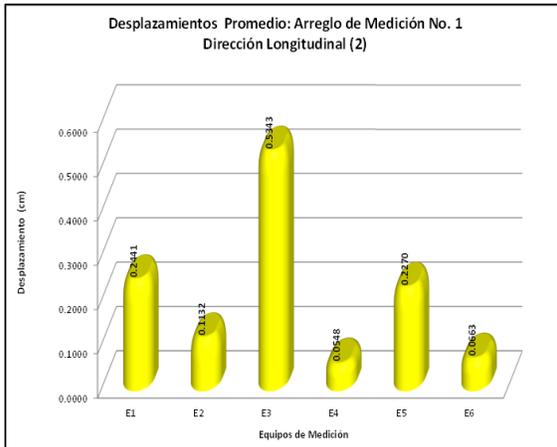


Fig. 5.25 (a). Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio, Arreglo No.1, Dirección Longitudinal (2) y Transversal (3), en el promedio se incluyen los disparos 1,2 y 3.

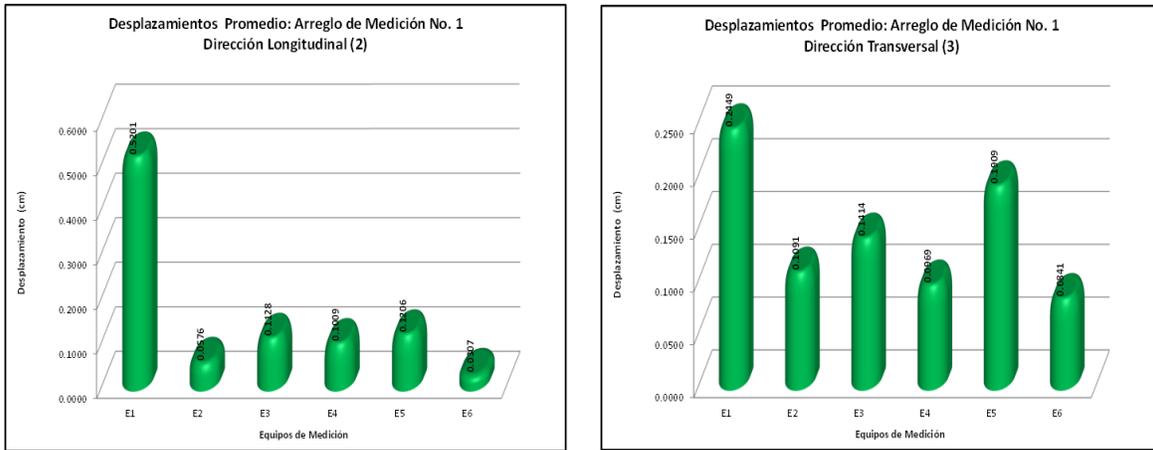


Fig. 5.25 (b). Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio, Arreglo No.1, Dirección Longitudinal (2) y Transversal (3), en el promedio se incluyen los disparos 4 y 5.

Tabla 5.27. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio del Arreglo No.2.

No.de Mediciones	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Desplazamientos Promedio (cm)	
			Dirección	
			Longitudinal (2)	Transversal (3)
5	E1	Cubierta 1, Columna A4	0.3104	0.2086
	E2	Cubierta 1, Columna B4	0.2246	0.3173
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	0.2102	0.1722
	E4	Cubierta 1, Voladizo entre eje 1 y 2	0.0537	0.0829
	E5	Cubierta 1, Columna B1	0.1088	0.1034
	E6	Cubierta 1, Columna A1	0.0497	0.0520

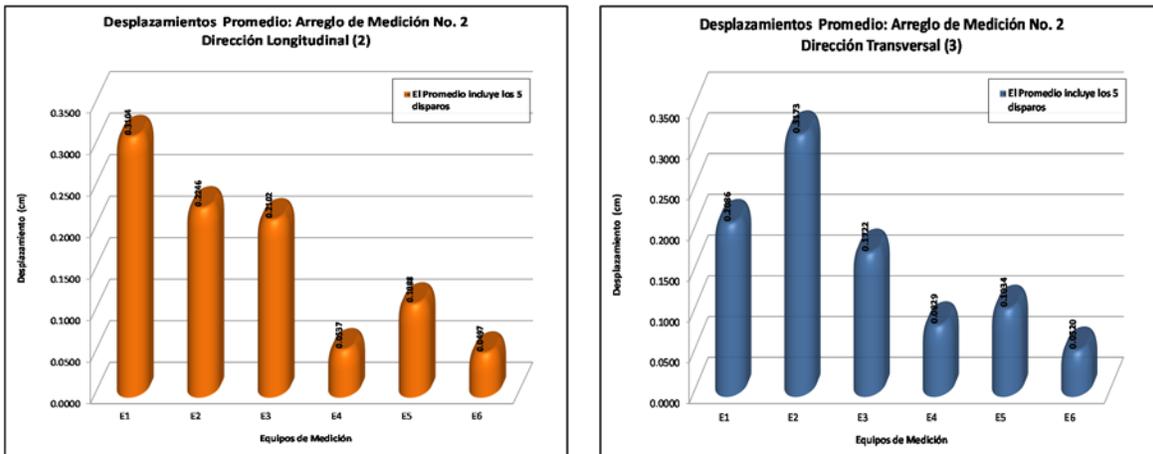


Fig. 5.26. Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio, Arreglo No.2, Dirección Longitudinal (2) y Transversal (3).

Tabla 5.28. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio del Arreglo No.3.

No.de Mediciones	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Desplazamientos Promedio (cm)	
			Dirección	
			Longitudinal (2)	Transversal (3)
6	E1	Cubierta 2, Columna A4	0.2242	0.3633
	E2	Cubierta 2, Columna B4	0.0946	0.3294
	E3	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	0.1758	0.4430
	E5	Cubierta 2, Columna B1	0.2149	0.1590
	E6	Cubierta 2, Columna A1	0.0564	0.0636

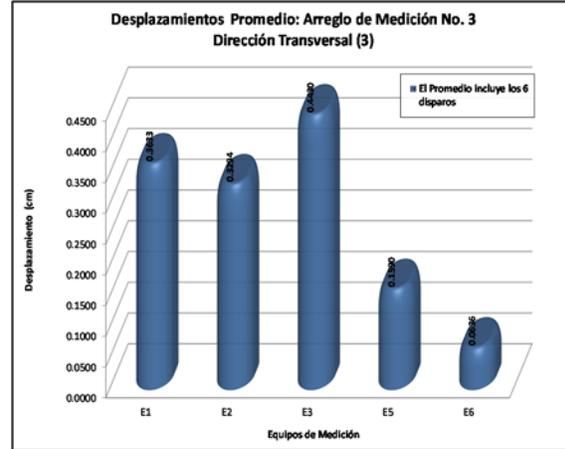
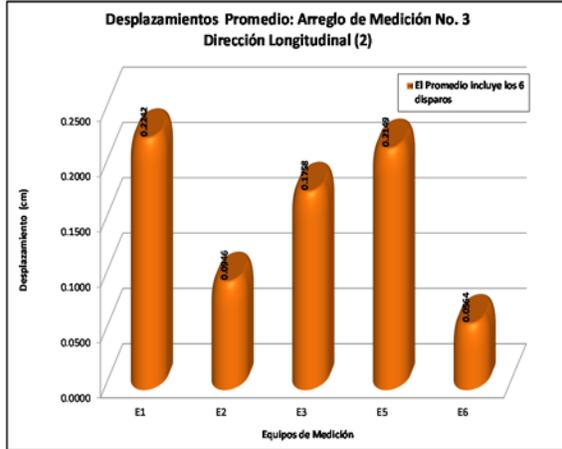


Fig. 5.27. Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio, Arreglo No.3, Dirección Longitudinal (2) y Transversal (3).

Tabla 5.29. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio del Arreglo No.4.

No.de Mediciones	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Desplazamientos Promedio (cm)	
			Dirección	
			Longitudinal (2)	Transversal (3)
5	E1	Torre de perforación, Base-esquina-Este	0.4885	0.2350
	E2	Primer nivel de pasillos, lado SE	0.2925	0.3786
	E3	Torre de perforación, Base-esquina-Oste	0.2076	0.1583

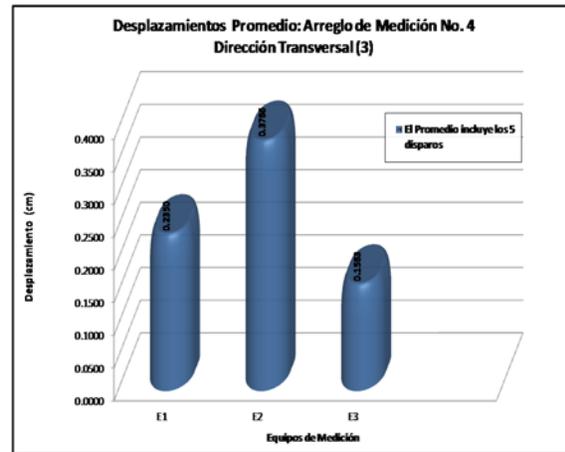
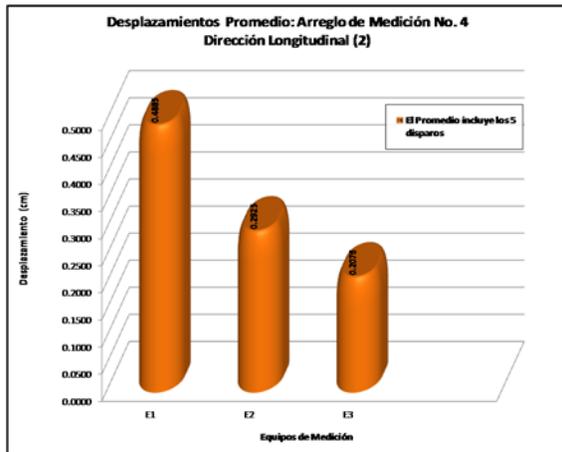


Fig. 5.28. Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio, Arreglo No.4, Dirección Longitudinal (2) y Transversal (3).

Tabla 5.30. Relación de Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio del Arreglo No.5.

No.de Mediciones	Nombre del Equipo	Localización del Punto de medición	Desplazamientos Promedio (cm)	
			Dirección	
			Longitudinal (2)	Transversal (3)
5	E1	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A3	0.2132	0.2526
	E2	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B4	0.3922	0.3980
	E3	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	0.3832	0.7540
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna B2	0.3264	0.2994
	E6	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A2	0.1362	0.2781

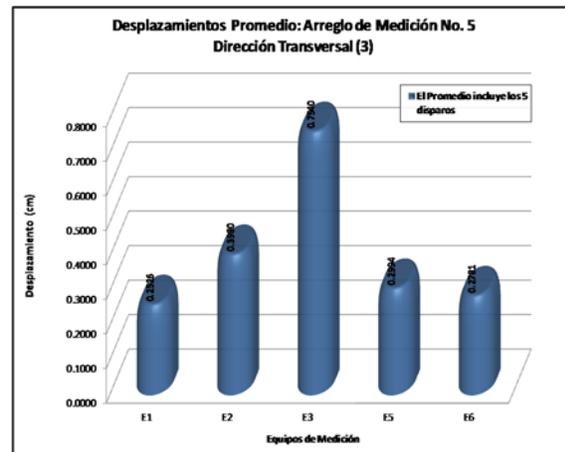
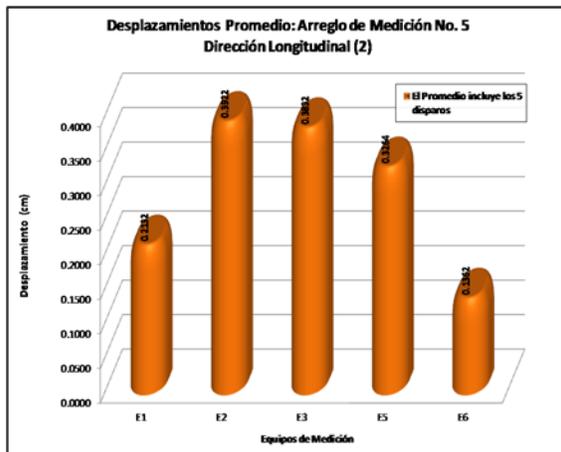


Fig. 5.29. Desplazamientos Máximos Absolutos Promedio, Arreglo No.5, Dirección Longitudinal (2) y Transversal (3).

**5.4.3 Desplazamientos absolutos simultáneos al desplazamiento máximo**

En la tabla 5.31, se presenta la relación de los desplazamientos absolutos simultáneos al desplazamiento máximo, para los 5 disparos del Arreglo No.1, los cuales también se grafican en las figs. 5.30 a 5.39. La obtención de estos desplazamientos permitirá más adelante, calcular los desplazamientos relativos de las estructuras en estudio.

*Tabla 5.31. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1.*

No. de Medición (Disparo)	Nombre del Equipo	Localización del Punto de Medición	Nombre del Registro	Desplazamientos Simultáneos al Desplazamiento Máximo (cm)			
				Dirección		Dirección	
				Longitudinal (2)	Tiempo (2)	Transversal (3)	Tiempo (3)
1	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17501	0.0626	16:29:11	0.1501	16:28:48
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17501	0.0058		0.0758	
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17501	0.8289		1.3656	
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17501	-----		-----	
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17501	0.0242		0.0609	
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17501	0.0019		0.0195	
2	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17502	0.0705	16:57:09	0.2398	16:54:49
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17502	0.0115		0.0083	
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17502	0.1852		0.0788	
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17502	-----		-----	
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17502	0.0026		0.0833	
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17502	0.0031		0.0056	
3	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_17503	0.0275	17:06:06	1.1958	17:12:00
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_17503	0.0212		0.0293	
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_17503	0.5886		0.0102	
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_17503	0.0129		0.0365	
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_17503	0.1289		0.0055	
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_17503	0.0125		0.0247	
4	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_176-4	0.7956	10:50:39	0.1076	10:50:35
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_176-4	0.0022		0.0240	
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_176-4	0.0062		0.0363	
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_176-4	0.0247		0.0328	
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_176-4	0.0096		0.2723	
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_176-4	0.0046		0.0008	
5	E1	Cubierta 2, Columna A1	E1_176-5	0.2447	11:17:10	0.2668	11:16:38
	E2	Cubierta 2, entre ejes 2-3 y A-B	E2_176-5	0.0054		0.0218	
	E3	Cubierta 1, entre ejes 2-3 y A-B	E3_176-5	0.0139		0.0373	
	E4	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, entre ejes 2-3 y A-B	E4_176-5	0.0191		0.0166	
	E5	Zona de pasillos, acceso al embarcadero, Columna A1	E5_176-5	0.0172		0.0292	
	E6	Cubierta 1, Columna A1	E6_176-5	0.0066		0.0073	

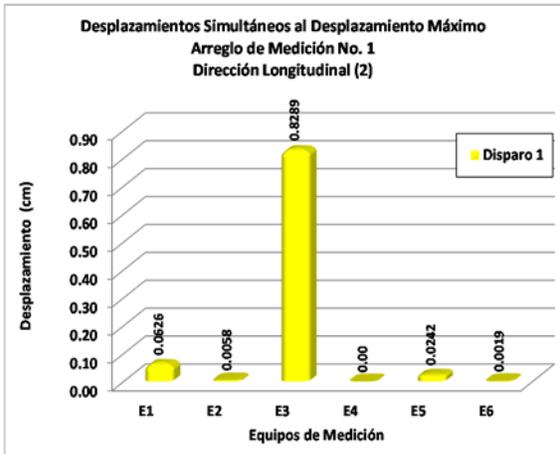


Fig. 5.30. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Long-(2), Disparo 1.

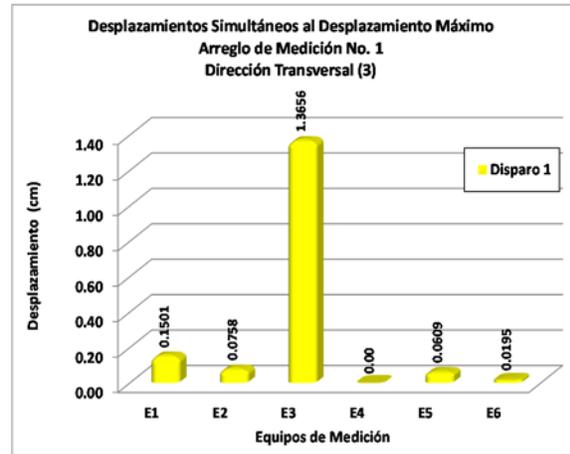


Fig. 5.31. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Trans-(3), Disparo 1.

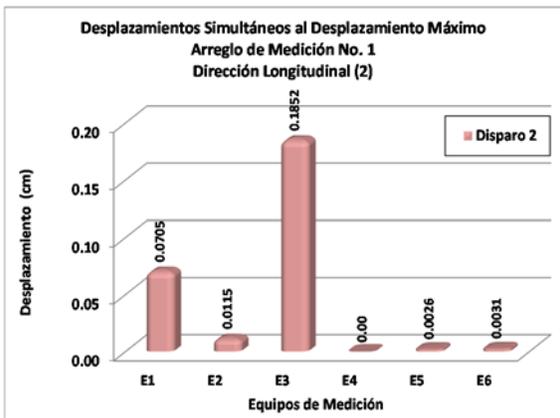


Fig. 5.32. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Long-(2), Disparo 2.

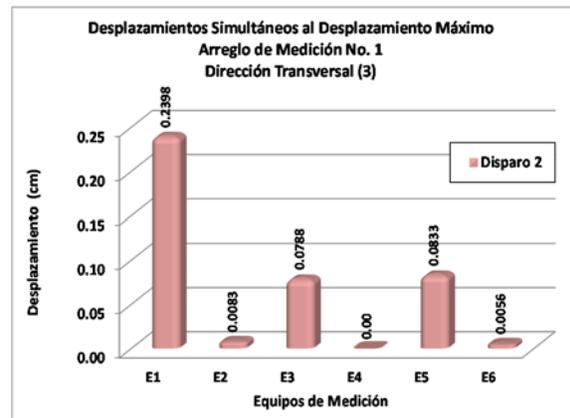


Fig. 5.33. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Trans-(3), Disparo 2.

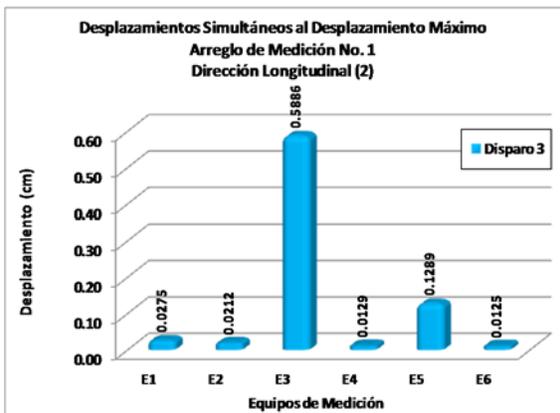


Fig. 5.34. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Long-(2), Disparo 3.

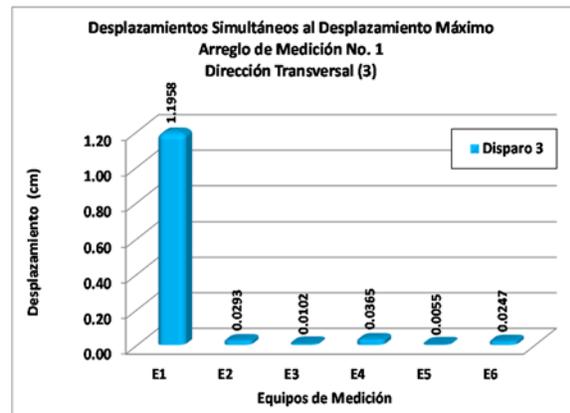


Fig. 5.35. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Trans-(3), Disparo 3.

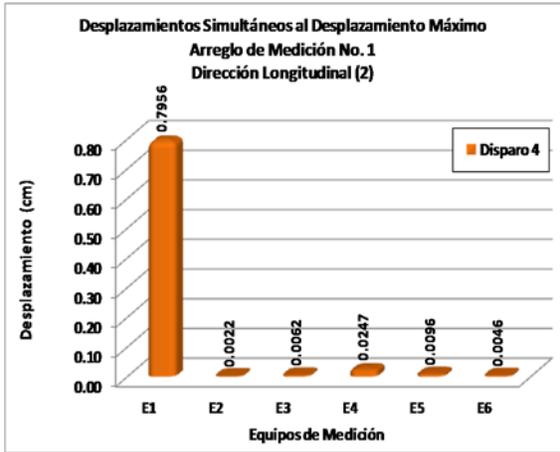


Fig. 5.36. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Long-(2), Disparo 4.

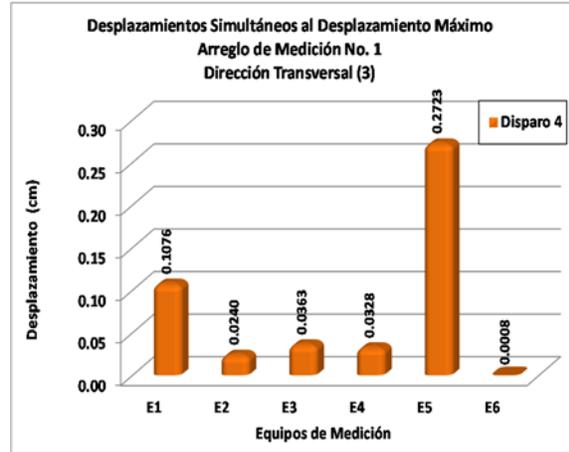


Fig. 5.37. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Trans-(3), Disparo 4.

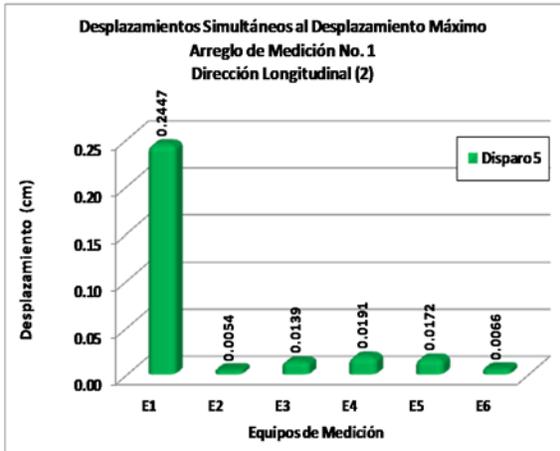


Fig. 5.38. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Long-(2), Disparo 5.

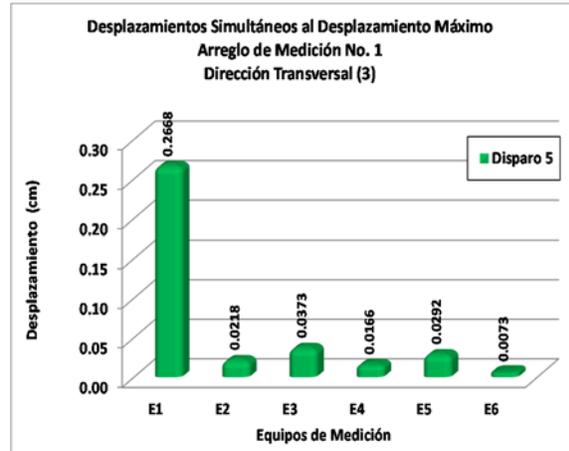


Fig. 5.39. Desplazamientos Absolutos Simultáneos al Desplazamiento Máximo del Arreglo No.1: Dirección Trans-(3), Disparo 5.

