



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ESTANTERÍAS DE PERFILES CONFORMADOS EN
FRÍO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

ROCÍO PARRA RIQUELME

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO HERNÁNDEZ PRADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FELIPE OCHOA CORNEJO
JUAN FELIPE BELTRÁN MORALES

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ESTUDIANTE: ROCIO PARRA RIQUELME

FECHA: ENERO 2019

PROFESOR GUIA: FRANCISCO HERNANDEZ PRADO

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ESTANTERÍAS DE PERFILES CONFORMADOS EN FRÍO

Las estanterías de acero se utilizan comúnmente en diversos rubros industriales para proveer soluciones de almacenaje livianas, económicas y versátiles. Permiten optimizar el espacio de las bodegas ya que emplean varios niveles de almacenaje controlando el apilamiento de los productos, además pueden ser modificadas según las necesidades de operación.

El objetivo de esta memoria es utilizar distintos métodos de identificación de propiedades dinámicas para determinar las frecuencias y formas modales reales de una estantería industrial. En este contexto se realizaron mediciones de vibraciones ambientales a una estantería ubicada en el centro de distribución de Nestlé en la comuna de Quilicura.

La identificación de los parámetros modales de la estructura se realizó utilizando los métodos de Espectro de Densidad de Potencia (PSD), SSI (Stochastic Subspace Identification), DSI (Deterministic – Stochastic Subspace Identification) y CMIF (Complex Mode Indicator Function).

Todos los métodos mencionados permitieron identificar los modos fundamentales de la estructura ofreciendo resultados consistentes. En este contexto, se observó que las propiedades dinámicas identificadas distan significativamente de las obtenidas a partir de modelaciones en elementos finitos que se emplean comúnmente en la práctica. Esto ocurre porque existen varios efectos que no son usualmente modelados como son el hecho que las bases de los pallets trabajan como diafragmas flexibles rigidizando las estanterías, teniendo en cuenta que se suele ignorar la rigidez provista por estos elementos. Además, se observó que juegan un rol relevante en las propiedades reales de la estantería ciertos parámetros relativamente inciertos como la rigidez provista entre la unión viga-columna.

Adicionalmente, se llevó a cabo una prospección geofísica en un terreno aledaño al centro de distribución donde se determinó el período fundamental del suelo y se realizó la inversión sísmica para determinar la variación de la velocidad de la onda S en profundidad. En este contexto, los resultados indicaron que el periodo del suelo es muy cercano al de la estructura y posee una alta amplificación sísmica, lo que significa un riesgo de resonancia en caso de que ocurra un sismo.

Dale, vas por buen camino.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi profesor guía, Francisco Hernández, por toda su ayuda desde el comienzo de este trabajo, por la paciencia y comprensión en momentos difíciles.

A Pedro Soto y Víctor González, por su gran ayuda en todo el trabajo experimental que fue fundamental en esta memoria.

También quiero agradecer al profesor Felipe Beltrán por todo su apoyo en el término de este trabajo.

A mi mamá, por criarme, educarme y darme siempre lo mejor que estuvo a su alcance. Por todos los dulcecitos para las noches de estudio, por todas las veces que me tuvo que despertar y después llevar en auto porque me quedé dormida a alguna prueba o clase importante, por la paciencia en esas semanas 15 del terror y por el amor incondicional.

Gracias a la Enana por ser mi compañera en la vida, por soportarme en el estrés universitario, porque siempre estaremos juntas enfrentando todo lo que venga. Y gracias también por cuidar a la chiqui ahora que estoy lejos.

A todos mis amigos que conocí en la universidad, gracias por hacer más entretenida la vida, por alegrar las tardes de estudio/estrés/tareas, por las chelas de los viernes, por el apoyo en momentos de crisis y por acompañarme en estos largos años.

Mención especial para Alonso Cubillos, gracias por tu apoyo, por creer en mí cuando yo no lo hago, por darme ánimo para seguir y por presionarme para ser mejor (y obvio, gracias al Lalo por todas las risas de Bob Esponja, por todas las piscolas compartidas y todas las que se vienen en el futuro).

Gracias a mi pololo Diego porque sin su apoyo y su amor el último año no habría sido posible terminar este trabajo. Por escucharme y contenerme, por cuidarme y quererme tanto. En resumen, gracias por ser parte de mi vida y por todo el prrr.

Gracias a mi amiga Camila San Martín por todo el amor, el apoyo, las conversaciones, almuerzos y siestitas necesarias en la vida, además de los paseos con las chiquis que alegran el alma.

A Javiera Tapia y Pamela Vidal, gracias por todo.