En las tablas 5.32 a 5.35, se muestran los desplazamientos absolutos asociados a los eventos en los cuales se obtuvieron los desplazamientos relativos máximos en la estructura de la torre de perforación, para los arreglos No.6 y No.7, estos valores se pueden observar gráficamente en las figs. 5.40 a 5.43, registrados en la segunda etapa del programa de mediciones.

- Para el Arreglo No.6, dichos valores se presentaron en el disparo 3, en la dirección longitudinal (2) y en el disparo 4 en la dirección transversal (3), en ambos casos en el Equipo E3.

- En el Arreglo No.7, estos desplazamientos se presentaron en el disparo 3 en la dirección longitudinal (2) y en el disparo 10 en la dirección transversal (3), ambos en el Equipo E1. Los equipos E1 y E3 estuvieron ubicados en la base de la torre de perforación.
- Los desplazamientos asociados al tiempo en el cual se produce el desplazamiento máximo, y presentados en los arreglos instrumentales mencionados anteriormente, son de 0.57 y 0.43 cm para las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) respectivamente en el Arreglo No.6 y de 0.65 y 0.60 cm para las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) respectivamente en el Arreglo No.7.

Tabla 5.32. Desplazamientos asociados al tiempo en el cual se produce el desplazamiento máximo en los equipos del Arreglo No.6: Disparo 3, en la dirección Longitudinal (2), desplazamiento en (cm).

No. de Medición	Nombre del Equipo	Nombre del Registro	Dirección		Desplazamiento Promedio de los Simultáneos al Desplazamiento Máximo (cm)
			Longitudinal (2)	Tiempo (2)	
3	E1	E1_23003	0.1007	20:54:13	0.1217
	E2	E2_23003	0.0301		
	E3	E3_23003	0.5709		
	E4	E4_23003	0.0019		
	E5	E5_23003	0.0102		
	E6	E6_23003	0.0163		

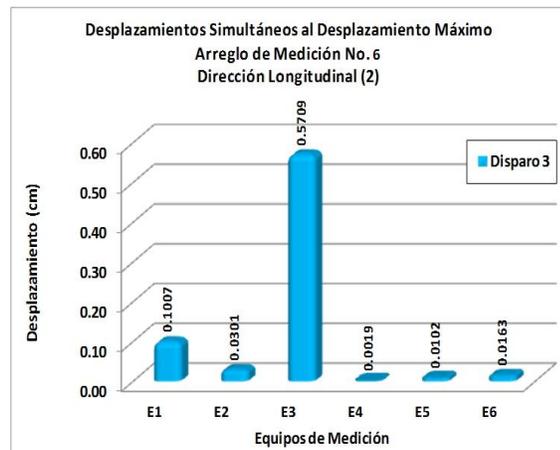


Fig. 5.40. Desplazamientos simultáneos al desplazamiento máximo, registrados en todos los equipos en la dirección longitudinal (2), para el disparo 3: Arreglo No.6.

Tabla 5.33. Desplazamientos asociados al tiempo en el cual se produce el desplazamiento máximo en los equipos del Arreglo No.6: Disparo 4, en la dirección transversal (3), desplazamiento en (cm).

No. de Medición	Nombre del Equipo	Nombre del Registro	Dirección		Desplazamiento Promedio de los Simultáneos al Desplazamiento Máximo (cm)
			Transversal (3)	Tiempo (3)	
4	E1	E1_23004	0.0162	21:15:57	Transversal (3)
	E2	E2_23004	0.0403		
	E3	E3_23004	<b>0.4285</b>		
	E4	E4_23004	0.0037		0.0841
	E5	E5_23004	0.0055		
	E6	E6_23004	0.0106		

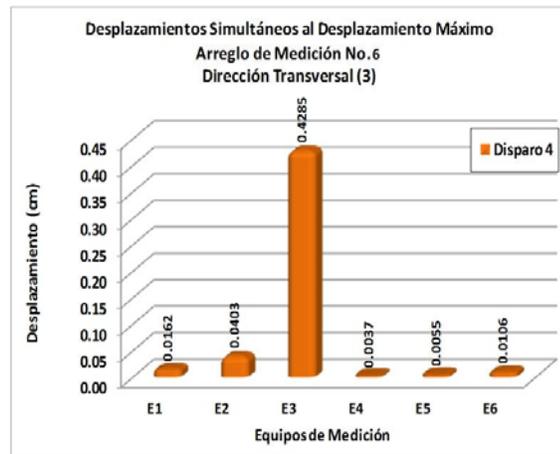


Fig. 5.41. Desplazamientos simultáneos al desplazamiento máximo, registrados en todos los equipos en la dirección transversal (3), para el disparo 4: Arreglo No.6.

Tabla 5.34. Desplazamientos asociados al tiempo en el cual se produce el desplazamiento máximo en los equipos del Arreglo No.7: Disparo 3, en la dirección longitudinal (2), desplazamiento en (cm).

No. de Medición	Nombre del Equipo	Nombre del Registro	Dirección		Desplazamiento Promedio de los Simultáneos al Desplazamiento Máximo (cm)
			Longitudinal (2)	Tiempo (2)	
3	E1	E1_23103	<b>0.6563</b>	16:13:34	Longitudinal (2)
	E2	E2_23103	0.0102		
	E3	E3_23103	0.0333		0.1307
	E4	E4_23103	0.0035		
	E5	E5_23103	0.0710		
	E6	E6_23103	0.0101		

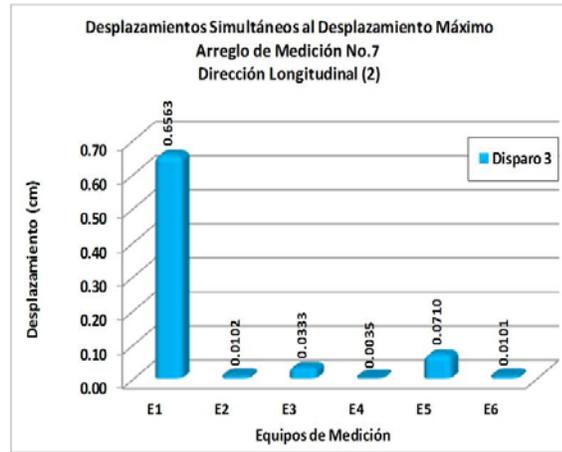


Fig. 5.42. Desplazamientos simultáneos al desplazamiento máximo, registrados en todos los equipos en la dirección longitudinal (2), para el disparo 3: Arreglo No.7.

Tabla 5.35. Desplazamientos asociados al tiempo en que se produce el desplazamiento máximo en los equipos del Arreglo de Medición No.7: Disparo 10, en la dirección transversal (3), desplazamiento en (cm).

No. de Medición	Nombre del Equipo	Nombre del Registro	Dirección		Desplazamiento Promedio de los Simultáneos al Desplazamiento Máximo (cm)
			Transversal (3)	Tiempo (3)	
10	E1	E1_23110	0.6053	17:28:40	0.1119
	E2	E2_23110	0.0165		
	E3	E3_23110	0.0242		
	E4	E4_23110	0.0075		
	E5	E5_23110	0.0140		
	E6	E6_23110	0.0041		

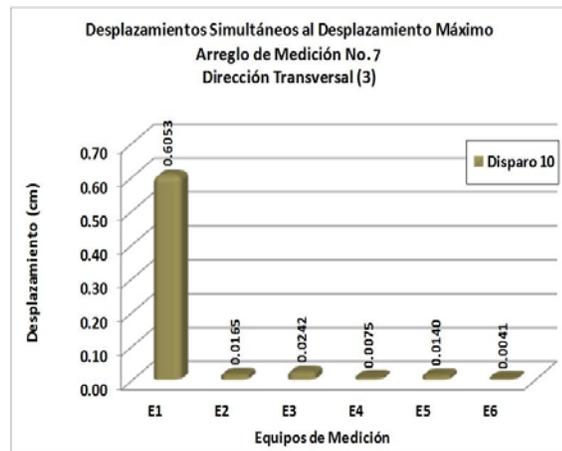


Fig. 5.43. Desplazamientos simultáneos al desplazamiento máximo, registrados en todos los equipos en la dirección transversal (3), para el disparo 10: Arreglo No.7.

**5.4.4 Desplazamientos relativos entre las cubiertas de la plataforma**

Para calcular los desplazamientos relativos entre las cubiertas de la plataforma marina de perforación, fue necesario obtener los desplazamientos absolutos en todos los equipos de un arreglo dado para un mismo instante de tiempo, siendo de interés el instante en el que se produce el desplazamiento máximo, estos valores fueron presentados con anterioridad y a partir de los cuales se calcularon los desplazamientos relativos entre las cubiertas No.1 y No.2.

De los arreglos de medición instrumentados, resulta relevante analizar el Arreglo No.1, debido a que la distribución de los equipos propuestos para éste, proporciona información de la deformación lateral relativa que experimentan las cubiertas de la plataforma.

En la tabla 5.36 se presentan los desplazamientos relativos calculados entre las cubiertas superior No.2 y la inferior No.1. Los desplazamientos absolutos utilizados para el cálculo de los valores relativos entre las cubiertas, como ya se mencionó son simultáneos al tiempo en que se presentó el máximo registrado en el Arreglo No.1 y para cada uno de los cinco disparos realizados.

*Tabla 5.36. Desplazamientos Relativos entre las cubiertas superior No.2 y la inferior No.1, Arreglo No.1. (Cálculo de desplazamientos laterales, para las direcciones Longitudinal (2) y Transversal (3)).*

No. de Disparo	Desplazamiento lateral en dirección Longitudinal-(2)			No. de Disparo	Desplazamiento lateral en dirección Transversal-(3)		
	Desplazamiento Absoluto (cm) Cubierta No.1: [Elev. (+) 15.850 m]	Desplazamiento Absoluto (cm) Cubierta No.2: [Elev. (+) 24.689 m]	Desplazamiento Relativo (cm)		Desplazamiento Absoluto (cm) Cubierta No.1: [Elev. (+) 15.850 m]	Desplazamiento Absoluto (cm) Cubierta No.2: [Elev. (+) 24.689 m]	Desplazamiento Relativo (cm)
1	0.8289	0.0058	0.82	1	1.3656	0.0758	1.29
2	0.1852	0.0115	0.174	2	0.0056	0.2398	0.235
3	0.5886	0.0212	0.567	3	0.0102	1.1958	1.171
4	0.0046	0.7956	0.791	4	0.0008	0.1076	0.107
5	0.0066	0.2447	0.240	5	0.0073	0.2668	0.260

A partir de los valores de desplazamiento presentados en la tabla 5.36, se puede deducir que los desplazamientos laterales relativos entre la cubierta inferior (Elevación + 15.850 m) y la superior (Elevación + 24.689 m) son muy pequeños, obteniéndose como valores máximos 0.82 cm registrado en la dirección longitudinal (2), y de 1.29 cm en la dirección transversal (3). Sin embargo en la tabla 5.31 presentada con anterioridad se puede apreciar que no todos los desplazamientos máximos absolutos se producen en la cubierta superior No.2 (Elev. + 24.689 m), lo cual puede atribuirse a la contribución de modos superiores de vibrar no sólo en traslación sino también en rotación.

**5.4.5 Desplazamientos relativos de la estructura de la torre de perforación.**

Para obtener los desplazamientos relativos a los de la base de la torre de perforación, se realizó la diferencia en el tiempo de los valores respectivos para cada evento, seleccionándose únicamente los correspondientes al evento que tuvo los desplazamientos relativos máximos, en los arreglos No.6 y No.7, como ya se mencionó estos arreglos fueron ejecutados en diferentes puntos de la estructura metálica de la torre de perforación.

Es de interés mencionar que los desplazamientos absolutos asociados a un mismo instante de tiempo y de los cuales se calcularon los desplazamientos relativos máximos en la estructura de la torre de perforación, se presentaron anteriormente en las tablas 5.32 a 5.35.

En las tablas 5.37 y 5.38, se muestran los desplazamientos relativos, en valor absoluto, obtenidos a partir de la segunda campaña de mediciones (Arreglos No.6 y No.7), y que corresponden a la estructura de la torre de perforación.

*Tabla 5.37. Desplazamientos relativos obtenidos en la torre de perforación, en el Arreglo No.6.*

Desplazamiento lateral en dirección Longitudinal-(2)			Desplazamiento lateral en dirección Transversal-(3)		
Equipo	Desplazamiento Absoluto (cm)	Desplazamiento Relativo (cm)	Equipo	Desplazamiento Absoluto (cm)	Desplazamiento Relativo (cm)
E1	0.1007	0.4702	E1	0.0162	0.4123
E2	0.0301	0.5408	E2	0.0403	0.3882
E3	0.5709	0	E3	0.4285	0
E4	0.0019	0.569	E4	0.0037	0.4248
E5	0.0102	0.5607	E5	0.0055	0.423
E6	0.0163	0.5546	E6	0.0106	0.4179

*Tabla 5.38. Desplazamientos relativos obtenidos en la torre de perforación, en el Arreglo No.7.*

Desplazamiento lateral en dirección Longitudinal-(2)			Desplazamiento lateral en dirección Transversal-(3)		
Equipo	Desplazamiento Absoluto (cm)	Desplazamiento Relativo (cm)	Equipo	Desplazamiento Absoluto (cm)	Desplazamiento Relativo (cm)
E1	0.6563	0	E1	0.6053	0
E2	0.0102	0.6461	E2	0.0165	0.5888
E3	0.0333	0.623	E3	0.0242	0.5811
E4	0.0035	0.6528	E4	0.0075	0.5978
E5	0.071	0.5853	E5	0.014	0.5913
E6	0.0101	0.6462	E6	0.0041	0.6012

En resumen los desplazamientos laterales relativos a los de la base la torre de perforación, fueron pequeños, obteniéndose como valores máximos 0.57 cm y 0.43 cm para las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) respectivamente en el Arreglo No.6 y de 0.65 cm y 0.60 cm para las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) respectivamente en el Arreglo No.7.

#### 5.4.6 Resultados obtenidos a partir de los desplazamientos máximos

- En las señales registradas para el Arreglo No.1, se pudo observar que los desplazamientos máximos experimentados en las cubiertas inferior No.1 y la superior No.2, registrados en los Equipos E3 y E1 respectivamente, alcanzaron magnitudes similares, no obstante que la localización en planta de los puntos de medición fue distinta, lo cual nos corrobora los resultados obtenidos.
- Respecto a los Arreglos No.2 y No.3, los desplazamientos obtenidos en las cubiertas de la plataforma, también fueron relativamente pequeños y semejantes entre sí.
- Para el Arreglo No.4, de las señales registradas en el equipo ubicado sobre el primer nivel de pasillos de la torre de perforación, se obtuvieron valores de desplazamiento del orden de los calculados en la base de la misma, cabe mencionar que durante la grabación de los registros se estaban realizando actividades de perforación. De lo anterior, se puede concluir que para la actividad prevaleciente durante las mediciones estos desplazamientos fueron relativamente pequeños.
- Las magnitudes de los desplazamientos obtenidos en la zona de pasillos del acceso al embarcadero, instrumentados en los Arreglos No.1 y No.5, presentan diferencias con las obtenidas en las cubiertas No.1 y No.2, debido a que las señales registradas contienen la contribución de vibraciones locales ocasionadas por los contrastes de flexibilidad en el sistema estructural de esta zona y, también se debe a las diferentes actividades o trabajos realizados al momento de realizar las mediciones. Debido a que esta característica es comúnmente asociada a un efecto local, sin embargo no produjo ningún impacto en la solución del problema en estudio.
- Es de interés mencionar que para el Arreglo No.1, no se consideraron dos de los disparos registrados en el equipo E4, ubicado al centro de la zona de acceso al embarcadero. Sin

embargo las señales registradas por el equipo E5, ubicado en la cercanía de la columna A1, si se obtuvieron resultados consistentes con los medidos en las cubiertas No.1 y No.2 del mismo arreglo instrumentado, esto se debe a que en dicho punto de medición no se ve afectado por los contrastes de flexibilidad antes mencionados.

- Esta misma situación se presentó en el Arreglo No.5 para el que no se consideraron dos de los disparos registrados por el equipo E3, ubicado como en el caso anterior, al centro de la misma zona del embarcadero. Es de interés mencionar que los equipos E5, E6, E1 y E2 ubicados en la cercanía de las columnas B2, A2, A3 y B4, respectivamente, si presentaron resultados consistentes con los obtenidos en las cubiertas No.1 y No.2, del mismo arreglo instrumental.
- Del análisis de los resultados obtenidos en la segunda etapa de la campaña de mediciones, se pudo observar que la estructura de la Torre de Perforación experimentó, en intervalos de tiempo reducidos del orden de 5 minutos, desplazamientos transitorios relativamente pequeños, y consistentes a los que puede experimentar una estructura de acero de tales dimensiones, ante acciones ambientales normales tales como oleaje, corrientes marinas y vientos, entre otras. De la información presentada en las tablas 5.14 a 5.19 y 5.20 a 5.25, se observa que los valores de desplazamientos máximos absolutos obtenidos en las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) fueron, respectivamente, para el Arreglo No.6, de 0.571 cm y 0.429 cm y para el Arreglo No.7, de 0.656 cm y 0.605 cm.
- Los desplazamientos máximos obtenidos en los Arreglos No.6 y No.7, muestran en promedio, consistencia en su magnitud, con excepción de algunos pocos valores pico que se salen de la tendencia del comportamiento, los cuales pueden atribuirse a condiciones o sucesos particulares durante las mediciones. Por lo anterior se corrobora que es importante contar con un número suficiente de muestras, que permita estimar la tendencia del comportamiento la estructura en estudio.
- Los desplazamientos obtenidos en la segunda etapa de mediciones, no presentan un incremento en su magnitud con respecto a la altura del punto de medición sobre la torre de perforación, es decir que por su distribución a mayor altura no mostraron evidencia de efectos importantes de flexión en la estructura de la torre, con lo que se concluye que, para las condiciones normales de operación, el sistema estructural experimenta un comportamiento rígido.

- Se verifica que los movimientos registrados en la base de la torre de perforación, tienen una variación mínima con respecto a los registrados en la Cubierta Superior de la Plataforma, y se ratifica la magnitud de los desplazamientos máximos, con respecto a los obtenidos en los cinco primeros arreglos instrumentados en la primera campaña.
- Se verificó que las diferencias de los desplazamientos máximos observados para un mismo punto entre arreglos diferentes, son justificadas debido a que estos desplazamientos, corresponden a condiciones de demanda diferentes y a que las mediciones de cada arreglo se realizaron en tiempos diferentes.
- Es de suma importancia mencionar que los desplazamientos referidos en los párrafos anteriores, estos al ser determinados por estudios de vibración ambiental, no involucran los desplazamientos lentamente variables (cuasiestáticos) que experimenta el sistema estructural, mismos que no pueden ser identificados de forma directa a través de este tipo estudios. Por lo anterior se recomienda para su obtención realizar un estudio experimental diferente al realizado en este trabajo de investigación, el cual se enfoque a la medición de tales desplazamientos y su obtención directa, como puede ser el uso de instrumentos Geomáticos, GPS de alta precisión, con la finalidad de medir directamente los desplazamientos laterales de la Plataforma marina en ambas Cubiertas, así como en la torre de perforación. Sin embargo, mediante el monitoreo de vibraciones realizado en esta tesis, si podemos obtener las propiedades dinámicas de la estructura en estudio y con estas generar un modelo analítico realista, para su posterior análisis que nos permitirá calcular las respuestas dinámicas de la estructura.
- El desplazamiento registrado en la parte inferior de la lingada o tubería de perforación, principalmente se origina por dos efectos: a) Desplazamientos horizontales de la Plataforma y Torre de perforación en su nivel superior, y que están asociados al periodo de vibración de la Plataforma y b) movimientos lentamente variables de la Plataforma independientes de su periodo de vibración, ocasionados por mareas y variaciones en la dirección e intensidad de las corrientes marinas.

## 5.5 Determinación de las propiedades dinámicas de la estructura

La ejecución de la instrumentación y monitoreo de estructuras importantes existentes, con fines de evaluación estructural es reciente, no solo en México, sino en el resto del mundo; sin embargo, con los desarrollos tecnológicos actuales el uso de estas técnicas es económicamente posible. Las técnicas recientes de evaluación estructural representan una opción justificable y confiable en estructuras sobre las que se tengan dudas en su comportamiento bajo condiciones de servicio o extremas, en estructuras nuevas para las que se requiera conocer su comportamiento real, estructuras que por su condición estructural requieren ser reforzadas y estructuras ya reforzadas en las que se quiere conocer el impacto de este reforzamiento en su comportamiento estructural real.

Con base en lo antes mencionado y conscientes de que para una estructura existen incertidumbres en sus características reales que no permiten desarrollar modelos matemáticos con comportamientos congruentes con lo medido, es altamente recomendable determinar las propiedades dinámicas reales de las estructuras, para que mediante una calibración se puedan generar modelos estructurales confiables con fines de evaluación estructural y/o reforzamiento mediante procedimientos de análisis.

En los siguientes apartados se presenta la obtención de las propiedades dinámicas de la estructura de la plataforma de perforación, a partir del análisis de las señales registradas durante la campaña de mediciones. Estos parámetros dinámicos incluyen: 1) los periodos o frecuencias propias de vibrar del sistema, asociados a los diferentes modos de vibrar que se identifiquen de acuerdo a las características de su estructuración y 2) el porcentaje del amortiguamiento crítico.

Es de interés comentar que, dado que la torre de perforación se encuentra apoyada sobre la estructura de la plataforma, en el análisis de las señales, aparecerán no sólo las frecuencias de la torre, sino también las de la plataforma, como se observa en los respectivos espectros de Fourier de los Arreglos No.6 y No.7.

**5.5.1 Espectros de Fourier de la primera campaña de mediciones.**

Se generaron los espectros de Fourier para cada uno de los equipos de medición colocados en los arreglos instrumentados. A partir de los resultados obtenidos en los espectros de Fourier antes mencionados, por superposición, se generaron los espectros de Fourier para cada uno de los arreglos de medición en las direcciones longitudinal (2) y transversal (3). Debido a la gran cantidad de espectros de Fourier generados del total de las señales registradas, a manera de ejemplo en las figs. 5.44 y 5.45 y únicamente se presentan los espectros de Fourier correspondientes al equipo 1 (E1), en su dirección longitudinal (2) y transversal (3), para el arreglo No.1. En las figs. 5.46 a 5.55 se muestran las envolventes de los espectros de Fourier de cada uno de los equipos de medición instalados en los cinco primeros arreglos instrumentales, pertenecientes a la primera etapa del programa de mediciones.

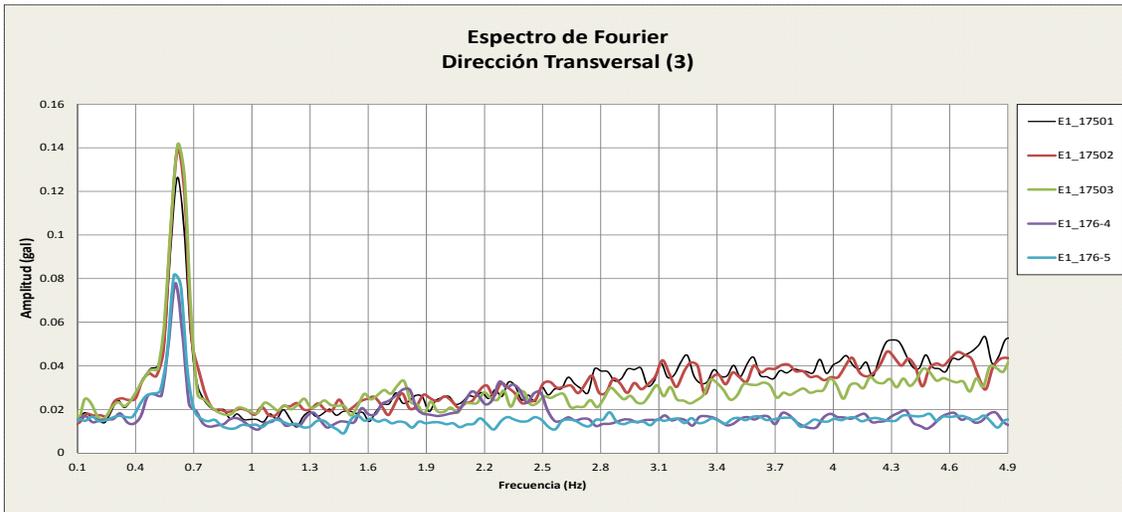


Fig. 5.44. Espectros de Fourier correspondientes al Equipo 1 del Arreglo No.1, Dirección Longitudinal (2).

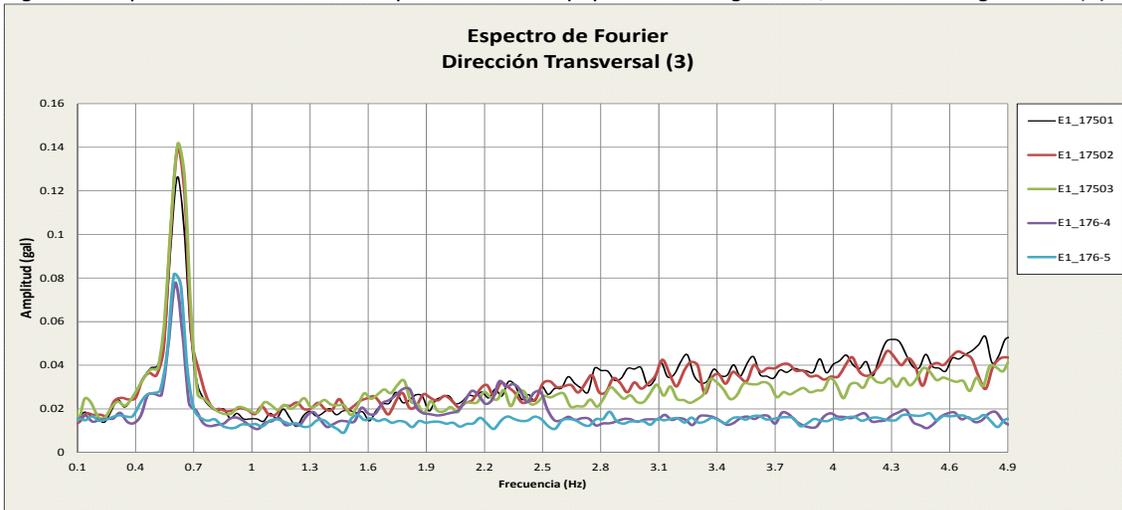


Fig. 5.45. Espectros de Fourier correspondientes al Equipo 1 del Arreglo No.1, Dirección Transversal (3).

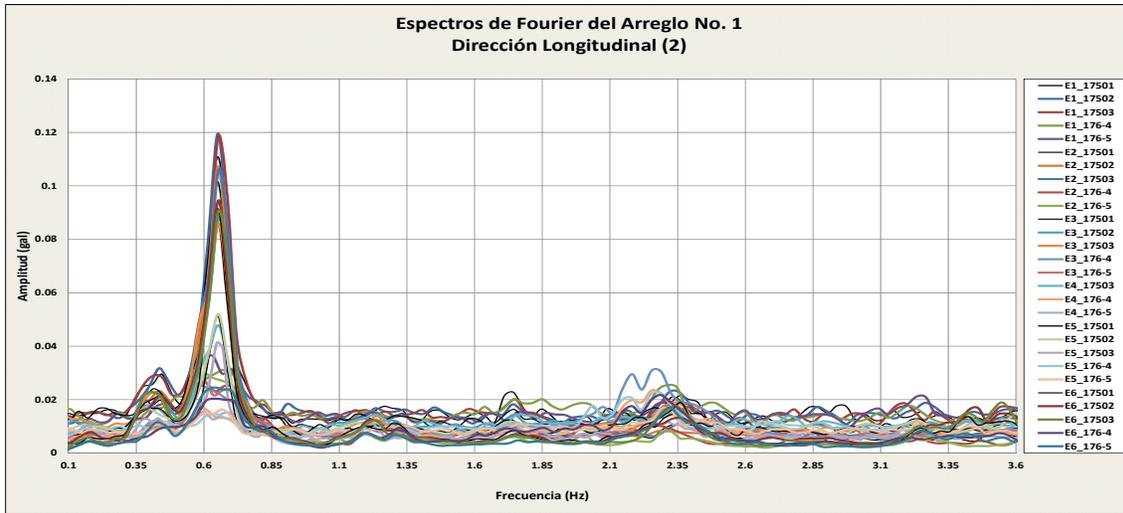


Fig. 5.46. Envoltura de los Espectros de Fourier en el Arreglo No.1, Dirección Longitudinal (2).

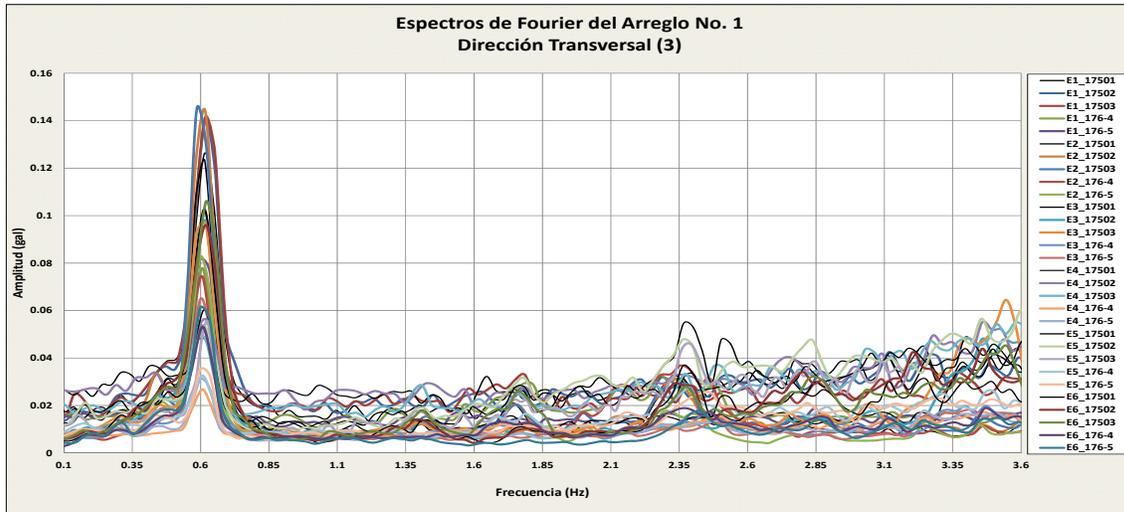


Fig. 5.47. Envoltura de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.1, Dirección transversal (3).

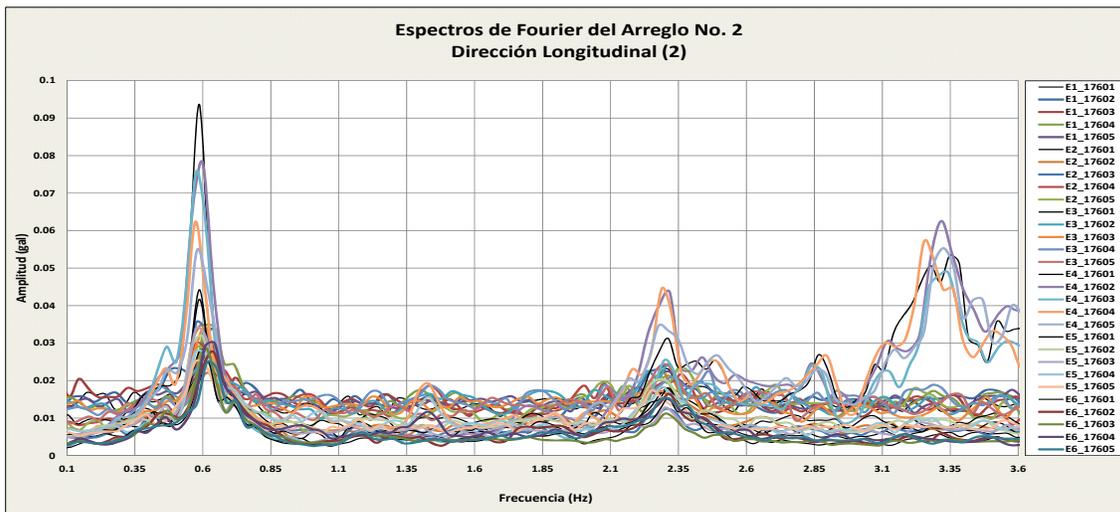


Fig. 5.48. Envoltura de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.2, Dirección Longitudinal (2).

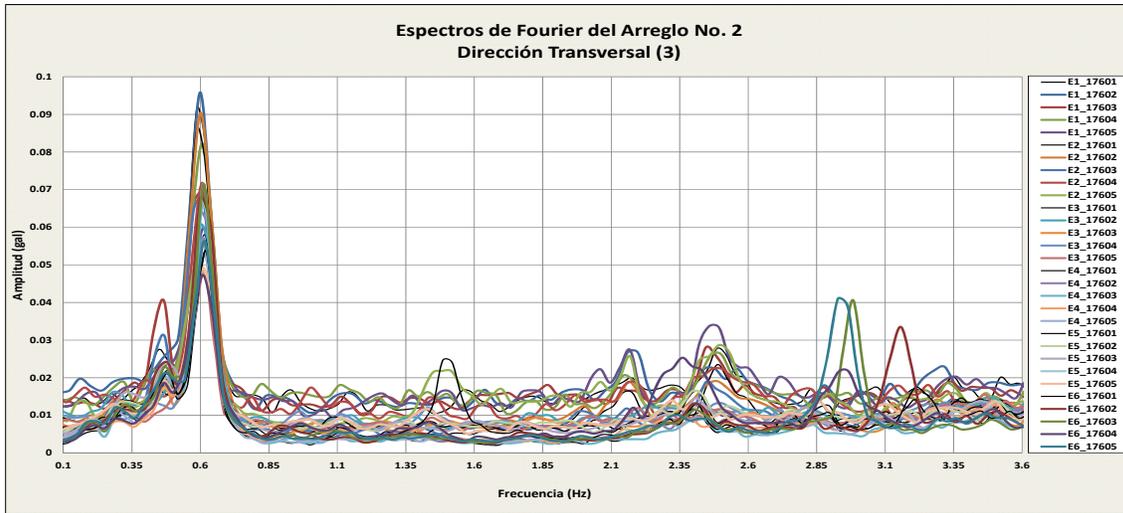


Fig. 5.49. Envoltente de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.2, Dirección transversal (3).

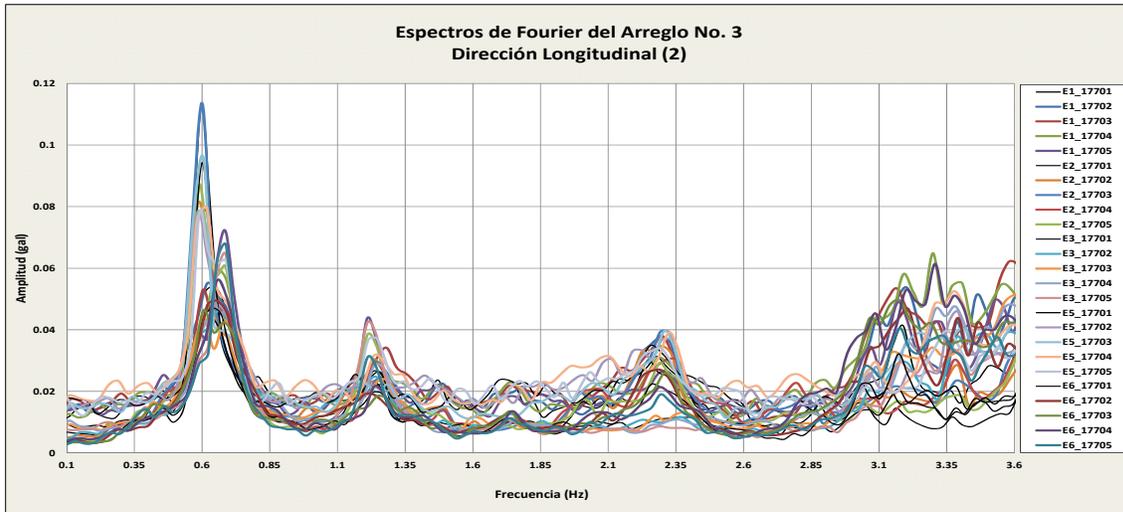


Fig. 5.50. Envoltente de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.3, Dirección Longitudinal (2).

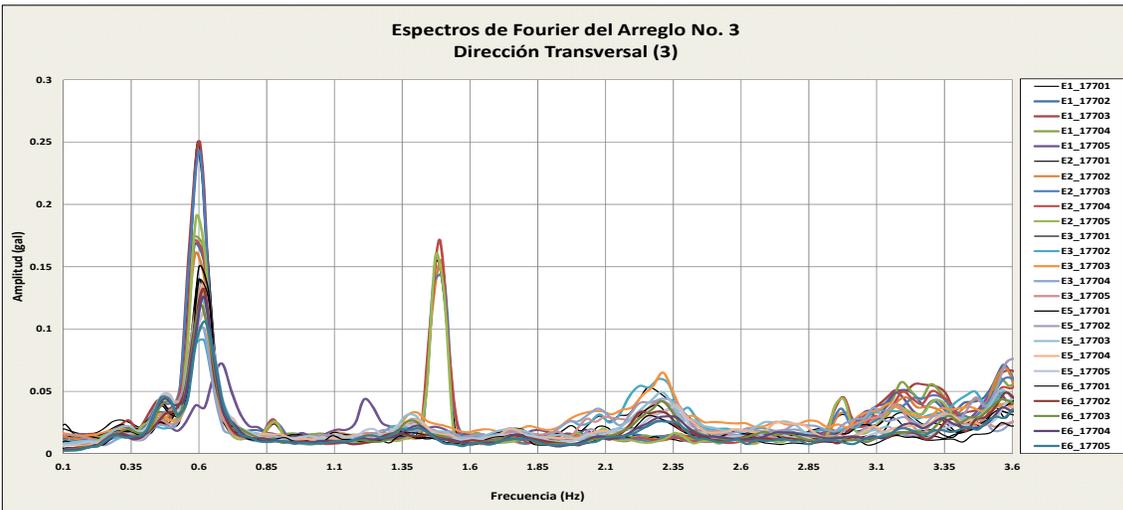


Fig. 5.51. Envoltente de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.3, Dirección transversal (3).

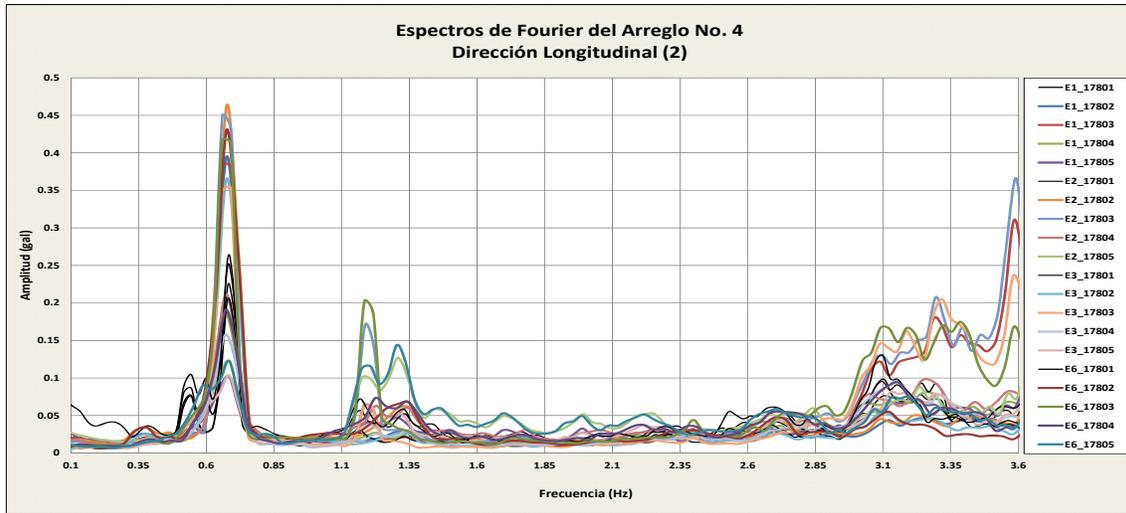


Fig. 5.52. Envolvente de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.4, Dirección Longitudinal (2).

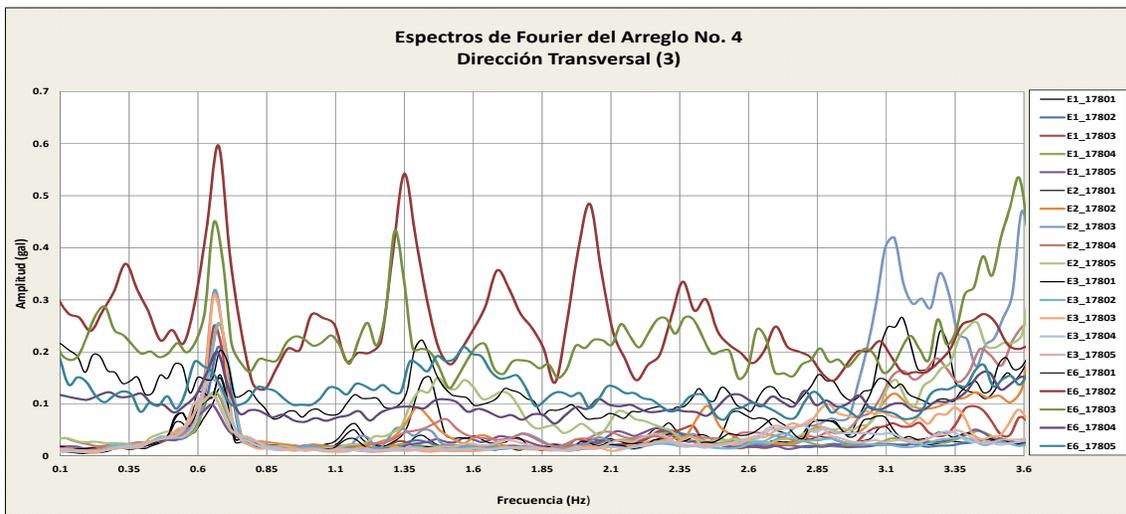


Fig. 5.53. Envolvente de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.4, Dirección transversal (3).

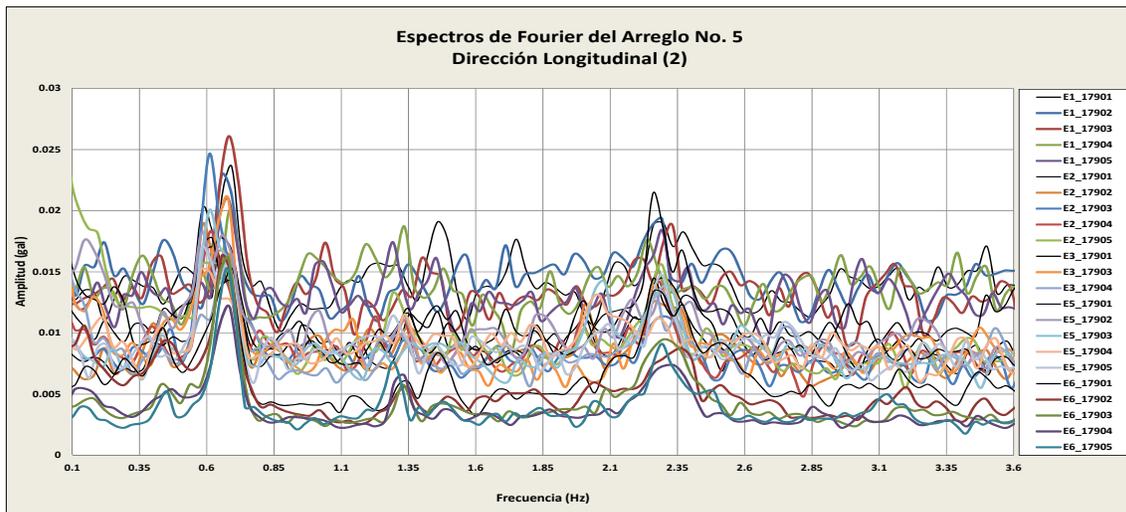


Fig. 5.54. Envolvente de los Espectros de Fourier en el Arreglo No.5, Dirección Longitudinal (2).

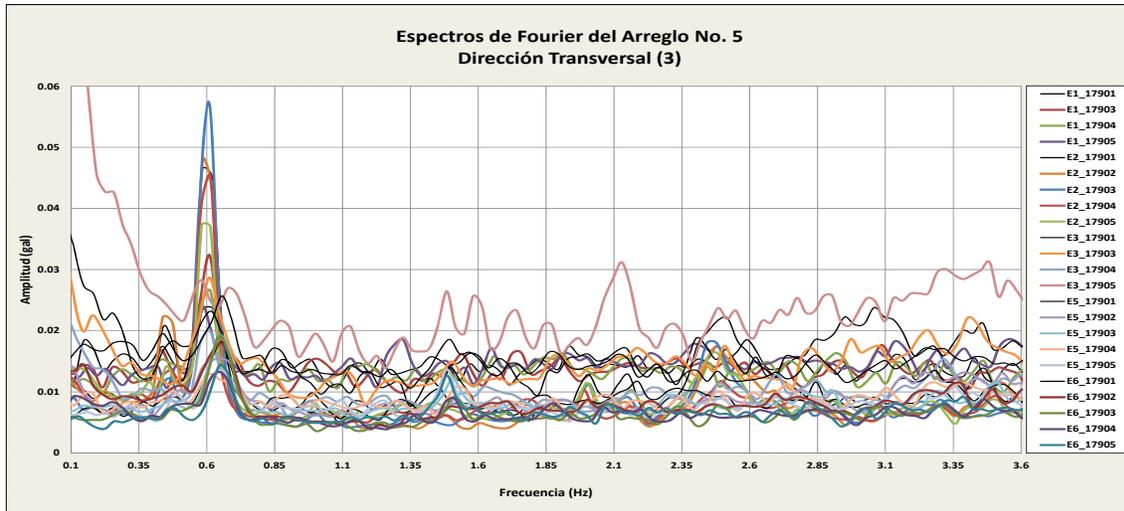


Fig. 5.55. Envoltora de los Espectros de Fourier para el Arreglo No.5, Dirección transversal (3).

### 5.5.2 Espectros de Fourier de la segunda campaña de mediciones.

En principio se obtuvieron los espectros de Fourier calculados del análisis de cada una de las señales en su longitud completa, posterior a esto se aisló una sola ventana de tiempo con una duración aproximada de 5 minutos, esta representación permitió realizar un análisis preliminar para identificar el rango de estudio de las frecuencias de interés, pertenecientes a la torre de perforación.