Finalmente, gracias a la Juana por existir.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
Capítulo 2 Sistemas de Almacenaje Industrial	2
2.1. Clasificación de los sistemas de almacenaje industrial	2
2.1.1. Almacenaje selectivo	2
2.1.2. Almacenaje compacto.....	4
2.1.3. Almacenaje dinámico.....	5
2.1.4. Otros sistemas	6
2.2. Elementos estructurales conformantes	8
2.2.1. Columnas.....	8
2.2.2. Vigas.....	9
2.2.3. Riostras.....	9
Capítulo 3 Montaje Experimental	10
3.1. Geometría del sistema estructural	10
3.1.1. Propiedades de los elementos estructurales	12
3.1.2. Conexiones y anclaje.....	14
3.2. Equipos y materiales utilizados	15
3.3. Posición de sensores	16
3.3.1. Medición 1	16
3.3.2. Medición 2	17
3.4. Metodología de montaje experimental y mediciones	18
3.4.1. Calibración.....	18
3.4.2. Fijación de acelerómetros.....	19
3.4.3. Toma de datos	20
3.5. Prospección geofísica	20
Capítulo 4 Resultados	21
4.1. Registros ambientales.....	21
4.2. Densidad del espectro de potencia (PSD)	22
4.2.1. Dirección longitudinal.....	22
4.2.2. Dirección transversal	25
4.2.3. Modos torsionales.....	29
4.3. Sub-espacio estocástico (SSI)	30
4.3.1. Dirección Longitudinal.....	30

4.3.2. Dirección transversal	34
4.3.3. Modos torsionales.....	38
4.4. DSI (Deterministic – Stochastic Subspace Identification).....	39
4.4.1. Dirección longitudinal.....	39
4.4.2. Dirección transversal	43
4.4.3. Modos torsionales.....	47
4.5. CMIF (Complex Mode Indicator Function)	48
4.5.1. Dirección Longitudinal.....	48
4.5.2. Dirección Transversal	49
4.6. Resumen de Identificación.....	51
4.7. Caracterización del suelo.....	53
Capítulo 5 Modelo Estructural	56
5.1. Descripción del modelo de elementos finitos	56
5.2. Cargas aplicadas	57
5.3. Rigidez de las conexiones y apoyos	58
5.4. Formas modales	58
5.5. Resultados al variar rigideces:	59
Capítulo 6 Comentarios y Conclusiones	61
Bibliografía	64

Índice de Tablas

Tabla 3.1. Secciones de la estructura estudiada.....	12
Tabla 3.2. Propiedades perfil TX100x105x(3y3)	12
Tabla 3.3. Propiedades perfil TX100x105x3.....	13
Tabla 3.4. Propiedades perfil TC100x50x2	13
Tabla 3.5. Propiedades perfil CA 58x25x3	14
Tabla 3.6. Posición y orientación de sensores para la medición 1.....	17
Tabla 3.7. Posición y orientación de sensores para la medición 2.....	18
Tabla 4.1. Frecuencias identificadas para la dirección longitudinal mediante PSD.....	23
Tabla 4.2. Frecuencias identificadas para la dirección transversal mediante PSD	26
Tabla 4.3. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES1 en dirección longitudinal	30
Tabla 4.4. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES2 en dirección longitudinal	32
Tabla 4.5. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES1 en dirección transversal.....	34
Tabla 4.6. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES2 en dirección transversal.....	36
Tabla 4.7. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES1 en dirección longitudinal	40
Tabla 4.8. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES1 en dirección longitudinal	42
Tabla 4.9. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES1 en dirección transversal.....	43
Tabla 4.10. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES2 en dirección transversal.....	45
Tabla 4.11. Frecuencias identificadas en dirección longitudinal, según método CMIF ..	49
Tabla 4.12. Frecuencias identificadas en dirección transversal, según método CMIF ...	50
Tabla 4.13. Resumen de frecuencias identificadas para los métodos PSD y SSI.....	51
Tabla 4.14. Resumen de frecuencias identificadas para los métodos DSI y CMIF.	52
Tabla 4.15. Frecuencias modales y dirección del modo correspondiente	52
Tabla 5.1. Rigidez aplicada en modelo estructural para conexiones y apoyos.	58
Tabla 5.2. Modos identificados en modelo estructural.	58
Tabla 5.3. Períodos y frecuencias modales para distintas rigideces en el eje local 3 de las vigas.....	60

Índice de Figuras

Figura 2.1. Rack selectivo convencional (izquierda) y sistema de carga (derecha).	3
Figura 2.2. Sistema de carga de rack selectivo de doble profundidad.	3
Figura 2.3. Rack cantiléver.	4
Figura 2.4. Rack drive-in (izquierda) y sistema de carga correspondiente (derecha).	5
Figura 2.5. Sistema de carga y descarga en Flow Rack.	5
Figura 2.6. Sistema de carga y descarga en rack Push Back (izquierda) y sistema de carros telescópicos (derecha).	6
Figura 2.7. Sistema autoportante.	7
Figura 2.8. Ejemplo de sistema de almacenaje mixto.	7
Figura 2.9. Proceso de conformado en frío.	8
Figura 2.10. Secciones transversales típicas para columnas.	8
Figura 2.11. Perforaciones usadas en columnas.	9
Figura 2.12. Secciones transversales típicas para vigas.	9
Figura 2.13. Tipos de arriostramientos en racks, Kanyilmaz et al. (2016)	9
Figura 3.1. Modelo estructural 3D en SAP2000.	10
Figura 3.2. Dimensiones en elevación, plano XZ. Dimensiones en [mm].	11
Figura 3.3. Dimensiones en elevación, plano YZ. Dimensiones en [mm].	11
Figura 3.4. Perfil TX100x105x(3y3)	12
Figura 3.5. Perfil TX100x105x3	13
Figura 3.6. Perfil TC100x50x2	13
Figura 3.7. Perfil CA 58x25x3	14
Figura 3.8. Conexión viga – columna (izquierda) y anclaje de columnas (derecha).	14
Figura 3.9. Cable con sus respectivos conectores.	15
Figura 3.10. Elementos utilizados para la fijación de sensores. Regla de referencia.	15
Figura 3.11. DAQBOOK/2005	16
Figura 3.12. Acelerómetro EpiSensor ES-U2	16
Figura 3.13. Esquema de sensores para medición 1	16
Figura 3.14. Esquema de sensores para medición 2. Y=0 cm (arriba); Y=104 cm (abajo)	17
Figura 3.15. Calibración de acelerómetros.	18
Figura 3.16. Plataforma elevadora utilizada.	19
Figura 3.17. Sistema de prensa con acelerómetros fijados a la columna.	19
Figura 3.18. Cables conectados al sistema de adquisición de datos.	19
Figura 3.19. Estación de trabajo en terreno.	20
Figura 3.20. Ubicación de trominos y centro de distribución (izquierda), arreglo de trominos en el terreno (derecha)	20
Figura 4.1. Registro punto A, NES1	21
Figura 4.2. Espectros de potencia para sensores en dirección longitudinal, NES1.	22
Figura 4.3. Espectros de potencia para sensores en dirección longitudinal, NES2.	22
Figura 4.4. Formas modales longitudinales, NES1	24
Figura 4.5. Formas modales longitudinales, NES2	24
Figura 4.6. Espectros de potencia para sensores en dirección transversal, NES1	25
Figura 4.7. Espectros de potencia para sensores en dirección transversal, NES2	25
Figura 4.8. Formas modales transversales, NES1	27
Figura 4.9. Formas modales transversales, NES2	28
Figura 4.10. Formas modales torsionales, NES2	29

Figura 4.11. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método SSI, NES1	30
Figura 4.12. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores longitudinales NES1.	31
Figura 4.13. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método SSI, NES2.....	32
Figura 4.14. Posición de sensores en planta, NES2.	33
Figura 4.15. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores longitudinales NES2	33
Figura 4.16. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método SSI, NES1	34
Figura 4.17. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores transversales NES1.....	35
Figura 4.18. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método SSI, NES2.	36
Figura 4.19. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores transversales NES2.....	37
Figura 4.20. Formas modales torsionales según método SSI, NES2.....	38
Figura 4.21. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método DSI, NES1	39
Figura 4.22. Formas modales según método DSI en dirección longitudinal, NES1. Modos 1 al 6.	40
Figura 4.23. Formas modales según método DSI en dirección longitudinal, NES1. Modos 7 al 12.	41
Figura 4.24. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método DSI, NES2	41
Figura 4.25. Formas modales según método DSI, sensores longitudinales, NES2	42
Figura 4.26. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método DSI, NES1	43
Figura 4.27. Formas modales según método DSI, sensores transversales NES1.....	44
Figura 4.28. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método DSI, NES2	45
Figura 4.29. Formas modales según método DSI, sensores transversales NES2.....	46
Figura 4.30. Formas modales torsionales según método DSI, NES2	47
Figura 4.31. Valores singulares según método CMIF, sensores longitudinales NES1 ...	48
Figura 4.32. Valores singulares según método CMIF, sensores longitudinales NES2...	48
Figura 4.33. Valores singulares según método CMIF, sensores transversales NES1 ...	49
Figura 4.34. Valores singulares según método CMIF, sensores transversales NES2 ...	50
Figura 4.35. Perfil de inversión para velocidad de onda de corte Vs.....	53
Figura 4.36. Tabla 4.2 de NCh433 of. 1996: clasificación sísmica del terreno de fundación.	54
Figura 4.37. Relación espectral H/V.....	54
Figura 4.38. Propuesta de Clasificación de suelos según Verdugo y Pasten (2017).	55
Figura 4.38. Vs30 y periodo de estructura estudiada indican que se debiera clasificar como suelo tipo E. Verdugo y Pasten 2017.....	55
Figura 5.1. Modelo de elementos finitos en SAP2000.....	56
Figura 5.2. Riostras horizontales agregadas al modelo.	56
Figura 5.3. Ejes locales de vigas y columnas en modelo estructural. (1=rojo, 2=verde, 3=celeste).....	57
Figura 5.4. Cargas en vigas.	57
Figura 5.5. Modo 1: $f=0.91$ [Hz].....	58
Figura 5.6. Modo 2: $f=1.37$ [Hz].....	59
Figura 5.7. Modo 3: $f=1.91$ [Hz].....	59