Con la finalidad de tomar en cuenta las variaciones que pueden sufrir las señales registradas producto de diversos agentes externos como el ruido y las variaciones en la intensidad de la excitación ambiental, que pueden modificar ligeramente los valores de frecuencias, se obtuvieron los espectros Fourier promedio, dividiendo cada una de las 120 señales registradas, obteniéndose 240 Espectros de Fourier total (120 para cada dirección de medición), por lo que se aislaron en 20 segmentos de estudio o ventanas con una duración aproximada de 15 seg. Los espectros resultantes de cada ventana se promediaron y se obtuvieron los espectros de Fourier promedio, los cuales se consideran representativos del comportamiento dinámico que experimentan las estructuras de la plataforma y la torre de perforación.

En total se calcularon 120 espectros para cada una de las dos direcciones de análisis longitudinal (2) y transversal (3) y se obtuvieron los espectros de Fourier de cada equipo, correspondientes a las mediciones o disparos registrados en los Arreglos No.6 y No.7. Por lo que considerando la gran cantidad de información generada, a manera de ejemplo en las figs. 5.56 a 5.59 se muestran

únicamente los Espectros de Fourier, obtenidos para los Equipos E1 y E2, en sus direcciones longitudinal (2) y transversal (3) respectivamente.

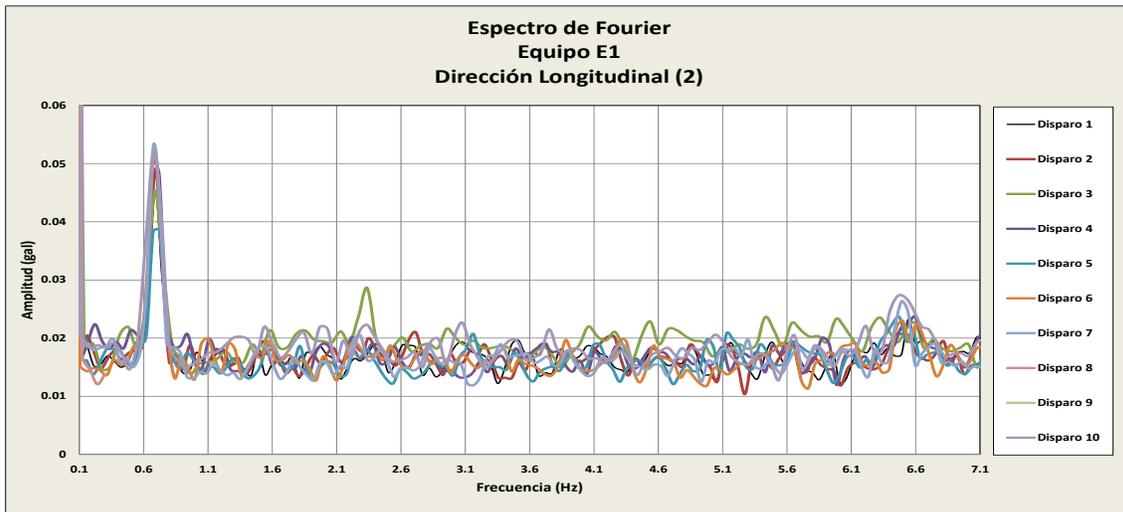


Fig. 5.56. Espectros de Fourier correspondientes al Equipo 1 del Arreglo No.6, Dirección Longitudinal (2).

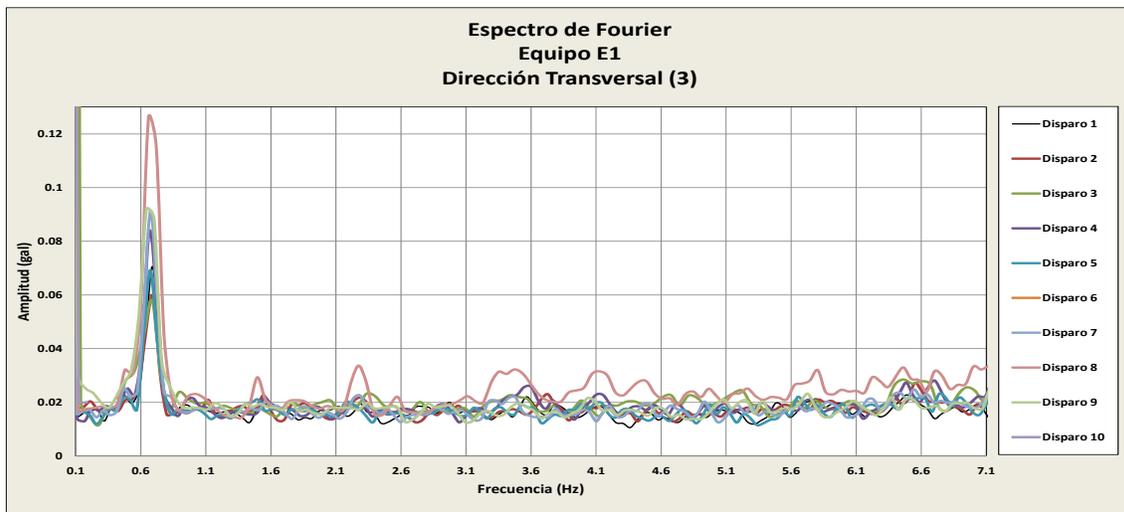


Fig. 5.57. Espectros de Fourier correspondientes al Equipo 1 del Arreglo No.6, Dirección Transversal (3).

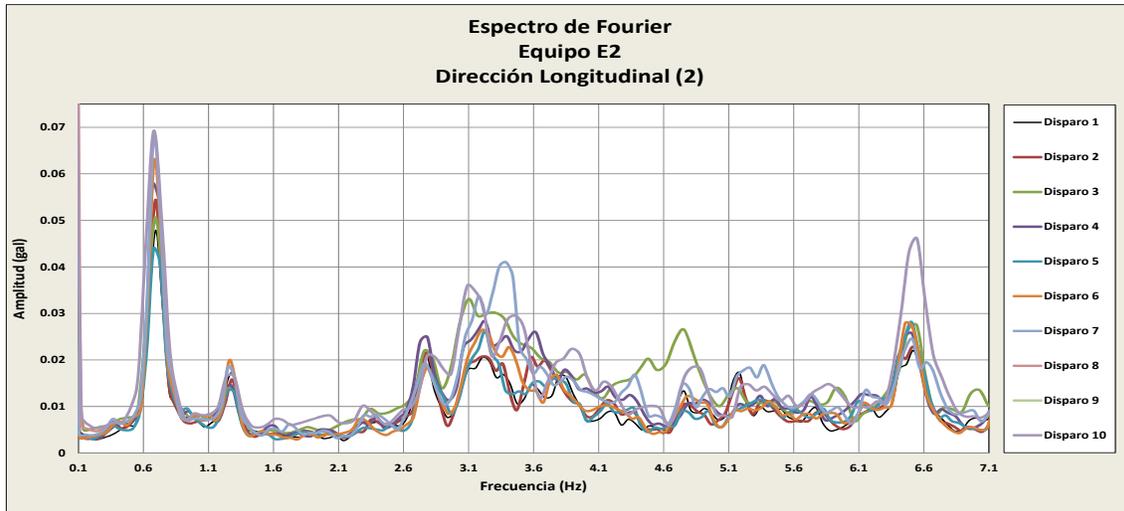


Fig. 5.58. Espectros de Fourier correspondientes al Equipo 2 del Arreglo No.6, Dirección Longitudinal (2).

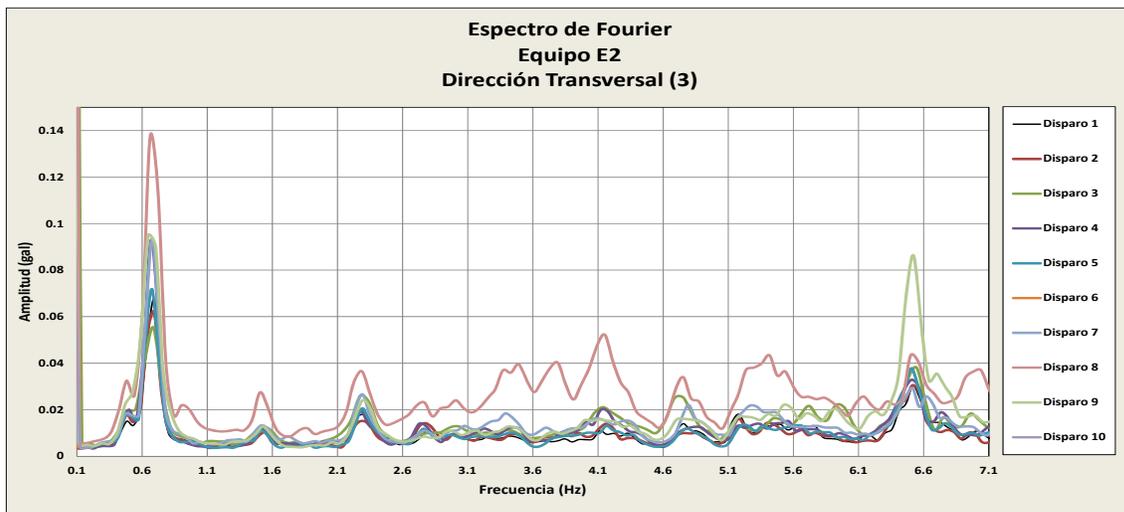


Fig. 5.59. Espectros de Fourier correspondientes al Equipo 2 del Arreglo No.6, Dirección Transversal (3).

En las tablas 5.39 y 5.40 se presentan las frecuencias más relevantes encontradas a partir de los espectros de Fourier de los Arreglos No.6 y No.7, dichas frecuencias están asociadas al comportamiento dinámico del sistema estructural de la plataforma marina y de la torre de perforación, mismas que fueron evaluadas en el análisis de correlación espectral.

Es de interés mencionar que, debido al acoplamiento de los modos en una estructura real, para una dirección de análisis dada, ya sea la longitudinal (2) o transversal (3), en el espectro de Fourier se puede identificar la frecuencia dominante y, eventualmente, con menor amplitud se pueden proyectar las frecuencias asociadas a las otras direcciones de medición, por ello en las tablas anteriores existen celdas vacías, ya que la amplitud de algunas frecuencias no necesariamente fue

destacada. Cabe mencionar que los valores de frecuencia remarcados en color amarillo indican que su amplitud no fue dominante, sin embargo fueron perceptibles.

Tabla 5.39. Frecuencias de interés identificadas en el Arreglo No.6, para la dirección Longitudinal (2) y transversal (3).

Arreglo No. 6. En la Dirección Longitudinal (2)						Arreglo No. 6. En la Dirección Transversal (3)					
Equipo	Frecuencia Plataforma (Hz)	Frecuencias Relevantes (Hz)				Equipo	Frecuencia Plataforma (Hz)	Frecuencias Relevantes (Hz)			
		f1	f2	f3	f4			f1	f2	f3	f4
E1	0.675		----	2.33	----	E1	0.658	----	1.5	2.27	----
E2	0.679	1.26	----	2.29	2.78	E2	0.662	----	1.5	2.29	2.77
E3	0.682	1.26	1.49	2.29	2.78	E3	0.664	----	1.51	2.29	2.78
E4	0.681	1.26		2.3	2.78	E4	0.665	----	1.51	2.3	2.78
E5	0.679	1.26	1.54	2.29	2.78	E5	0.675	----	1.53	2.3	2.76
E6	0.678	1.26	1.54	----	----	E6	0.662	----	1.5	2.29	2.77
<b>Promedio</b>	<b>0.679</b>	<b>1.260</b>	<b>1.523</b>	<b>2.300</b>	<b>2.780</b>	<b>Promedio</b>	<b>0.664</b>	<b>----</b>	<b>1.508</b>	<b>2.290</b>	<b>2.772</b>

Tabla 5.40. Frecuencias de interés identificadas en el Arreglo No.7, para la dirección Longitudinal (2) y transversal (3).

Arreglo No. 7. En la Dirección Longitudinal (2)						Arreglo No. 7. En la Dirección Transversal (3)						
Equipo	Frecuencia Plataforma (Hz)	Frecuencias Relevantes (Hz)				Equipo	Frecuencia Plataforma (Hz)	Frecuencias Relevantes (Hz)				
		f1	f2	f3	f4			f1	f2	f3	f4	f5
E1	0.7	1.29	----	2.27	2.81	E1	0.679	----	1.53	2.24	----	----
E2	0.68	1.25	1.53	2.33	2.8	E2	0.68	----	1.53	2.25	2.8	3.48
E3	0.677	1.29	1.58	2.31	2.82	E3	0.677	----	1.52	2.24	2.79	3.45
E4	0.679	1.3	1.58	2.27	2.82	E4	0.679	----	1.52	2.24	2.8	3.45
E5	0.679	1.3	1.58	2.32	2.82	E5	0.679	----	1.53	2.24	2.8	3.43
E6	0.679	1.3	1.53	2.26	2.82	E6	0.679	----	1.53	2.24	2.75	3.43
<b>Promedio</b>	<b>0.682</b>	<b>1.288</b>	<b>1.560</b>	<b>2.293</b>	<b>2.815</b>	<b>Promedio</b>	<b>0.679</b>	<b>----</b>	<b>1.527</b>	<b>2.242</b>	<b>2.788</b>	<b>3.448</b>

En las figs. 5.60 a 5.63 se presenta un panorama completo de las frecuencias más relevantes que participan en la respuesta dinámica de la estructura en estudio, obtenidas de los Arreglos No.6 y No.7, se realizó la superposición de la totalidad de los espectros de Fourier para ambas direcciones de medición analizadas. En dichas figuras, también se pueden observar claramente las frecuencias asociadas a la estructura principal de la plataforma, mismas que fueron encontradas en el estudio de la primera campaña de mediciones.

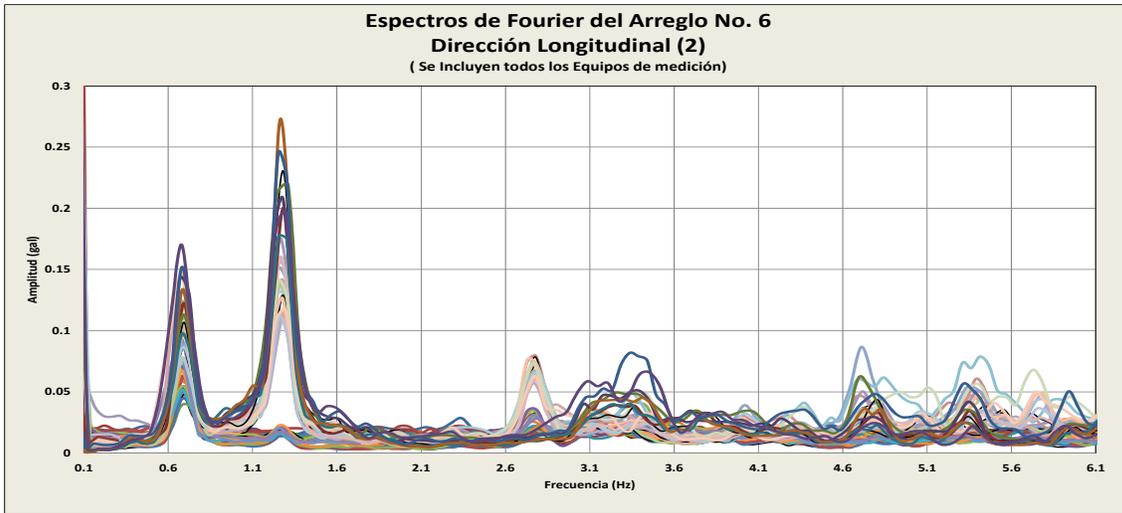


Fig. 5.60. Envoltente de los Espectros de Fourier en el Arreglo No.6, Dirección Longitudinal (2).

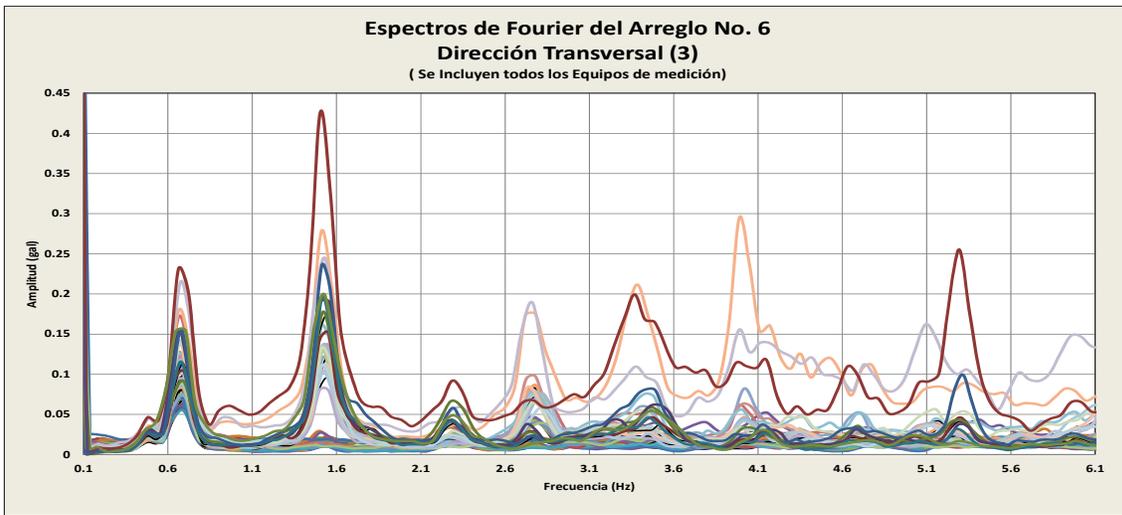


Fig. 5.61. Envoltente de los Espectros de Fourier en el Arreglo No.6, Dirección Transversal (3).

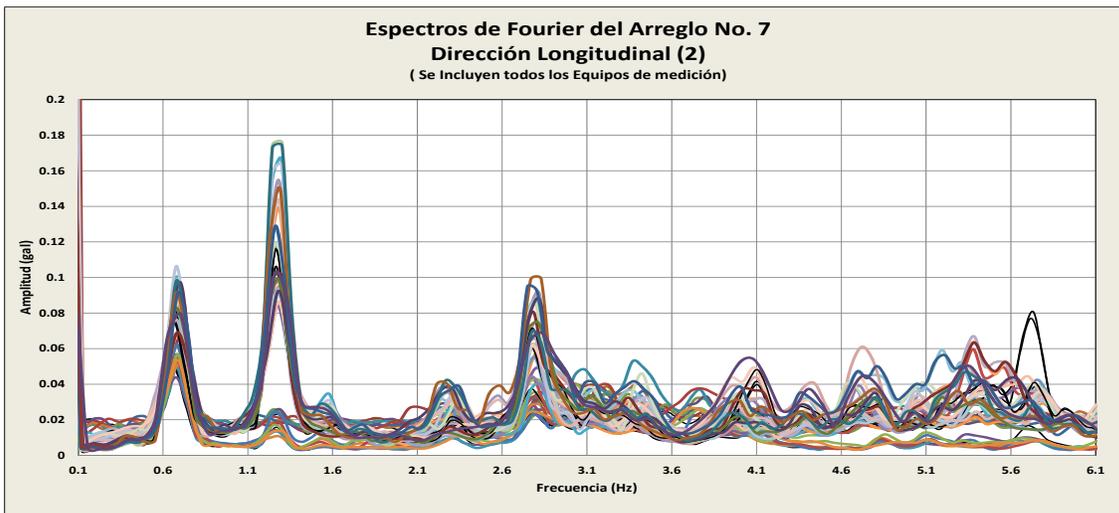


Fig.5.62. Envoltente de los Espectros de Fourier en el Arreglo No.7, Dirección Longitudinal (2).

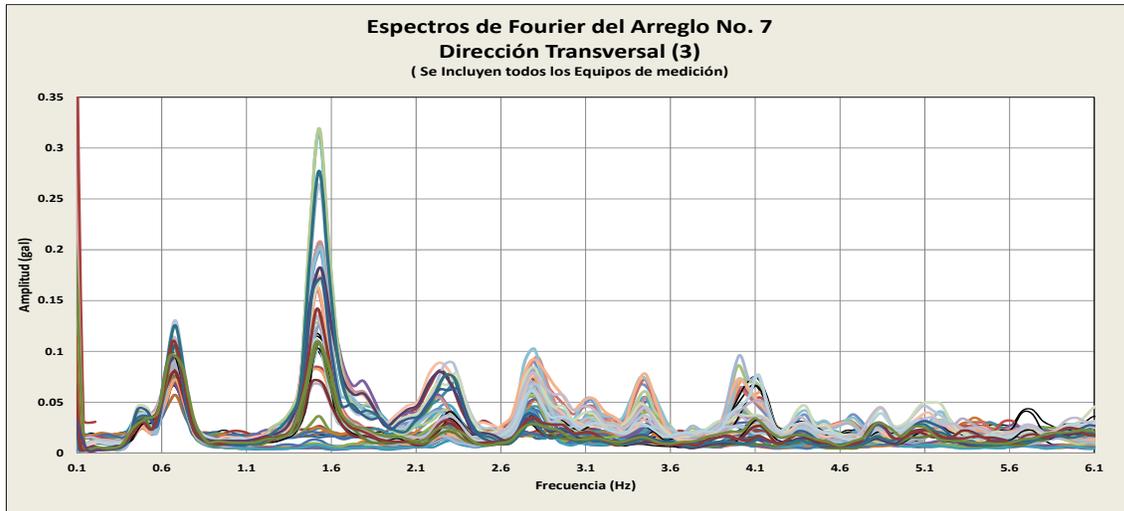


Fig.5.63. Envolvente de los Espectros de Fourier en el Arreglo No.7, Dirección Transversal (3).

### 5.5.3 Análisis de correlación espectral de las señales registradas

El análisis de correlación espectral entre las señales registradas se realizó obteniendo de forma síncrona cada uno de los arreglos instrumentados, y la correlación entre ellas se realizó por pares de registros y para la misma dirección en estudio, dichos registros corresponden a dos puntos distintos de medición que nos interese analizar.

Haciendo uso del instrumento virtual ejecutado en el programa “Labview”, se realizó una revisión exhaustiva de la correlación espectral entre las señales registradas en los arreglos instrumentados en las dos campañas del programa de mediciones. Se generaron los espectros promedio de Fourier y de potencia para cada una de las señales y sus respectivas funciones de correlación (espectro cruzado, coherencia, fase y función de transferencia) las cuales son necesarias para la identificación de las frecuencias propias asociadas a los modos de vibrar que caracterizan el comportamiento dinámico de la estructura en estudio.

Por lo que a continuación se presentan los análisis más representativos del proceso de correlación espectral, a partir de los cuales se logró determinar las frecuencias propias de vibrar de la plataforma, así mismo se efectuó la correlación entre señales de los equipos de medición ubicados en la torre de perforación, pertenecientes a los arreglos instrumentales de la segunda etapa del programa de mediciones, sobre todo de aquellos instalados a mayor altura de la torre, debido a que fueron los que presentaron los registros con mejor calidad, a partir de este análisis se lograron

determinar las frecuencias propias de vibrar de la estructura de la torre y también se confirmaron las frecuencias dominantes en traslación de la estructura de la plataforma marina, identificadas en la primera campaña de mediciones.

En las figs. 5.64 a 5.67 se presenta la correlación entre las señales registradas correspondientes a las dos primeras mediciones del Arreglo No.1, para los equipos E2 y E3 ubicados en las cubiertas 2 y 1 respectivamente. En estas se observan los espectros de Fourier, en los cuales se identifican frecuencias dominantes con valores de 0.65 Hz, para la dirección longitudinal (2) y 0.62 Hz, para la dirección transversal (3), obteniéndose para dichas frecuencias, coherencias relativamente altas y ángulos de fase igual a cero grados, como se aprecia en sus respectivos espectros, y que además estos valores se acentúan con mayor claridad en sus respectivos espectros de potencia. Por lo anterior, se puede concluir que estas frecuencias se encuentran asociadas al primer modo de vibrar en traslación para cada una de las direcciones analizadas, verificando que estos resultados se repiten en la gran mayoría de los análisis de correlación para otros equipos y mediciones del mismo arreglo.

Cabe resaltar que también se encontraron las mismas frecuencias, de forma muy evidente en la mayoría de los cinco primeros arreglos instrumentados, realizados en la primera campaña de mediciones, excepto en alguna dirección correspondiente a los Arreglos No.4 y No.5, para las cuales se presentó un nivel de ruido considerable, impidiendo su identificación. Señalando que las frecuencias identificadas como parte del sistema estructural en estudio, también se acentúan con claridad en los espectros de Fourier presentados anteriormente en las figs. 5.46 a 5.55.

En cuanto a la identificación del modo con dominancia torsional de la plataforma, se efectuó la correlación entre los equipos E1 y E2, así como entre los equipos E3 y E6, los cuales se ubicaron sobre la planta de la cubierta 2, analizando, para ambos casos, la dirección longitudinal (2) correspondiente al disparo cinco realizado para el Arreglo No.3.

Estos resultados se presentan en las figs. 5.68 y 5.69, en las cuales se identifica con claridad una frecuencia de 1.21 Hz, que también se destaca en sus respectivos espectros de potencia, para este se obtuvo una coherencia significativamente alta y un ángulo de fase igual a 180 grados. Por lo que, se puede concluir que dicha frecuencia se asocia al modo de vibrar de la plataforma con dominancia torsional, ya que su valor redunda en la gran mayoría de los análisis de correlación

realizados para otros equipos y mediciones del mismo arreglo analizado, particularmente en la fig. 5.50 anteriormente presentada, se puede observar que este valor se resalta más en la dirección longitudinal (2).

En las figs. 5.70 a 5.75 se presentan los resultados de la correlación entre las señales registradas durante las mediciones o disparos 5, 8 y 9 en los equipos E5 y E6, pertenecientes al Arreglo No.6, estos equipos se ubicaron en los niveles intermedio y superior de la torre de perforación, respectivamente, analizando las direcciones longitudinal (2) y transversal (3).

Para los Arreglos No.6 y No.7, a partir del análisis de correlación en la dirección longitudinal (2), se identificaron frecuencias de 0.68 Hz y 1.29 Hz, presentando coherencias relativamente altas y un ángulo de fase igual a cero grados. Es de interés mencionar que éstas frecuencias también se identificaron en los resultados presentados con anterioridad en las tablas 5.39 y 5.40, con valores promedio de 0.679 Hz y 1.26 Hz para el Arreglo No.6, y de 0.682 Hz y 1.29 Hz en el Arreglo No.7; la primera de ellas está asociada a la frecuencia del modo dominante en traslación de la estructura de la plataforma marina en dirección longitudinal (2).

Es de interés mencionar que a pesar de que la frecuencia de 0.68 Hz antes mencionada, fue obtenida del análisis de las señales registradas en los equipos colocados a una altura considerable en la torre de perforación, lo cual es un hecho que la estructura de la torre de perforación se encuentra en interacción con la estructura de la plataforma marina y por tanto, las frecuencias identificadas deben aparecer en los espectros analizados.

Por otro lado, de los resultados de correlación espectral antes mencionados y del incremento relativo en la amplitud de los picos asociados a las frecuencias de 1.26 Hz a 1.29 Hz, que se presentan a medida que los equipos se ubican a mayor altura, se concluye que éstas corresponden al modo dominante en traslación longitudinal de la estructura de la torre de perforación.

Se analizaron las frecuencias 0.68 Hz y 1.53 Hz, en las direcciones Longitudinal (2) y transversal (3), para los Arreglos No.6 y No.7, determinándose por medio del análisis de correlación espectral coherencias relativamente altas y ángulos de fase igual a cero grados para ambos casos de estudio. Cabe mencionar que estas frecuencias también fueron identificadas en los espectros de

Fourier presentados con anterioridad en las figs. 5.59 y 5.63. De la misma también se pudieron identificar en las tablas 5.39 y 5.40, con valores promedio de 0.664 Hz y 1.51 Hz para el Arreglo No.6 y de 0.679 Hz y 1.53 Hz para el Arreglo No.7.

De acuerdo con los argumentos descritos en el párrafo anterior, se confirma que la frecuencia asociada al modo dominante en traslación, para la dirección transversal (3) de la estructura de la plataforma marina de perforación, se encuentra en un rango de 0.664 Hz a 0.679 Hz y se concluye que la frecuencia del modo dominante en traslación de la estructura de la torre de perforación, se encuentra en un rango de 1.51 Hz a 1.53 Hz.

Del análisis de correlación espectral de todas las señales registradas en la segunda campaña, se pudo observar que las frecuencias identificadas presentan pequeñas diferencias en su valor, esto debido a la variabilidad de las condiciones bajo las cuales fueron grabadas las señales. Una vez identificado el rango de frecuencias asociado a los modos en traslación de la estructura en estudio, se procedió a obtener el promedio de las mismas, y los resultados de las frecuencias promedio se presentan a continuación en la tabla 5.41.

*Tabla 5.41. Frecuencias promedio identificadas para el modo dominante en traslación de la estructura de la plataforma marina y de la torre de perforación, (Segunda campaña de mediciones).*

Arreglo	Dirección Longitudinal ( 2 ) [ Hz ]		Dirección Transversal ( 3 ) [ Hz ]	
	Plataforma Marina	Torre de Perforación	Plataforma Marina	Torre de Perforación
No. 6	0.679	1.26	0.664	1.51
No. 7	0.682	1.29	0.679	1.53
<b>Promedio</b>	<b>0.681</b>	<b>1.275</b>	<b>0.672</b>	<b>1.520</b>

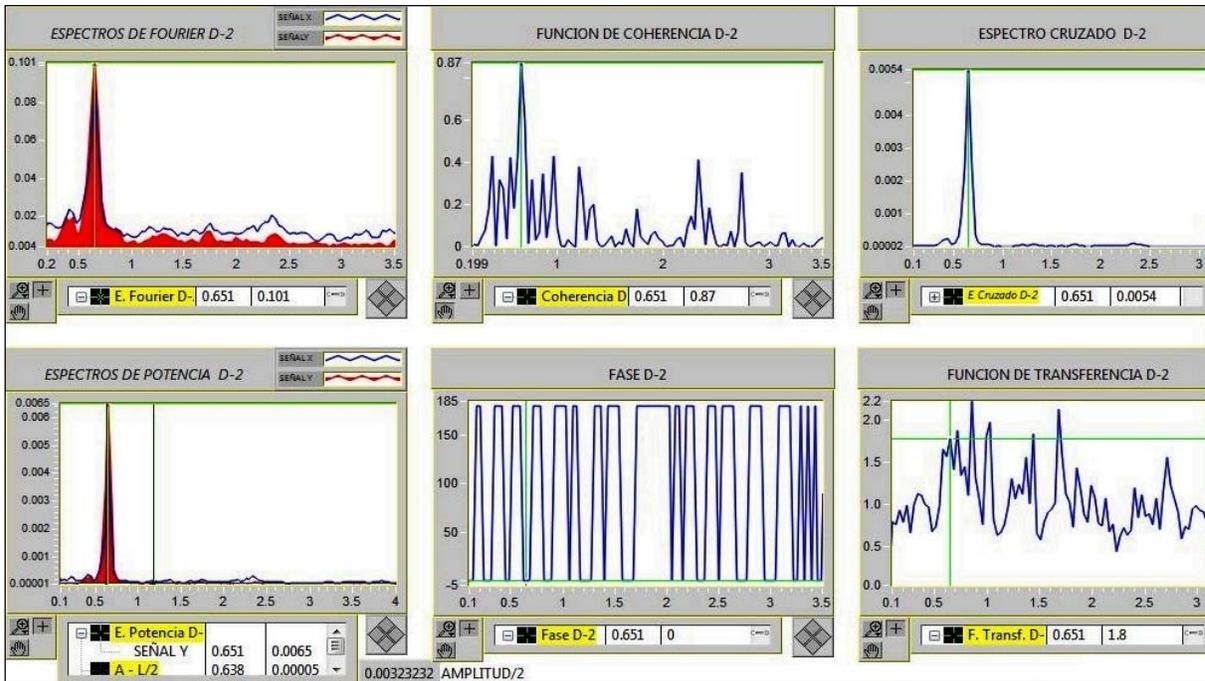


Fig. 5.64. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.1: Equipos E3 (señal X) y E2 (señal Y), registros analizados E3\_17501 y E2\_17501 del disparo 1, para la dirección longitudinal (2). Frecuencia traslacional: 0.651 Hz.

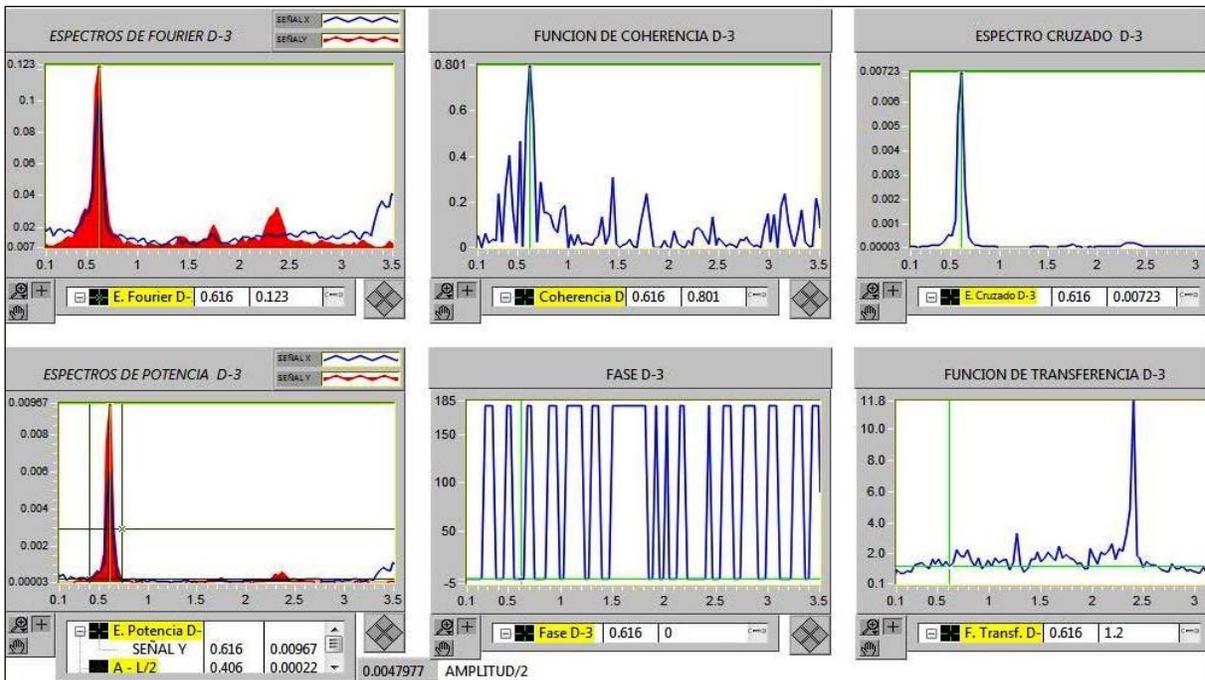


Fig. 5.65. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.1: Equipos E3 (señal X) y E2 (señal Y), registros analizados E3\_17502 y E2\_17502 del disparo 2, para la dirección Transversal (3). Frecuencia traslacional: 0.62 Hz.

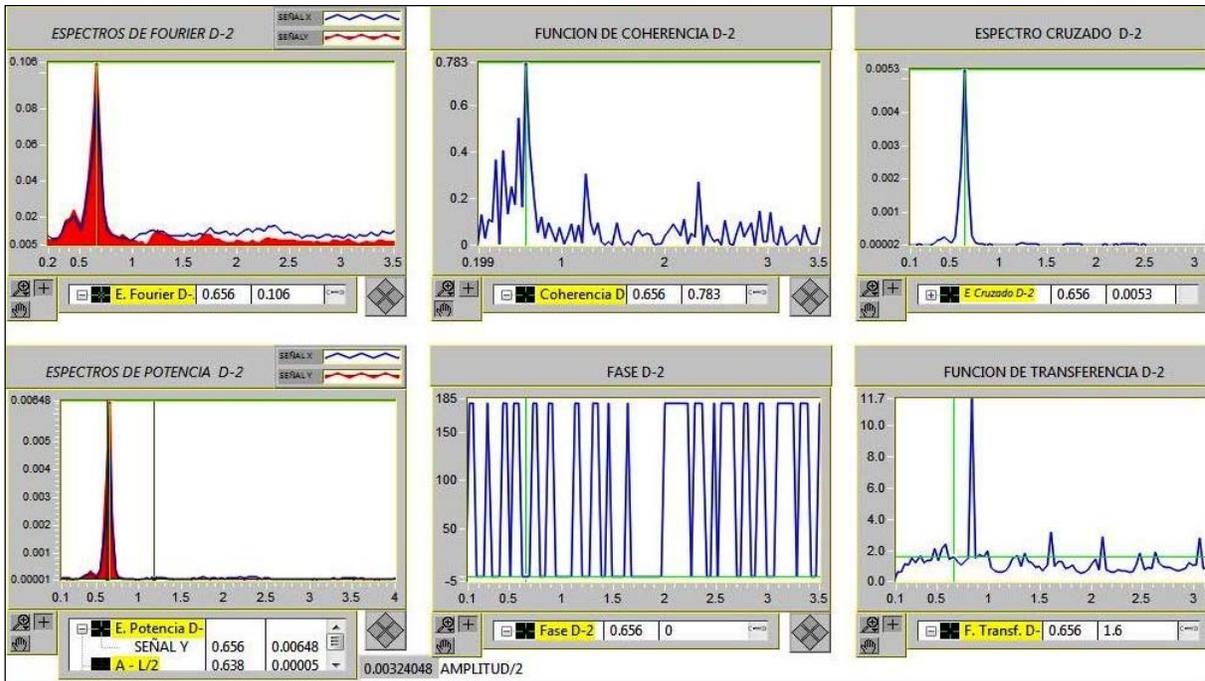


Fig. 5.66. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.1: Equipos E3 (señal X) y E2 (señal Y), registros analizados E3\_17502 y E2\_17502 del disparo 2, para la dirección Longitudinal (2). Frecuencia identificada: 0.65 Hz.

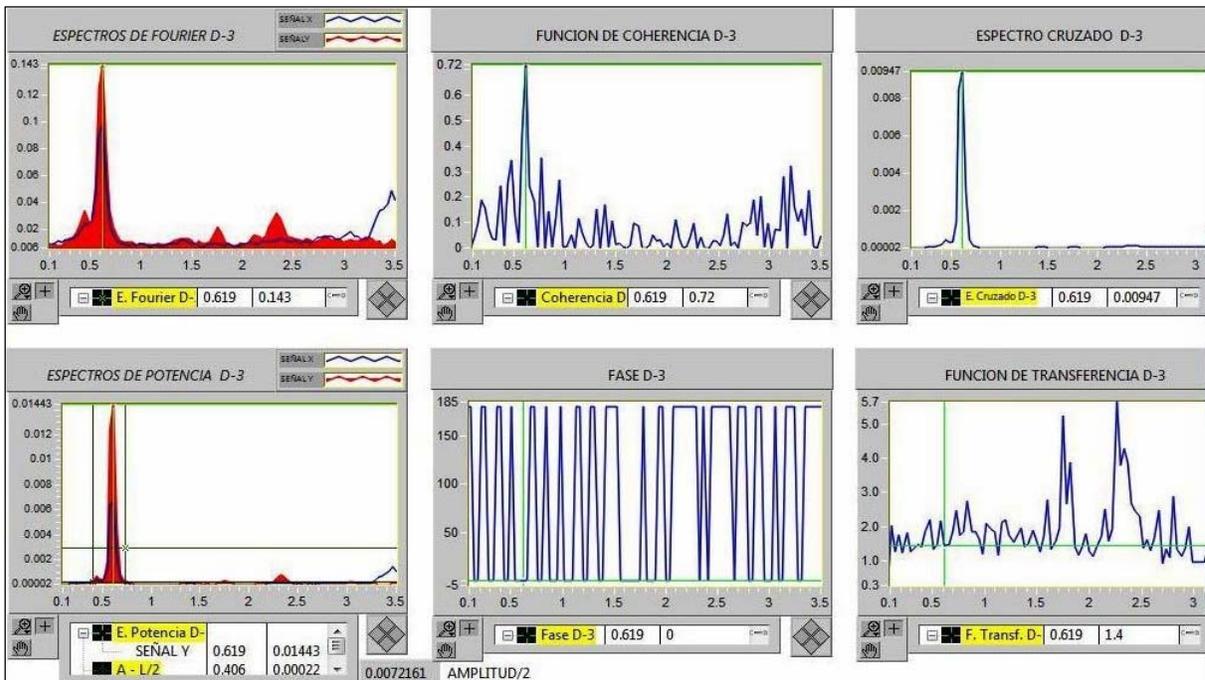


Fig. 5.67. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.1: Equipos E3 (señal X) y E2 (señal Y), registros analizados E3\_17502 y E2\_17502 del disparo 2, para la dirección Transversal (3). Frecuencia traslacional: 0.62 Hz.

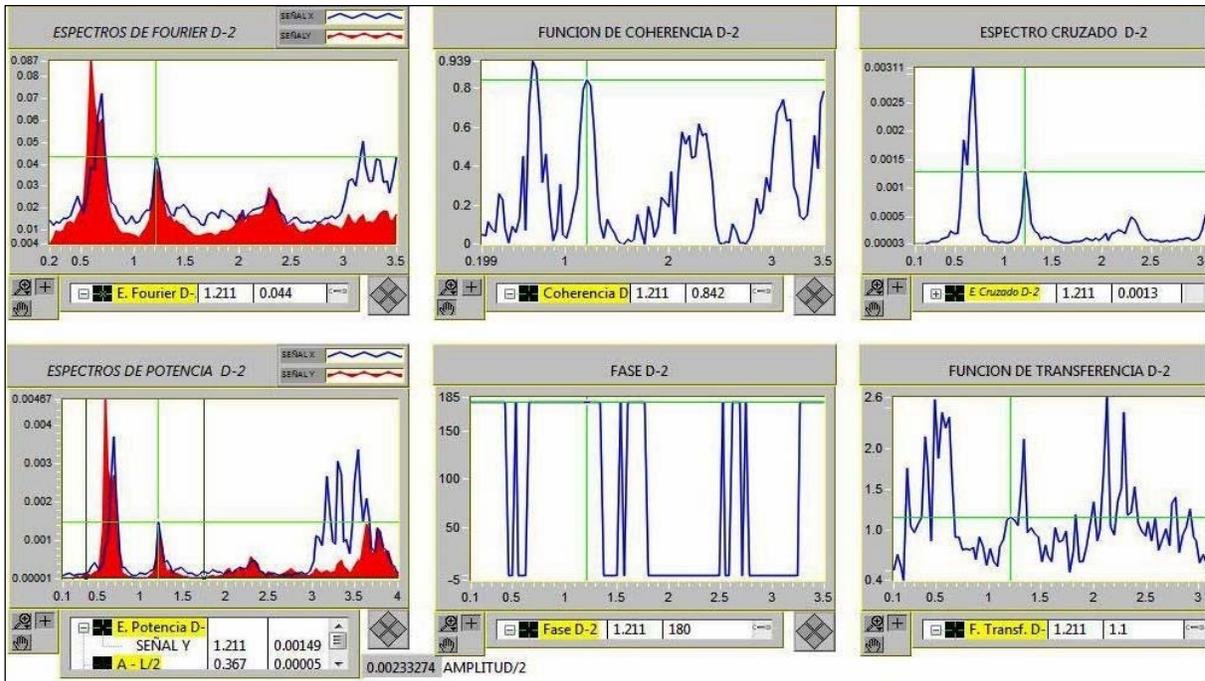


Fig. 5.68. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.3: Equipos E1 (señal X) y E2 (señal Y), registros analizados E1\_17705 y E2\_17705 del disparo 2, para la dirección Longitudinal (2). Frecuencia Torsional: 1.21 Hz.

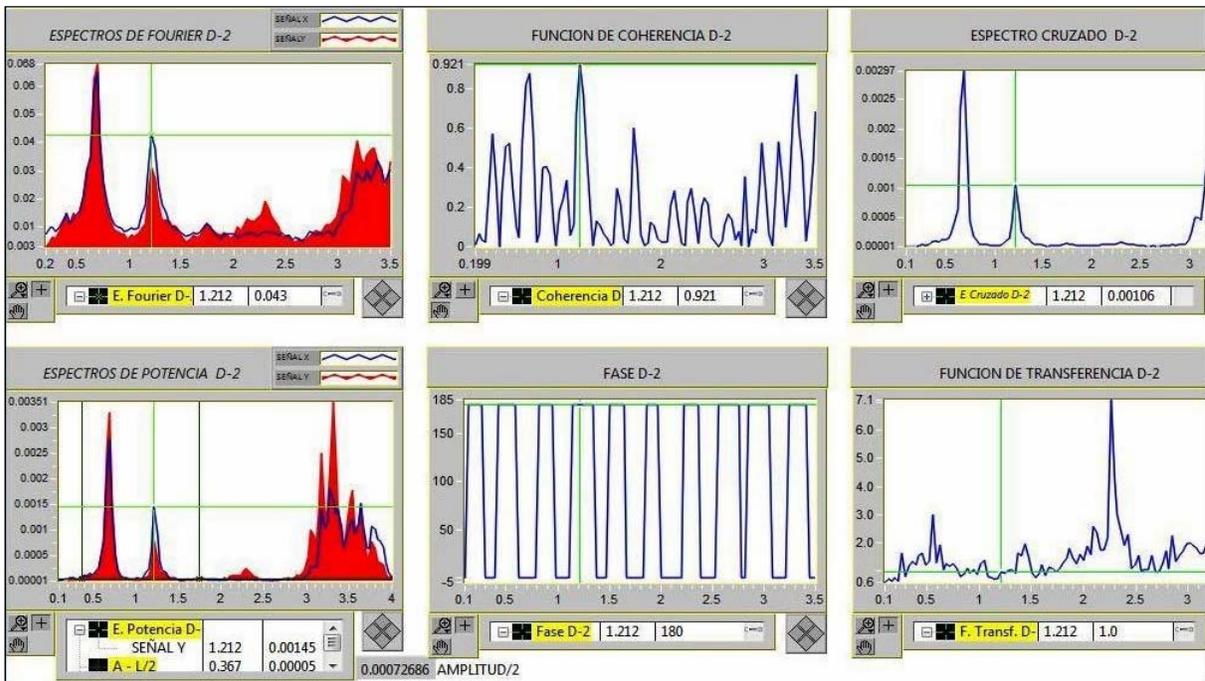


Fig. 5.69. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.3: Equipos E3 (señal X) y E6 (señal Y), registros analizados E3\_17705 y E2\_17705 del disparo 5, para la dirección Longitudinal (2). Frecuencia Torsional: 1.21 Hz.

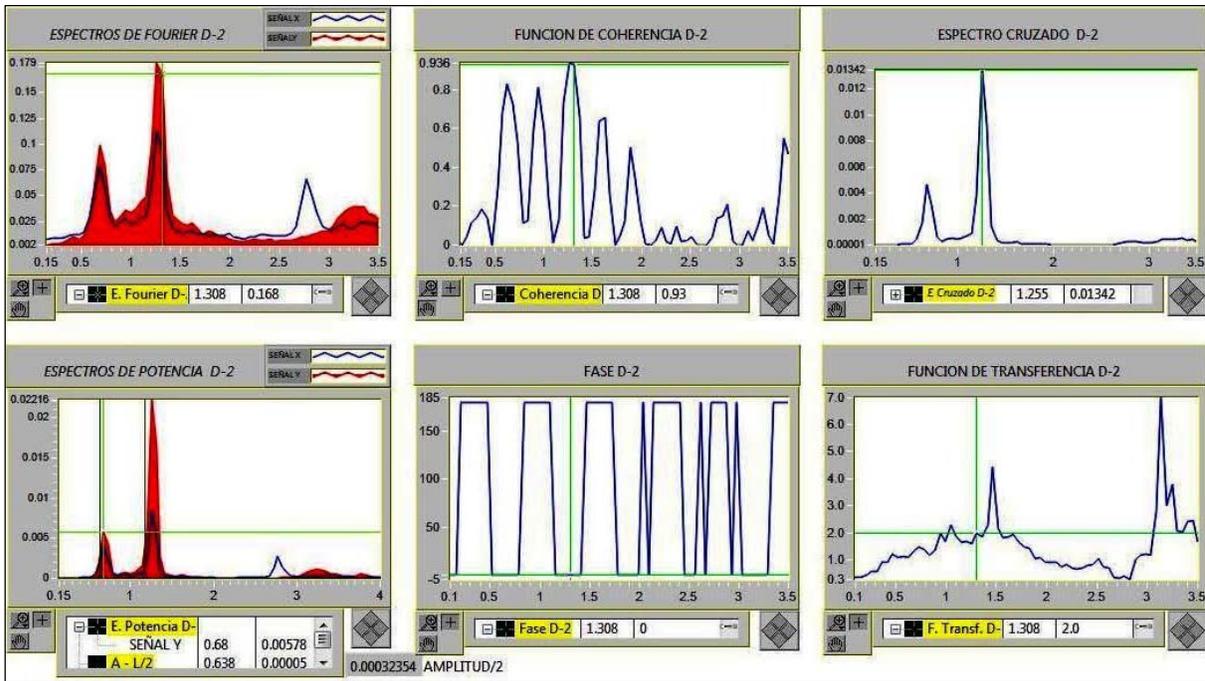


Fig. 5.70. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.6: Equipos E5 (señal x) y E6 (señal y), registros analizados E5\_23005 y E6\_23005 del disparo 5, para la Dirección Longitudinal (2). Frecuencias identificadas: 0.68 Hz y 1.3 Hz.

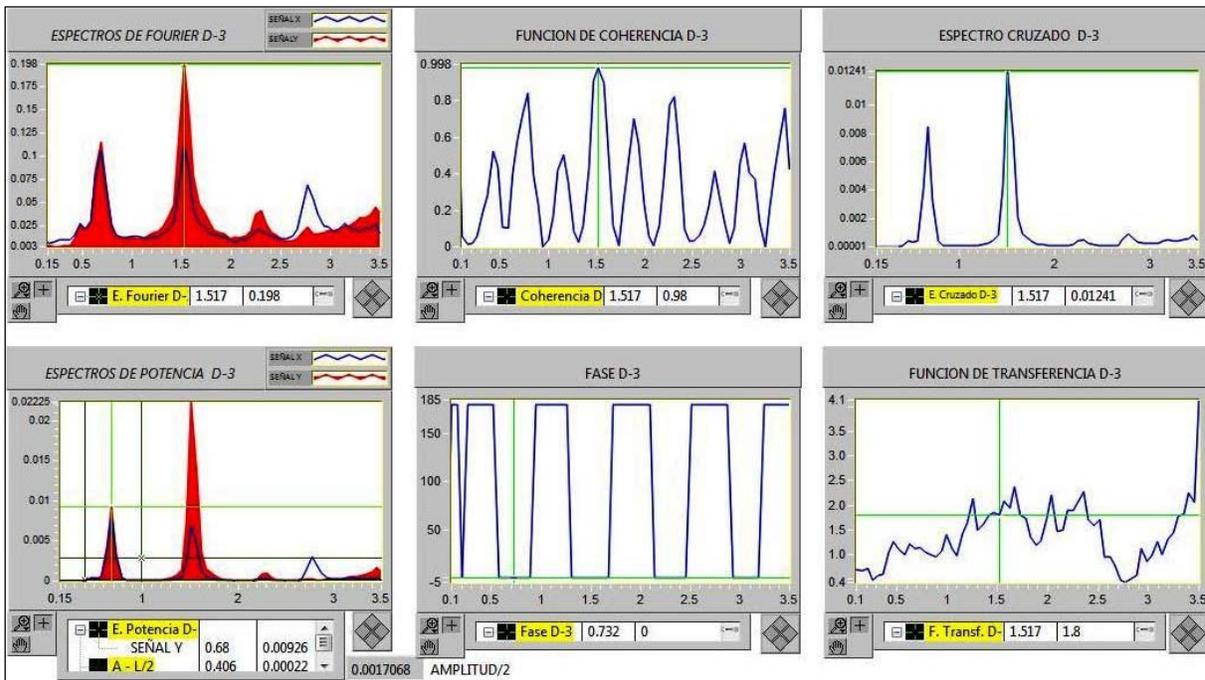


Fig. 5.71. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.6: Equipos E5 (señal x) y E6 (señal y), registros analizados E5\_23005 y E6\_23005 del disparo 5, para la Dirección Transversal (3). Frecuencias identificadas: 0.68 Hz y 1.52 Hz.

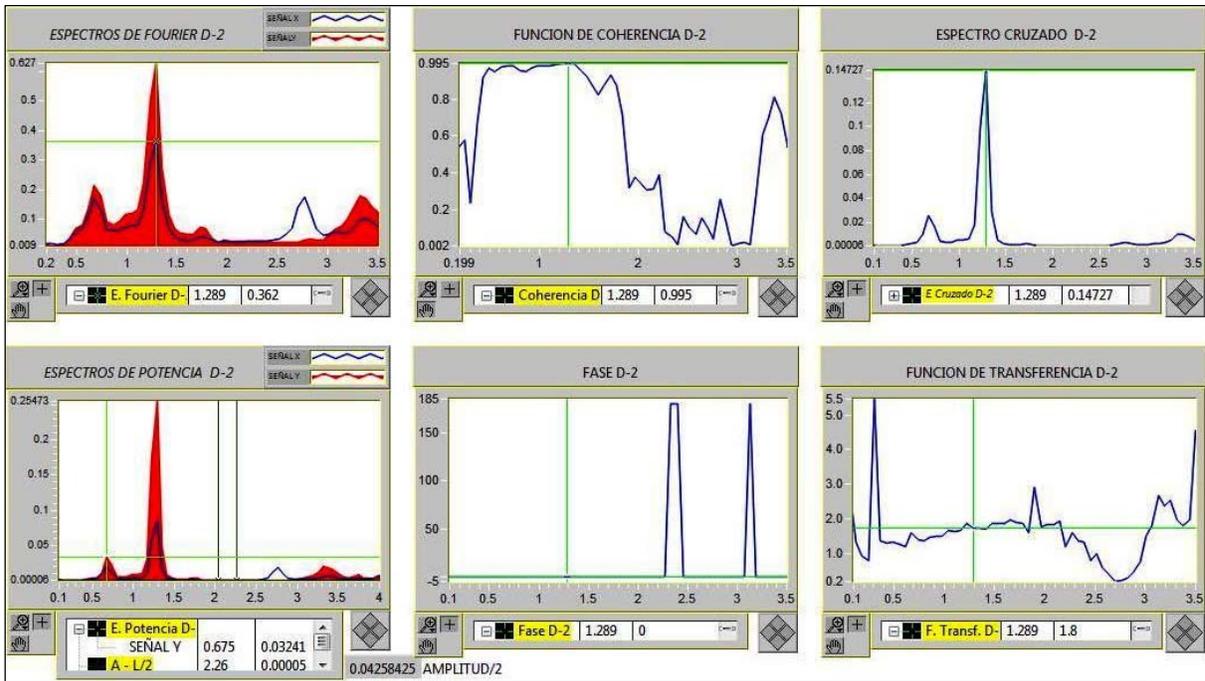


Fig. 5.72. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.6: Equipos E5 (señal x) y E6 (señal y), registros analizados E5\_23008 y E6\_23008 del disparo 8, para la Dirección Longitudinal (2). Frecuencias identificadas: 0.68 Hz y 1.29 Hz.

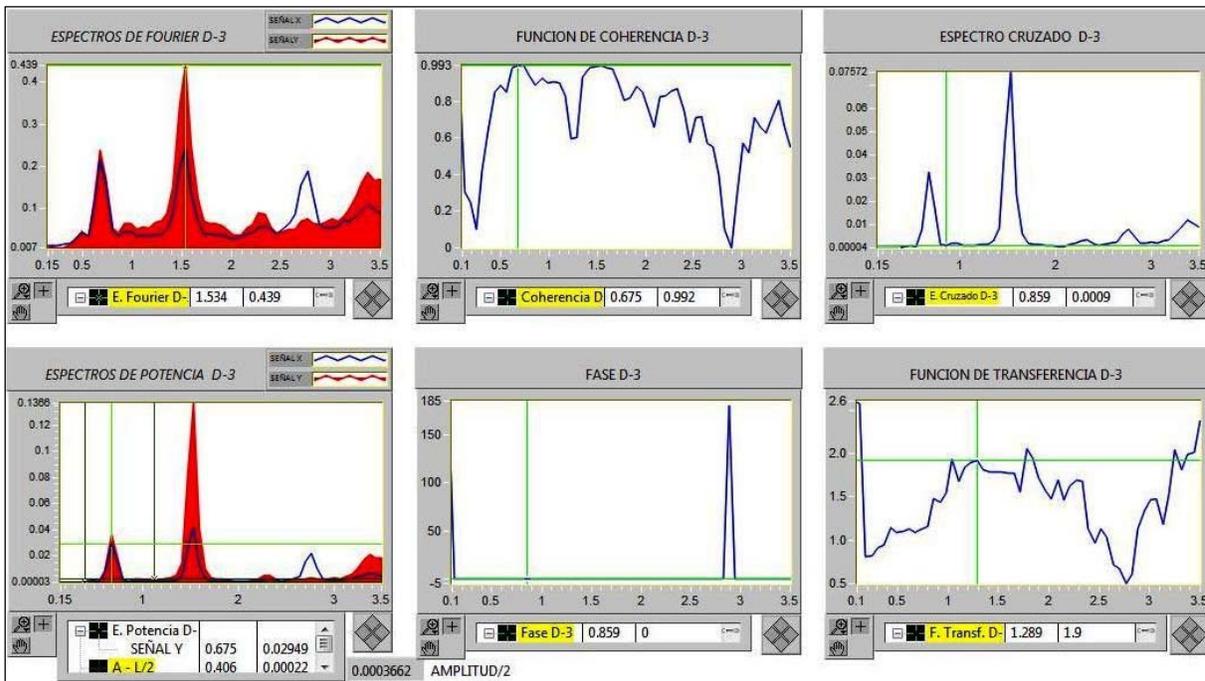


Fig. 5.73. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.6: Equipos E5 (señal x) y E6 (señal y), registros analizados E5\_23008 y E6\_23008 del disparo 8, para la Dirección Transversal (3). Frecuencias identificadas: 0.68 Hz y 1.53 Hz.

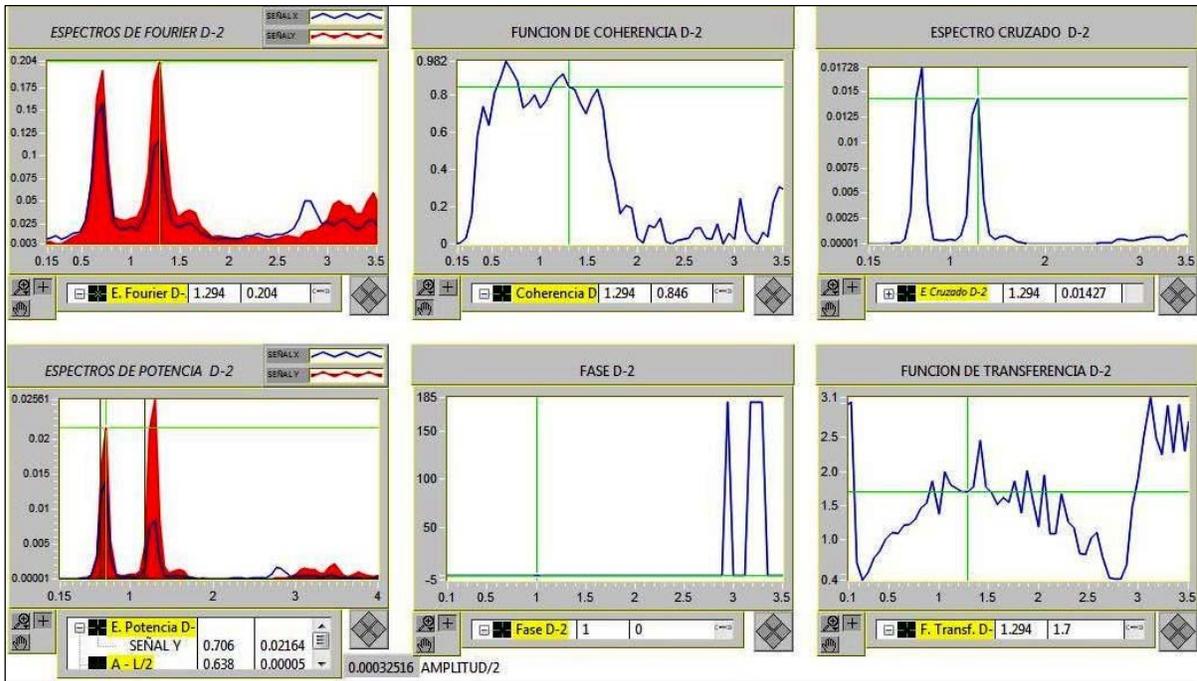


Fig. 5.74. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.6: Equipos E5 (señal x) y E6 (señal y), registros analizados E5\_23009 y E6\_23009 del disparo 9, para la Dirección Longitudinal (2). Frecuencias identificadas: 0.68 Hz y 1.29 Hz.

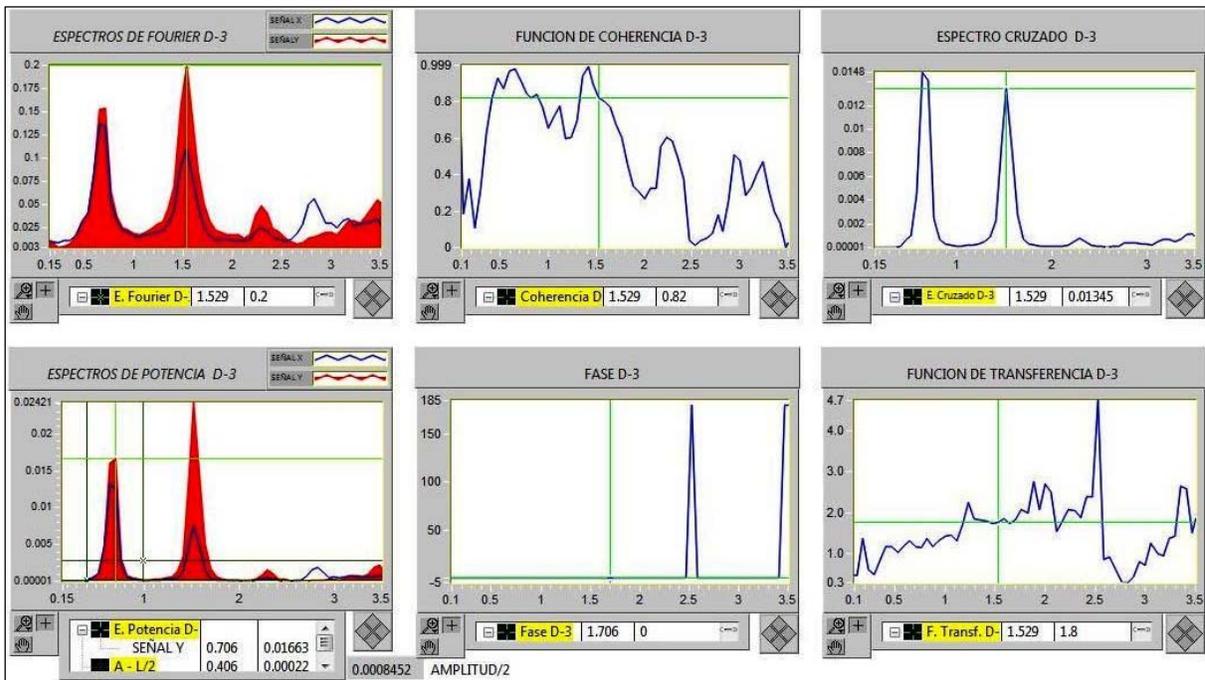


Fig. 5.75. Correlación espectral entre señales del Arreglo No.6: Equipos E5 (señal x) y E6 (señal y), registros analizados E5\_23009 y E6\_23009 del disparo 9, para la Dirección Transversal (3). Frecuencias identificadas: 0.68 Hz y 1.53 Hz.

#### 5.5.4 Periodos naturales de la plataforma y de su torre de perforación

Del análisis de resultados obtenidos a partir de la correlación espectral entre señales de la primera campaña de mediciones, se obtuvieron frecuencias de vibrar con valores promedio de 0.62 Hz para la dirección transversal (3) y de 0.65 Hz para la dirección longitudinal (2), asociadas al primer modo de vibrar en traslación de la plataforma marina. Estos valores de frecuencia corresponden a periodos de vibrar de 1.63 s y 1.54 s respectivamente, consistentes con lo que se esperaría en este tipo de estructuras, como la que es objeto de este estudio. En cuanto al modo con dominancia torsional se obtuvo una frecuencia de 1.21 Hz, que corresponde a un periodo de vibrar de 0.83 s, los valores antes mencionados se pueden observar en la tabla 5.42.

Tabla 5.42. Periodos determinados para los modos dominantes en traslación y torsión de la plataforma marina de perforación, (Primera campaña de mediciones).

Plataforma Marina de Perforación					
Periodo Traslacional: Dirección Longitudinal ( 2 )		Periodo Traslacional: Dirección Transversal ( 3 )		Periodo con dominancia Torsional	
Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]
0.62	1.6	0.65	1.5	1.21	0.8

A partir de la segunda campaña de mediciones, también se identificaron frecuencias de vibrar asociadas a la estructura de la plataforma marina con valores promedio de 0.68 Hz para la dirección longitudinal (2) y de 0.67 Hz para la dirección transversal (3), estos valores de frecuencia corresponden a periodos de vibrar de 1.6 s y 1.54 s respectivamente, y se pueden observar en la tabla 5.43. En dicha tabla también se muestra el resumen de los periodos obtenidos en ambas campañas de medición.

Cabe mencionar que los valores antes mencionados son prácticamente los mismos a los obtenidos en la primera campaña de mediciones. Las diferencias de estos valores, pueden atribuirse como ya sea mencionado al punto de medición en el que se registró la señal, ya que mientras en la primera campaña se hizo directamente sobre la estructura de las cubiertas de la plataforma, en la segunda campaña, las frecuencias identificadas se obtuvieron de la instrumentación en la parte superior de la torre de perforación, lo que manifiesta la interacción entre ambas estructuras y además que existe un acoplamiento en sus modos fundamentales.

Tabla 5.43. Comparativa de los Periodos obtenidos en las dos campañas de medición, asociados a los modos dominantes en traslación y torsión de la plataforma marina de perforación.

Plataforma Marina de Perforación						
Número de Campaña	Periodo Traslacional: Dirección Longitudinal ( 2 )		Periodo Traslacional: Dirección Transversal ( 3 )		Periodo con dominancia Torsional	
	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]
Primera campaña de mediciones	0.62	1.63	0.65	1.54	1.21	0.83
Segunda campaña de mediciones	0.68	1.60	0.67	1.49	1.23	0.81
Promedio =	0.65	<b>1.61</b>	0.66	<b>1.52</b>	1.22	<b>0.82</b>

En la tabla 5.41 presentada con anterioridad, se expusieron las frecuencias promedio asociadas al primer modo de vibrar en traslación de la Torre de Perforación, para cada una de las direcciones analizadas, dichas frecuencias identificadas se verificaron por medio de la correlación espectral entre señales registradas en distintos puntos de la estructura, obteniéndose reiteradamente los mismos valores de frecuencia con dominancia traslacional, los cuales corresponden a periodos de vibrar de 0.78 s (1.275 Hz) y 0.66 s (1.52 Hz) para las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) respectivamente, tabla 5.44.

También se identificó claramente una frecuencia de 2.77 Hz, asociada a un periodo de 0.36 s, el cual corresponde a la Torre de perforación, esta se muestra de manera importante en el análisis de las direcciones longitudinal (2) y transversal (3) de las señales obtenidas en los equipos colocados en el nivel intermedio y superior de la torre, evidencia que caracteriza a un modo con dominancia torsional, tabla 5.44.

A continuación se presenta la tabla 5.44, con el resumen de los periodos dominantes de la torre de perforación, identificados a partir de la segunda campaña de mediciones, cabe mencionar que estos periodos son consistentes con los esperados en estructuras de tales características.

Tabla 5.44. Periodos determinados para los modos dominantes en traslación y torsión de la estructura de la Torre de perforación, (Segunda campaña de mediciones).

Estructura de la Torre de Perforación					
Periodo Traslacional: Dirección Longitudinal ( 2 )		Periodo Traslacional: Dirección Transversal ( 3 )		Periodo con dominancia Torsional	
Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]	Frecuencia Identificada [ Hz ]	Periodo de Vibrar [ s ]
<b>1.275</b>	<b>0.78</b>	<b>1.52</b>	<b>0.66</b>	<b>2.77</b>	<b>0.36</b>

Por medio del análisis de las envolventes de los espectros de Fourier presentados en las figs. 5.60 a 5.63, se pudo observar que, además de las frecuencias correspondientes a los modos con dominancia traslacional y rotacional de la estructura de la Torre de Perforación, existen otras frecuencias de interés, las cuales pueden estar asociadas a modos superiores de vibrar de la torre que, por su amplitud, muestran una participación importante en la respuesta dinámica de su estructura, sin embargo, dado que únicamente se tienen puntos instrumentados en la base y parte superior de la torre, no se cuenta con la información completa para estimar con precisión otros modos superiores. Sin embargo, estos pueden ser estimados con la ayuda de un modelo analítico y correlacionar los valores de frecuencia obtenidos del análisis espectral.

### **5.5.5 Formas modales de la plataforma y de su torre de perforación**

Del análisis espectral de las señales registradas, y tomando como referencia para su obtención el Arreglo No.1, en el cual se consideró la colocación de los equipos de medición distribuidos verticalmente sobre las cubiertas de la plataforma marina de perforación y en la zona de acceso al embarcadero, es posible concluir que la respuesta dinámica de la plataforma está dominada por los primeros tres modos de vibrar. Esta conclusión se basa en el análisis de los valores de desplazamientos relativos horizontales de las cubiertas y de los puntos de medición ubicados en la cercanía de las columnas en la zona de pasillos.

En cuanto a la estructura de la torre de perforación, también se lograron determinar las frecuencias asociadas a los tres primeros modos de vibrar, y además se identificaron otras frecuencias asociadas a sus modos superiores de vibrar; sin embargo, con los puntos instrumentados en ambas campañas, no se tiene la información completa para estimar con exactitud otros modos superiores, estos tendrían que ser identificados mediante su modelo analítico y correlacionados con los valores de frecuencia obtenidos.

Como ya se mencionó para definir las formas modales completas, es necesario contar con el modelo analítico de la estructura en cuestión, y posteriormente calibrarlo con los parámetros dinámicos obtenidos de forma experimental; sin embargo, cabe mencionar que no se tuvo a disposición dicho modelo, ni tampoco se contó con la información necesaria para su reproducción.

### 5.5.6 Cálculo de la Fracción de Amortiguamiento Crítico de la Plataforma

El cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico de la plataforma marina de perforación, se obtuvo seleccionando los espectros de potencia correspondientes a los registros más representativos del comportamiento dinámico de la cubierta No.2, particularmente se eligieron los registros del equipo E2 ubicado al centro de dicha cubierta, y generados en el arreglo No.1, esta elección se debió a que en esta zona se obtuvieron las señales con mejor calidad, la cual es una característica deseable para la aplicación del método empleado (Kawasumi y Shima, 1965). En total se analizaron 5 espectros de potencia para la dirección longitudinal (2) y otros 5 para la dirección transversal (3), finalmente se realizó el promedio de los resultados obtenidos. A manera de ejemplo en las figs. 5.76 y 5.77, se presentan dos de los cálculos efectuados para su obtención, así como los respectivos espectros de potencia involucrados en dicho cálculo, uno por cada dirección de estudio.

En cuanto al cálculo del porcentaje de amortiguamiento de la estructura de la torre de perforación, también se eligieron espectros de potencia de registros representativos del equipo colocado en la parte más alta de la torre (Equipo E6 del Arreglo No.6), ya que en éste se obtuvieron las señales de mejor calidad, por lo que en las figs. 5.78 y 5.79 se muestran dos de los cálculos realizados para su obtención y los espectros de potencia utilizados.

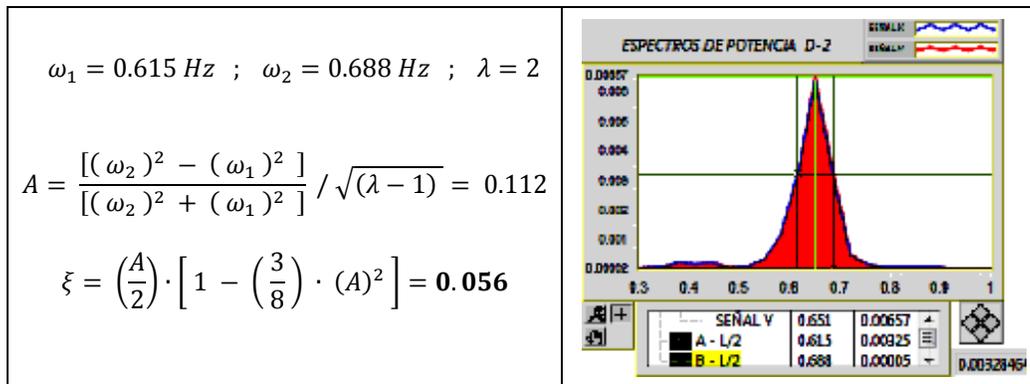


Fig. 5.76. Cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico: Espectro de potencia correspondiente a la señal del Equipo E2, Disparo 1 del Arreglo No.1, Dirección Longitudinal (2). Valor obtenido: 0.056.

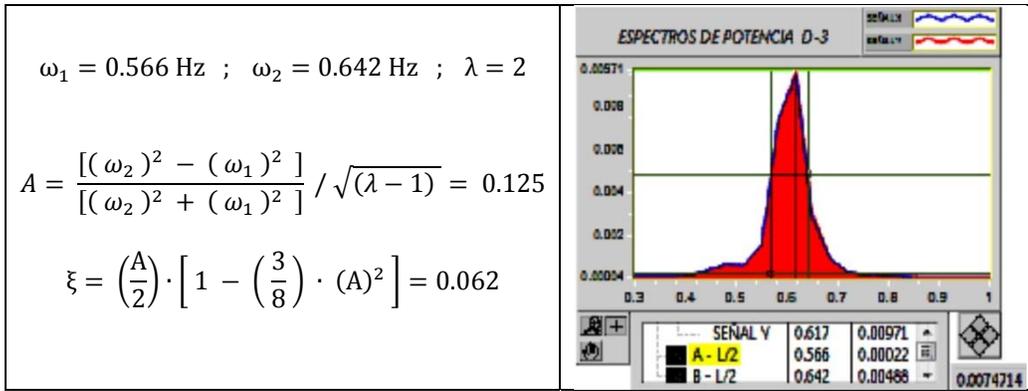


Fig. 5.77. Cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico: Espectro de potencia correspondiente a la señal del Equipo E2, Disparo 1 del Arreglo No.1, Dirección Transversal (3). Valor obtenido: 0.062.

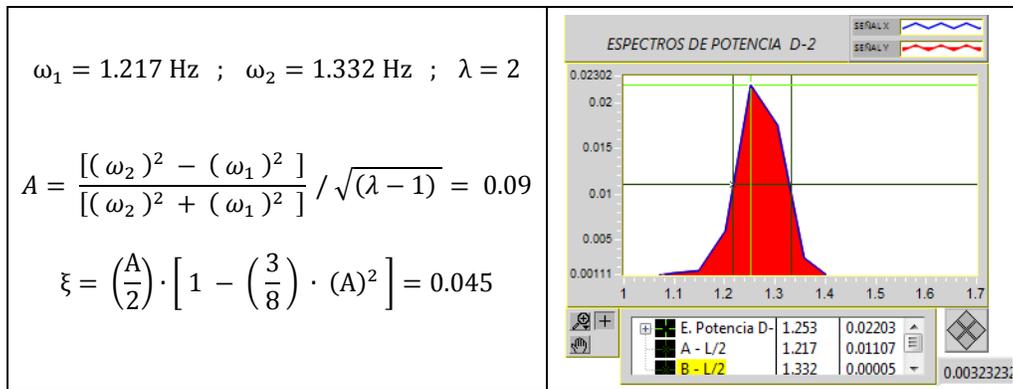


Fig. 5.78. Cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico: Espectro de potencia correspondiente a la señal del Equipo E6, Disparo 5 del Arreglo No.6, Dirección Longitudinal (2). Valor obtenido: 0.045.

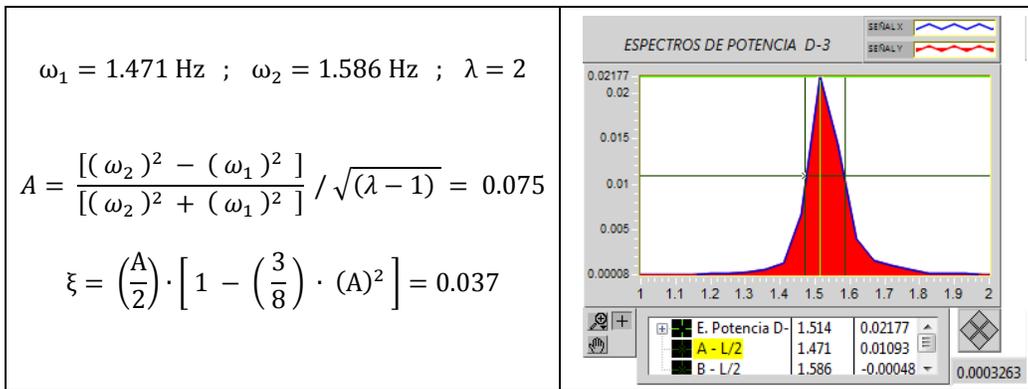


Fig. 5.79. Cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico: Espectro de potencia correspondiente a la señal del Equipo E6, Disparo 5 del Arreglo No.6, Dirección Transversal (3). Valor obtenido: 0.037.

**5.5.7 Resultados de los porcentajes de amortiguamiento crítico**

A partir de los cálculos realizados, se obtuvieron los porcentajes de amortiguamiento crítico de la Plataforma marina de perforación, por lo que en tabla 5.45 se muestra el resumen de los porcentajes obtenidos, para las componentes longitudinal (2) y transversal (3), como ya se mencionó estos se determinaron considerando el promedio de cinco espectros de potencia para cada dirección analizada.

Es de interés mencionar al inicio de los cálculos, en la obtención de la fracción de amortiguamiento crítico, se obtuvieron valores que resultaron relativamente mayores a los reportados en la literatura especializada; sin embargo, esto es consecuencia principalmente de las características de la metodología empleada, ya que si se tienen espectros que tienen frecuencias de vibrar muy cercanas, para estos casos, las cercanías de las frecuencias ocasionan que lo que en realidad está formado por dos picos independientes, en apariencia se muestre un solo pico en común, y que el rango de frecuencias considerado en las expresiones utilizadas ( $\omega_2 - \omega_1$ ), sea mayor al real, y en consecuencia el amortiguamiento se incrementa. Dicho lo anterior con el propósito de solucionar el problema ya expuesto, se seleccionaron espectros de otros registros obtenidos en esa misma ubicación, en el que se tiene una mejor definición del pico del espectro de potencia asociado a la frecuencia de interés, con lo cual se obtuvieron valores de amortiguamiento consistente con los esperados en este tipo de estructuras.

Tabla 5.45. Fracciones de Amortiguamiento Crítico de la Plataforma marina de perforación.

Fracción de Amortiguamiento Crítico $\left[ \frac{\% \xi}{5}_{prom} \right]$	
Dirección longitudinal (2) *Frecuencia 0.65 Hz	Dirección Transversal (3) *Frecuencia 0.62 Hz
5.6	6.2 a 6.5

El amortiguamiento de 5.6% calculado para la frecuencia de 0.65 Hz, se considera congruente con el comportamiento de la estructura, ya que está frecuencia está asociada a un modo de vibrar global de la plataforma en la que existen, además de las de la cubiertas, otras fuentes importantes de amortiguamiento como el oleaje, que incrementan notablemente su valor. Otra fuente adicional de amortiguamiento puede ser el sistema de tuberías de perforación, así como la

maquinaria existente. Sin embargo, en ambos casos no se tiene información para identificar su contribución de forma independiente.

De las señales tomadas como muestra representativa pertenecientes al Arreglo No.6, se determinó que la fracción de amortiguamiento crítico para la estructura de la Torre de perforación varía desde 3.7% a 5.4%, rango de valores considerado como representativo en estructuras metálicas, según la literatura especializada. Por lo anterior para los fines de modelación estructural se puede utilizar el promedio de este rango.

# CAPÍTULO 6

---

## *Revisión de vibraciones en estructuras industriales*

---

### **6.1 Importancia de la revisión de vibraciones**

En las últimas décadas se ha incrementado el número de casos, de estructuras sometidas a solicitaciones severas producidas por vibraciones nocivas, por lo cual surge la necesidad de acotar los niveles máximos de estas vibraciones, para evitar deterioros que pudieran ocasionar su colapso. Por lo anterior, en este apartado se presentarán las Normativas Internacionales, que definen los criterios de aceptación para el control de vibraciones, particularmente aplicadas a estructuras industriales como es el caso de las plataformas marinas, con la finalidad de implementar la más idónea en el ejemplo desarrollado en este trabajo de investigación, Benjumea, (2003).

Es de interés mencionar que las Normativas Internacionales vigentes para el control de efectos de vibraciones, generalmente están basadas en la experiencia del estudio de algunas décadas, las cuales incluyen una gran cantidad de observaciones y mediciones de daños provocados por vibraciones. Sin embargo, para su aplicación en países diferentes a los de su origen, es necesario tomar en cuenta las consideraciones que fueron asumidas para su concepción, por ejemplo el tipo de sistema estructural, materiales utilizados, etc. No obstante existen otros reglamentos para el control de vibraciones, que no se distingue el tipo de fuente, la diferenciación se realiza por medio de la obtención de parámetros de movimiento, estableciendo diferencias según la cantidad de solicitaciones, duración de los máximos registrados en la señal. Así mismo algunas Normas exigen, evaluar las vibraciones en las tres direcciones ortogonales de la estructura.

Por lo anterior si se tienen presentes las limitantes respecto al uso de estas Normas, también pueden ser implementadas como guía en países que no cuenten con normativas propias, como es el caso de nuestro país.

## 6.2 Criterios de aceptación de vibraciones en estructuras

Los criterios de aceptación de vibraciones presentados en la mayoría de las Normas Internacionales, permiten valorar el grado de afectación en las estructuras, personas o actividades, principalmente se dividen en tres tipos para valorar su aceptación: (1) Criterios de integridad estructural, (2) Criterios psicológicos (percepción y respuesta del cuerpo humano) y (3) Criterios de calidad en las operaciones, Benjumea, (2003).

Las magnitudes de los valores límite para las vibraciones en las estructuras, generalmente son calculadas, sin embargo también pueden ser registradas en situ, usualmente a través de valores de aceleración, velocidad, desplazamientos, frecuencias, amplitudes, etc., posteriormente dichas magnitudes son evaluadas mediante las Normas existentes, por lo regular su comparativa está en función de si los efectos de estas vibraciones afectan el confort de sus ocupantes, ante efectos psicológicos o parámetros de sensibilidad tales como son los acústicos, ópticos, mecánicos, etc., por otro lado también permiten valorar el grado de afectación en las estructuras.

Generalmente en la mayoría de las Normas y recomendaciones concernientes al control de vibraciones en estructuras, la velocidad de vibración de una partícula, es el parámetro utilizado como variable básica, para estimar los niveles máximos de vibración que pudieran ocasionar daños a estas, regularmente esta velocidad se encuentra asociada a frecuencias bajas.

Por otro lado, la frecuencia dominante o de resonancia, es la segunda variable básica en la evaluación del potencial de daños en estructuras sometidas a vibraciones nocivas, también es común que para su evaluación se utilicen las aceleraciones pico. Por lo general las frecuencias utilizadas en las Normativas, están asociadas a los modos de vibrar de la estructura, ya que dependen de su comportamiento dinámico y reflejan la respuesta del sistema estructural.

En los siguientes apartados se describen los criterios de aceptación mencionados anteriormente, así como algunas de las Normativas Internacionales, más relevantes para el control de los valores límite para el control de las vibraciones en estructuras.

### 6.2.1 Criterios de integridad estructural

Las vibraciones que afectan la integridad de las estructuras, pueden causar significativas afectaciones en sus elementos estructurales y no estructurales. Dichas vibraciones pueden ocasionar la presencia de grandes deformaciones, problemas de fatiga, incremento de esfuerzos, agrietamientos, incremento de patologías ya existentes, etc. A continuación se presentan algunos criterios de integridad estructural, establecidos en tres de las normativas más comúnmente utilizadas para establecer los niveles máximos de vibraciones.

- **Normativa DIN 4150, P-III, (1999)**

El Instituto de Normalización Alemana DIN, describe varios criterios de los niveles máximos de vibración en edificios y sus elementos estructurales, asociados a efectos de vibraciones de carácter internas o externas. En esta se definen los límites de las vibraciones que no supongan la pérdida de servicio de la estructura, también considera la afectación de su estabilidad y la reducción de la capacidad resistente de las losas o cubiertas de entrepiso. Por lo anterior esta Norma es comúnmente utilizada para evaluar el efecto de las vibraciones bajo el criterio de integridad estructural.

Para su aplicación se requiere de la comparación de parámetros como, las velocidades, las frecuencias o las tensiones producidas por cargas dinámicas. Se basa en tres criterios de aceptación, que dependen de la duración de las vibraciones, dichos criterios son los siguientes: (1) Vibraciones estructurales de corta duración, (2) Vibraciones estructurales permanentes y (3) Vibraciones permanentes en las losas de entrepisos.

En la fig. 6.1 y la tabla 6.1 se presentan los valores guía de las velocidades de vibración máximas para la cimentación y el plano horizontal del piso más alto, aplicados a varios tipos de estructuras para criterios de vibraciones de corta duración. Si los valores registrados de velocidad superan estos límites se tendrían efectos dinámicos nocivos, que podrían estar asociados a patologías externas, las cuales pueden provocar daños significativos a las estructuras, incluso ocasionar la interrupción de su uso.

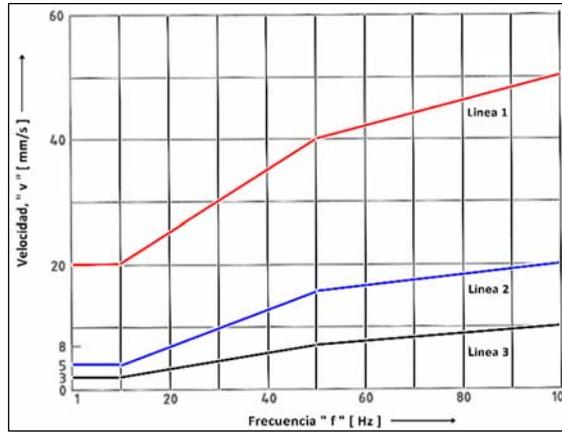


Fig. 6.1. Velocidades máximas para evaluar las cimentaciones, bajo vibraciones de corta duración. Traducción: DIN 4150, P-III, (1999).

Tabla 6.1. Valores guía de las velocidades de vibración máximas, para evaluar los efectos de corta duración en la cimentación y el plano horizontal del piso más alto de varios tipos de estructuras. Traducción: DIN 4150, P-III, (1999).

Tipo de estructura		Valores Guía para velocidades de vibración "v" [mm/s]			
		Vibración en la cimentación para frecuencias de:			Vibración en el plano horizontal del piso más alto en todas las frecuencias
		1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100 Hz	
1	Edificios con propósitos comerciales, industriales y edificios con diseños similares	20	20 a 40	40 a 50	40
2	Viviendas y edificios de diseño y/o ocupación similares	5	5 a 15	15 a 20	15
3	Estructuras que, por su particular sensibilidad a las vibraciones no puede ser clasificada bajo las líneas 1 y 2 y que son de gran valor intrínseco (p.e. edificios listados en orden de preservación)	3	3 a 8	8 a 10	8

En la tabla 6.2 Se muestran los valores de las velocidades máximas para el plano del piso más alto de varios tipos de estructuras para vibraciones continuas de larga duración. Estos valores se aceptan como límite seguro para la integridad estructural de edificios industriales.

Tabla 6.2: Valores límite para las velocidades de vibración en el plano horizontal del último nivel, para evaluar los efectos de integridad estructural en vibraciones de larga duración. Traducción: DIN4150, P-III, (1999).

Tipo de estructura		Valores guía para velocidad en mm/s, de vibración en el plano horizontal del piso más alto en todas las frecuencias
1	Edificios con propósitos comerciales, industriales y edificios con diseños similares	10
2	Viviendas y edificios de diseño y/o ocupación similares	5
3	Estructuras que, por su sensibilidad particular a las vibraciones no puede ser clasificada bajo las líneas 1 y 2 y que son de gran valor intrínseco (p.e. edificios listados en orden de preservación)	2.5

- **Directriz KDT 046/72 (1972)**

Normativa presentada por la Cámara Tecnológica de la antigua República Democrática Alemana, también diferencia cuatro categorías para clasificar a las estructuras, mismas que se muestran en la tabla 6.3 Para aplicar sus criterios de aceptación se requieren conocer las velocidades pico de las vibraciones registradas.

Tabla 6.3. Definición de las categorías estructurales, según la KDT 046/72, (1972).

Categoría estructural		Vz,adm [mm/s]
I	Monumentos Históricos	2
II	Viviendas de madera	5
III	Construcción con muros (por ejem: estructuras con muros, losas, bloques, mampostería)	10
IV	Estructuras a base de marcos (por ejem: edificios de acero, de concreto reforzado, madera)	30

En la fig. 6.2 se presentan los valores límite, de las velocidades de vibración que establece la directriz alemana para las diferentes categorías estructurales mostradas en la tabla anterior.

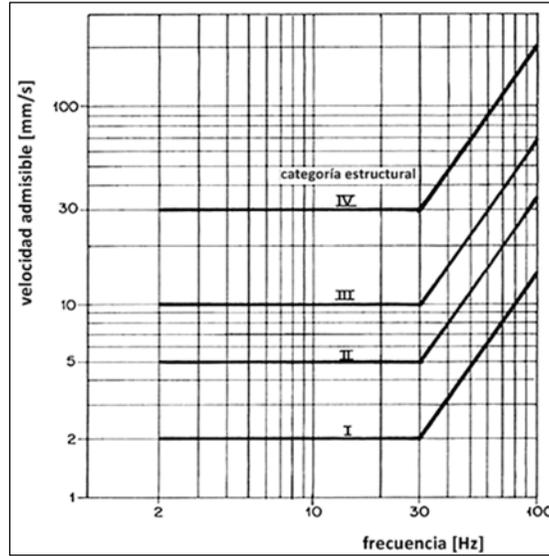


Fig. 6.2. Valores Límite para las velocidades de vibración, según la KDT 046/72, (1972)

• **Normativa Suiza SN 640312 (1978)**

La Norma Suiza SN 640312, diferencia cuatro categorías para clasificar a las estructuras, principalmente de acuerdo con el tipo de construcción, esta clasificación se presenta en la tabla 6.4. Para aplicar sus criterios de aceptación se requiere conocer la velocidad pico de las vibraciones registradas y los valores máximos admisibles para las diferentes categorías se presentan en la tabla 6.5.

Tabla 6.4. Definición de las categorías estructurales, según la SN 640312, (1978).

Categoría Estructural	Definición
I	Estructuras de acero y de concreto reforzado, como son edificios industriales, puentes, mástiles, muros de retención, tuberías aparentes; Estructuras subterráneas como cavernas, túneles, galerías, revestidas y sin revestir
II	Edificios con bases de concreto y muros de cimentación, sobre muros de concreto, muros de mampostería, muros de retención de ladrillo, tuberías sepultadas; Estructuras subterráneas como cavernas, túneles, galerías, con revestimiento de mampostería.
III	Edificios con cimentaciones de concreto y muros, y sobre muros de mampostería, o con pisos de viguetas de madera.
IV	Edificios que son particularmente vulnerables y que vale la pena proteger

Tabla 6.5. Valores máximos admisibles, según los criterios de aceptación de la SN 640312, (1978).

Categoría Estructural	Fuente M		Fuente S	
	f [ Hz ]	Vmax [ mm/s ]	f [ Hz ]	Vmax [ mm/s ]
I	10 ÷ 30	12	10 ÷ 60	30
	30 ÷ 60	12 ÷ 18*	60 ÷ 90	30 ÷ 40**
II	10 ÷ 30	8	10 ÷ 60	18
	30 ÷ 60	8 ÷ 12*	60 ÷ 90	18 ÷ 25**
III	10 ÷ 30	5	10 ÷ 60	12
	30 ÷ 60	5 ÷ 8*	60 ÷ 90	12 ÷ 18**
IV	10 ÷ 30	3	10 ÷ 60	8
	30 ÷ 60	3 ÷ 5*	60 ÷ 90	8 ÷ 12**
Fuente M: Maquinaria, tránsito, obras de construcción - ( * ) Los valores pequeños aplicados a 30 Hz, y los altos a 60 Hz, con interpolación entre ellos.				
Fuente S: Operaciones con explosivos - ( ** ) Los valores bajos aplicados a 60 Hz y los altos a 90 Hz, con interpolación entre ellos.				

**6.2.2 Criterios psicológicos (Percepción y respuesta del cuerpo humano)**

La percepción humana ante las vibraciones presentadas en las estructuras, depende en gran parte a la falta de confort o malestar que se percibe a niveles diferentes de vibración, dependiendo de las situaciones particulares en las que se presenten. Sin embargo, este es un parámetro útil para establecer los valores admisibles de vibración en los sistemas estructurales. La intensidad de la percepción humana, se mide con parámetros físicos, tales como la amplitud de la frecuencia, la aceleración, velocidad, desplazamientos, y la duración de las vibraciones. Por lo que a continuación se describen algunos criterios establecidos en dos de las normativas utilizadas para determinar los niveles máximos de aceptación de vibraciones por percepción humana.

- **Ministerio Soviético de Ingeniería metalúrgica y química (1955)**

En la tabla 6.6 se muestran los criterios de aceptación por el Ministerio Soviético de Ingeniería Metalúrgica y Química, (1955). Para determinar los valores admisibles de vibración por percepción humana de las vibraciones en estructuras bajo esta Normativa, se requiere conocer los parámetros siguientes: las frecuencias, las aceleraciones, las velocidades y los desplazamientos.

Tabla 6.6. Niveles de percepción o valores máximos permisibles de vibración, según el Ministerio Soviético de Ingeniería Metalúrgica y Química (1955).

Efecto de vibración en las personas	frecuencias 1 ÷ 10 Hz	frecuencias 10 ÷ 100 Hz
	$a_{max}$ [ mm/s <sup>2</sup> ]	$v_{max}$ [ mm/s ]
Imperceptible	10	0.16
Apenas perceptible	40	0.64
Claramente perceptible	125	2.0
Molesto para las personas	400	6.4
desagradable, doloroso si es continuo	1000	16.0
perjudicial	> 1000	> 16.0

En la figura 6.3 se presentan los valores permisibles de vibración, por el criterios de percepción humana, para su estimación es necesario contar con las frecuencias y los desplazamientos máximos registrados de acuerdo al Ministerio Soviético de Ingeniería Metalúrgica y Química (1955).

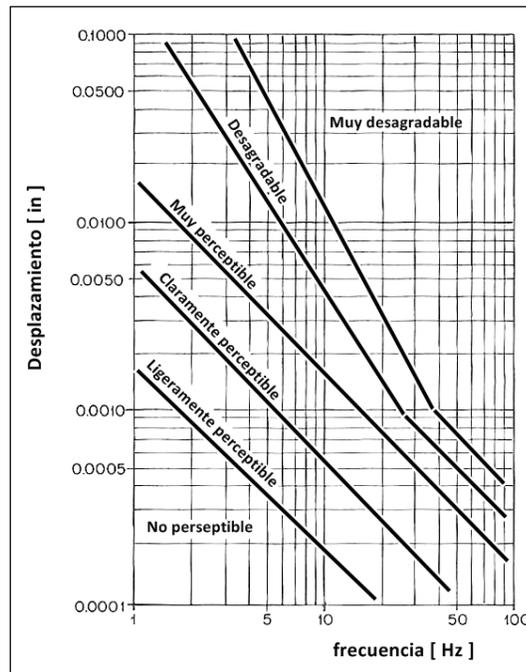


Fig. 6.3. Obtención de la percepción de vibraciones en función de su frecuencia y desplazamiento, de acuerdo al Ministerio Soviético de Ingeniería Metalúrgica y Química (1955).

• **Norma Australiana AS2670 (2001)**

Los límites de exposición humana ante vibraciones, presentadas en la Norma Australiana AS2670 (Australian Standards AS2670-2001), se muestran en la curva base de la fig. 6.4. Este criterio de percepción de las vibraciones en estructuras, están en función de la dirección del movimiento (horizontal o vertical), de la frecuencia vibrar y de las aceleraciones de vibración registradas.

Dependiendo del tipo de estructura y de la aceleración registrada, la curva base es multiplicada por un factor para determinar si su valor es admisible. En fig. 6.4 se graficó el nivel de aceptación de vibración para el confort humano en estructuras industriales, como es el caso de las plataformas marinas. Este nivel de confort se obtuvo graficando sobre la curva base de la Norma, una aceleración de 0.01 m/s<sup>2</sup> (a 20 Hz) asociada a niveles de vibración aceptables para este tipo de estructuras, este valor de aceleración se multiplicó por un factor de ocho, que es el indicado para estructuras industriales, dicho factor se obtuvo de la tabla 6.7.

Es de interés mencionar que la revisión de los estados límite de vibraciones para los casos de estudio desarrollados en este trabajo de investigación, se realizará mediante esta Norma, por lo que cuando se realice la comparativa de los valores admisibles vs los registrados, para las estructuras en estudio, los valores pico que se encuentren por encima de la curva base factorizada no serán admisibles de acuerdo a la AS2670.2.

*Tabla 6.7. Factores para afectar la curva base, aplicados a diferentes tipos de estructuras y ambientes de trabajo (AS2670.2).*

Categoría	Tiempo	Vibración continua o intermitente	Vibración de excitación Transitoria con varias ocurrencias por día
Áreas de trabajo crítico (por ejemplo algunos quirófanos de hospitales, algunos laboratorios de precisión, etc)	Día	1	1
	Noche		
Residencial	Día	2 a 4	30 a 90
	Noche	1.4	1.4 a 20
Oficinas	Día	4	60 a 128
	Noche		
Talleres (Estructuras industriales)	Día	8	90 a 128
	Noche		

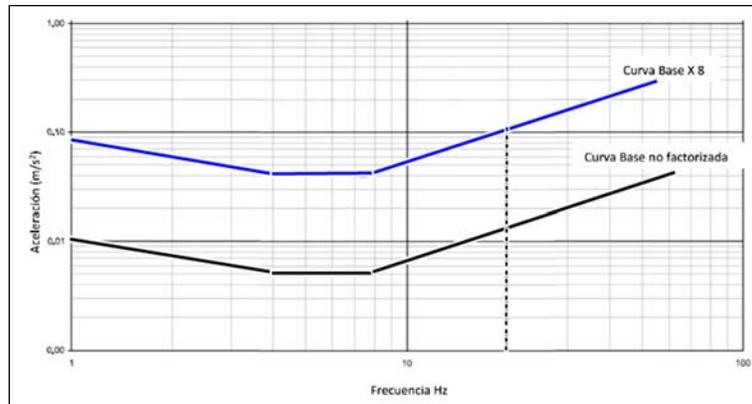


Fig. 6.4. Curva base de aceleraciones, para estimar el nivel de vibraciones admisibles para el confort humano, la curva en color azul es la representativa al nivel admisible en estructuras industriales, (AS2670.2).

### 6.2.3 Criterios de calidad en las operaciones.

Las limitaciones a los efectos de las vibraciones por el criterio de calidad en las operaciones en estructuras industriales, se formulan valorando los problemas que estas vibraciones pueden ocasionar en las actividades de operación, por ejemplo, problemas visibles en la fabricación de productos, problemas de rendimiento en equipos de precisión o en las cadenas productivas. Sin embargo, debido a la gran variedad de maquinaria utilizada en las industrias, es muy complejo establecer criterios generales para la limitación de las vibraciones, usualmente se dividen los grados de sensibilidad para los diferentes procesos productivos, y finalmente se establecen los niveles máximos de velocidad y aceleración en función de los rangos de frecuencias.

### 6.3 Revisión de los estados límite de vibración en las estructuras de estudio

La revisión de los estados límite de vibración en la plataforma marina y en la estructura de la torre de perforación, se realizó a través del criterio de percepción humana, bajo las consideraciones de la Norma AS2670, presentada anteriormente.

Los valores pico de aceleración utilizados para la comparativa de los criterios de aceptación, son los registrados a partir de las dos campañas de mediciones realizadas, estos valores pico fueron presentados en los apartados del capítulo anterior (5.3, 5.4 y 5.5), por lo que en la tabla 6.8, se presentan las comparativas de los niveles permisibles según la Norma AS2670.2, así mismo estos valores pico se grafican en la figura 6.5 para su mayor comprensión.

Tabla 6.8. Comparativa de los niveles permisibles de aceleración, para la plataforma marina y la estructura de la torre de perforación, (AS2670.2).

Obtenidos de la Campaña:	Frecuencias Identificadas (Asociadas a modos dominantes)				Aceleraciones Máximas Registradas				Aceleración admisible, según la Norma AS2670 [ m/s <sup>2</sup> ]
	Dirección Longitudinal ( 2 ) [ Hz ]		Dirección Transversal ( 3 ) [ Hz ]		Dirección Longitudinal ( 2 ) [ m/s <sup>2</sup> ]		Dirección Transversal ( 3 ) [ m/s <sup>2</sup> ]		
	Plataforma Marina	Torre de Perforación	Plataforma Marina	Torre de Perforación	Plataforma Marina	Torre de Perforación	Plataforma Marina	Torre de Perforación	
Primera campaña de mediciones	0.62	1.26	0.65	1.51	0.0108	0.1732	0.0255	0.3732	0.045
Segunda campaña de mediciones	0.68	1.275	0.67	1.52	0.1155	0.1381	0.0181	0.1933	0.045

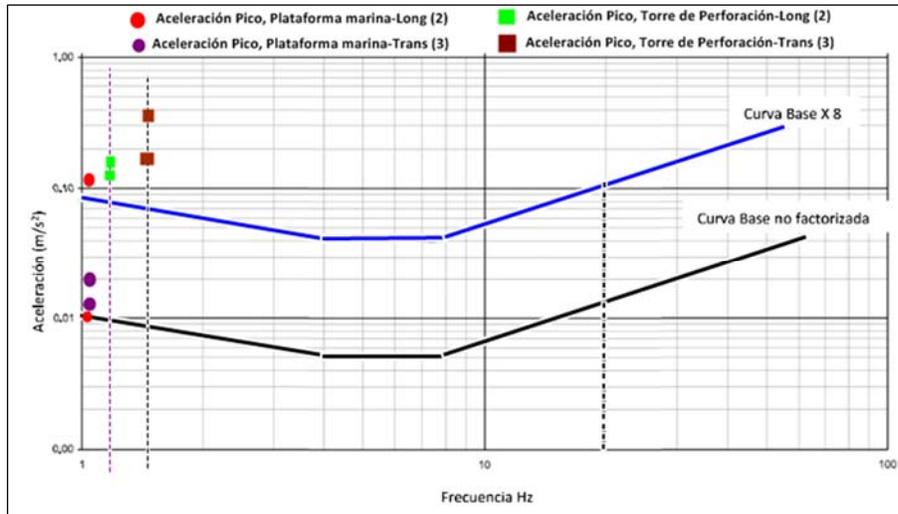


Fig. 6.5. Niveles de aceleraciones admisibles para el confort humano, para la plataforma marina y la estructura de la torre de perforación, la curva en color azul es la representativa al nivel admisible en estructuras industriales, (AS2670.2).

A partir de la fig. 6.5 se puede observar que para el valor de aceleración pico, correspondiente a la frecuencia asociada al modo en traslación longitudinal (2) de la plataforma marina únicamente en esta dirección se rebasa el límite permisible de la Norma. En cuanto a los valores de aceleración pico registrados en la estructura de la torre de perforación, se puede ver que el mayor de estos valores rebasa aproximadamente ocho veces los límites admisibles; sin embargo, en este caso de estudio se superan los límites en ambas direcciones asociadas a las frecuencias de sus modos traslacionales (2) y (3).

# CAPÍTULO 7

---

## *Conclusiones*

---

En este trabajo de investigación se estudió el comportamiento dinámico de una plataforma marina de perforación, por medio del monitoreo de vibraciones, en condiciones operativas, y sujeta a vibraciones excesivas inducidas por causas externas, como la excitación producida por el viento, el oleaje, la operación de maquinaria, etc. Dichas vibraciones condujeron a comportamientos no deseados en el sistema estructural y/o cambios estructurales en sus condiciones normales de operación. Por lo que en esta tesis se monitorearon y analizaron estas vibraciones, con la finalidad de identificar los parámetros que caracterizarán dinámicamente a las estructuras en estudio.

Con base en los resultados expuestos con anterioridad, se puede concluir que las estructuras de las cubiertas No.1 y No.2 se comportan, razonablemente, como diafragmas rígidos, no así la subestructura de la zona de pasillos de acceso al embarcadero.

De los resultados de la campaña de mediciones se pudo observar que la estructura de la plataforma marina de perforación experimentó, en intervalos de tiempo reducidos del orden de 10 minutos, desplazamientos transitorios relativamente pequeños ante acciones ambientales normales tales como oleaje, corrientes marinas y vientos, entre otras.

Del análisis de toda la información recabada, en las campañas de mediciones, realizadas en la estructura de la torre de perforación, específicamente se verificó que existen movimientos oscilatorios en el extremo inferior de la lingada o tubería de perforación, en intervalos de tiempo reducidos, por lo que analizando los resultados del cálculo de los desplazamientos, se estima que los desplazamientos máximos horizontales, tienen su origen en el extremo más alto de la estructura de la torre de perforación, los cuales ocasionan en gran parte el movimiento oscilante

que experimenta la lingada, comportándose como un péndulo invertido; por otra parte estos desplazamientos también se deben, a las maniobras generadas por los equipos de perforación que manipulan las tuberías que cuelgan en este extremo de la torre, generando movimientos excesivos, para el buen funcionamiento de las actividades de perforación.

Es de interés mencionar que, además del movimiento pendular de la lingada o tubería de perforación, existe la evidencia de un desplazamiento presentado lentamente variable entre el extremo libre de la lingada y el centro del hueco de la mesa rotatoria en la cual esta se introduce, este desplazamiento se atribuye, por sus características, a movimientos pseudo-estáticos de la plataforma marina, ocasionados por las mareas y variaciones en la dirección e intensidad de las corrientes marinas. Cabe mencionar que, realizando estudios de vibración ambiental, no es posible identificar ni el origen, ni la magnitud de estos desplazamientos, siendo necesario realizar otro tipo de estudios que caen fuera de los alcances de este proyecto de investigación.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las aceleraciones pico, en general se puede concluir que, en las cubiertas de la plataforma marina, las zonas localizadas en la parte central, son las más propensas a registrar los más altos niveles de aceleración. En cuanto a los niveles máximos de aceleración registrados en la subestructura (pasillos del acceso al embarcadero), resulta evidente que su sistema estructural no posee las características de un sistema de piso rígido, por lo que esta consideración se tomó en cuenta durante el análisis e interpretación de las mediciones registradas, así mismo dicha característica deberá tomarse en cuenta en su modelación.

También se verificó que en la torre de perforación, fue evidente que el equipo de medición situado a mayor altura, experimento los mayores valores de aceleración pico, particularmente en la dirección transversal (3). En ambos casos analizados, los valores presentados en dichas zonas, son atribuidos al entorno de los trabajos realizados en la plataforma, ya sea por los operarios y/o por la maquinaria que se encontraba funcionando durante las mediciones.

En términos generales, los desplazamientos máximos obtenidos de las señales registradas, en las cubiertas de la superestructura (plataforma marina) y subestructura (zona de pasillos del acceso al embarcadero) son relativamente pequeños, lo que hace evidente la importante rigidez lateral que posee la plataforma en su conjunto. Este mismo comportamiento se verificó nuevamente, en el cálculo de los desplazamientos laterales relativos entre las cubiertas superior e inferior.

Cabe mencionar que las diferencias observadas, respecto a los valores calculados de desplazamientos máximos para un mismo punto entre arreglos diferentes, son justificadas debido a que corresponden a condiciones de demanda diferentes, ya que las mediciones registradas en cada arreglo se realizaron en tiempos diferentes.

En conclusión en la mayoría de este tipo de estructuras marinas con o sin evidencia de daño estructural y que requieran ser evaluadas, es justificable su instrumentación y monitoreo dinámico, ya que mediante estos estudios del registro de vibraciones, es factible conocer sus propiedades dinámicas “reales”, y finalmente es posible reproducir sus modelos analíticos y validar su comportamiento, bajo las acciones impuestas en sus condiciones actuales y/o modificadas. Por lo que, el sistema de mediciones propuesto cumplió los objetivos iniciales, ya que no se produjeron daños a la estructura, ni la interrupción de sus operaciones, permitiéndonos tener el conocimiento integral sobre la evolución de la estructura y por ende emitir un diagnóstico evitando costosos daños estructurales.

A pesar de las limitantes ya mencionadas, se concluye que es altamente recomendable determinar experimentalmente las propiedades dinámicas reales de una estructura, ya que con la adecuada calibración de sus modelos de análisis es posible determinar su comportamiento ante sus demandas y condiciones de operación.

Dicho lo anterior también es recomendable instaurar sistemas de inspección de estructuras, como el presentado en este trabajo de investigación, que permitan asegurar una base de datos estructurales de libre y fácil acceso, ya que otorgan información potencialmente útil para investigaciones y el mejoramiento de normativas, que son requeridas al evaluar o modificar una estructura. Por otra parte es necesario que las Universidades implementen y difundan la creación de cursos, para la debida capacitación de los profesionistas dedicados a la evaluación estructural.

# CAPÍTULO 8

---

## *Referencias*

---

- Allen R. L. y Mills D. W., (2004). "**Signal Analysis, Time, Frequency, Scale, And Structure**". Ed. John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- ALLVIEW, (1995). "**GeosysAG**". Terra Technology, Switzerland. Programa para la Adquisición de Datos.
- Australian Standards AS2670-2001. "**Evaluation of human exposure to whole-body vibration**". Australia.
- Australian Standards AS2670-2 (2001). "**Evaluation of human exposure to wholebody vibration**". Continuous and shock-induced vibration in building (1 to 80 Hz). Australia.
- Bendat J. S. y Piersol A.G., (1980). "**Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis**". AIAA Journal, Wiley Interscience Vol. 31, No. 11, Nueva York, N.Y.
- Benjumea J. M., (2003). "**Vibraciones Causadas Por Actividad Humana Caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil**". Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Santiago de Cali, Colombia.
- Brincker R., Ventura C. E. y Andersen P., (2001). "**Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition Proceedings**". 19th International Modal Analysis Conference (IMAC), Kissimmee, FL.
- Bolton W., (2002). "**Mecatrónica - Sistemas de Control Electrónico En La Ingeniería Mecánica Y Eléctrica**". 4ª Ed. Alfa omega.

- Castelán I., García D. O., Reyes. R. y Ayala M. G., (2002). **“Instrumento Virtual para la Determinación de Propiedades Dinámicas de Estructuras”**. Congreso Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona, España.
- Castelán I., (2001). **“Determinación experimental de las propiedades dinámicas de un edificio reforzado con disipadores de energía”**. Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, UNAM. México.
- Chopra A., (1995). **“Dynamics of Structures, theory and applications to earthquake engineering”**. Universidad de California, Ed. Prentice Hall, New Jersey, Estados Unidos.
- Cooley J. W. y Tukey J. W., (1965) **“An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series”**. Journal: Math. Comp. 19:297-301 MSC: Primary 65.90 MathSciNet.
- De Roeck G., Peeters B., y Maeck, (2003). **“Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring”**. Tesis de Doctorado, Katholieke Universiteit Leuven K.U, Bélgica.
- Directriz KDT-046/72, (1972). Antigua República Democrática Alemana. Normativa presentada por la Cámara Tecnológica de la antigua República.
- Escobar J. A. y García J. P., (1997). **“Ubicación de instrumentos sísmicos en estructuras para evaluar cambios en sus características dinámicas”**. XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Vol I, Veracruz, Ver., México.
- Farrar C. R., Duffey T.A., Doebling W.S. y Nix D.A., (1999). **“A Statistical Pattern Recognition Paradigm for Vibration-Based Structural Health Monitoring”**. Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, CA, Estados Unidos.
- Ferreira da Silva J. R., (2007). **“Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures”**. Tesis de Doctorado, Universidade do Minho, Portugal.
- García O., Torres J. J. y Ayala A. G., (2012). **“Determinación de las propiedades dinámicas de plataformas marinas en el golfo de México con fines de evaluación de Serviciabilidad y salud**

- estructural al verse sometidas a acciones ambientales y de operación de equipo”**. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.
- Gasquet C. y Witomski P., Traducido por Ryan R., (1999). **“Fourier Analysis and Applications”**. Ed. Springer, Nueva York, Estados Unidos.
  - GeoDAS (Geosig Lt). Programa de cómputo para el procesamiento y análisis de señales. [www.geosig.com](http://www.geosig.com).
  - Henaó D. A., (2013). **“Identificación de Las Propiedades Dinámicas de Una Estructura Sometida A Vibración Ambiental Empleando Análisis Espectral”**. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, Colombia.
  - Instituto de Normalización Alemán (Deutsches Institut für Normung), (2001b). **“Prediction of vibration parameters”**. Norma DIN4150-1.
  - Instituto de Normalización Alemán (Deutsches Institut für Normung), (2001c). **“Effects on persons in buildings”**. Norma DIN4150-2.
  - Instituto de Normalización Alemán (Deutsches Institut für Normung), (1999). **“Vibrations in buildings”**. Normativa Alemana DIN 4150-3.
  - Kawasumi H. y Shima E., (1965). **“Some Applications of a Correlator to Engineering Problems”**. III World Conference Earthquake Engineering, WCEE, Vol 2, II-298 a II-320 Nueva Zelanda.
  - León F., (2008). **“Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México”**. Norma-NRF-003-PEMEX, México.
  - Lima H. F., da Silva V. R. ; Nogueira R.N. ; Abe I. ; de Brito A. P.S. ; Fernandes C. ; Rodrigues H. ; Varum H. ; Kalinowski H. J. ; Costa A. ; de Lemos P. J., (2008). **“Structural Health Monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro Using FBG Sensors”**. IEEE Sensors Journal, Vol 8, N° 7, Portugal, Aveiro.
  - Medina J., (2010). **“Análisis de Fourier para el Tratamiento de Señales”**. XII Encuentro de Matemática y sus Aplicaciones, EPN- Quito, Ecuador.

- Moutinho C. R., (2007). **“Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil”**, Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería FEUP, Universidad de Porto, Portugal.
- Nagayama T. y Spencer B. F., (2007). **“Structural Health Monitoring Using Smart Sensors”**. Reporte Técnico, University of Illinois. Champaign, IL, Estados Unidos.
- Normativa Suiza SN 640312, (1978). Procedimientos de medición y criterios aceptables de vibraciones que afectan el confort humano.
- Ordaz M. y Montoya C., (2005). **“DEGTRA A4 versión 5.1”**. Programa de análisis espectral de señales, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Ospina Y. M., (2009). **“Monitoreo de salud estructural empleando filtros Kalman”**. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Ramos L. F., Aguilar R. y Lourenco P. B., (2010). **“Operational modal analysis of historical constructions using commercial wireless platforms”**; Structural Health Monitoring published online, Portugal.
- Ruiz S. M., Ramírez M. S. y Félix H., (1997). **“Estudio Experimental y analítico de las propiedades dinámicas de un modelo metálico de cuatro niveles”**. Reporte Técnico; Universidad Autónoma Metropolitana, UAM-A, Área de Estructuras. México.
- Silva Lang E., (2009). **“Comparación de las Propiedades Dinámicas de Edificios de Características Similares Ubicados en Zonas Geotécnicas Diferentes”**, Tesis de Maestría, Posgrado en Ingeniería, UNAM. México.
- Vandiver J. K., (1975). **“Detection of structural failure on fixed platforms by measurement of dynamics response”**. Offshore Technology Conference, OTC 2909, Houston Texas, Estados Unidos.
- Wenzel H. y Pichler D., (2005). **“Ambient Vibration Monitoring”**, Ed. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra.

- X. Li, Ge L., Ambikairajah E., Rizos C., Tamura Y. y Yoshida A., (2006). **“Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system”**, Ed. Springer-Verlag, Sydney, Australia.
- Zivanovic S., Pavic, A. y Reynolds P., (2005). **“Human Structure Dynamic Interaction in Footbridges”**. Bridge engineering, Vol 158, Issue 04.