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Chile es uno de los países con mayor sismicidad en el mundo, donde ocurren terremotos de grandes magnitudes y hay sismos de manera recurrente. Debido a esto, es primordial estudiar el comportamiento de los distintos tipos de estructuras ya sean para uso habitacional o industrial.

Las estanterías o racks de acero son utilizadas en la industria como soluciones de almacenaje para todo tipo de recursos. Esto se traduce en la existencia de distintos tipos de estanterías, las cuales pueden ser modificadas durante la vida útil de las instalaciones según las necesidades de quien las utilice y la posibilidad de optimizar el espacio de almacenaje y el acceso a los bienes que se encuentren en ellas.

La necesidad de estudiar el comportamiento de estas estructuras nace debido al poco conocimiento y normativas de diseño que existen sobre ellas y las pérdidas potenciales que significa una falla o colapso frente a un evento sísmico, cuya probabilidad de ocurrencia es bastante alta en un país sísmico como Chile.

En el presente trabajo de título se utilizan distintas técnicas de identificación de propiedades dinámicas a partir de ensayos de microvibraciones ambientales en un rack en operación.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Caracterizar las propiedades dinámicas de las estructuras de almacenaje industrial construidos con perfiles conformados en frío.

Objetivos específicos

- Llevar a cabo ensayos de microvibraciones ambientales a una estantería existente.
- Determinar las propiedades dinámicas como períodos, amortiguamientos y formas modales, a partir de los ensayos de la estructura.
- Crear un modelo en SAP2000 de la estructura con el fin de compararlo con los resultados experimentales.

Capítulo 2

Sistemas de almacenaje industrial

En el presente capítulo se definen los tipos de sistemas de almacenaje disponibles en el mercado nacional e internacional, describiendo sus funcionalidades, ventajas y desventajas. También se describen los elementos estructurales típicos que conforman estos sistemas.

2.1. Clasificación de los sistemas de almacenaje industrial

Las distintas configuraciones de estas estructuras se dividen en tres grupos: almacenaje selectivo, almacenaje compacto y almacenaje dinámico. Además existen otros sistemas que no caben dentro de estos grupos específicos ya que corresponden a la mezcla de los tres anteriores.

2.1.1. Almacenaje selectivo

Este sistema se denomina selectivo ya que es posible acceder directamente a la mercadería almacenada sin la necesidad de reubicar otras unidades de carga. Se caracterizan por ser versátiles, económicos, de fácil montaje y modificación.

2.1.1.1. Rack selectivo convencional

Es el sistema más utilizado en la industria, ya que permite acceder directamente a los pallets, los que se apoyan directamente en las vigas que conforman cada nivel de carga. Este sistema utiliza la técnica selectiva FIFO (First In – First Out), mediante estanterías perimetrales de un acceso y centrales de dos accesos, como se observa en la Figura 2.1.

Este sistema permite una máxima selectividad de los pallets y un fácil control de stock, ya que tiene siempre las cargas a la vista. Se adapta a cualquier tipo de carga y tiene una gran versatilidad tanto en las dimensiones como en la forma, permitiendo alcanzar e incluso superar los 12 metros de altura.

Dentro de las desventajas de estas estructuras se puede mencionar que se logra una baja densidad de almacenaje, por lo que se requieren grandes cantidades de pasillos y por lo tanto espacios amplios para su instalación.



Figura 2.1. Rack selectivo convencional (izquierda) y sistema de carga (derecha).

2.1.1.2. Rack selectivo de doble profundidad

Esta configuración corresponde a un complemento de la utilización del rack selectivo convencional, que significa un incremento de la densidad de almacenaje y por lo tanto un mayor aprovechamiento de la bodega. En estos sistemas la grúa opera por un lado y puede posicionar hasta dos pallets de fondo mediante un sistema de pantógrafo.

En este sistema se utiliza la rotación de mercadería del tipo LIFO (Last In – First Out). Al igual que en el caso convencional, es muy versátil y adaptable a cualquier tipo de carga, pero disminuye considerablemente la superficie de pasillos al tener una mayor densidad de almacenaje.



Figura 2.2. Sistema de carga de rack selectivo de doble profundidad.

2.1.1.3. Rack cantiléver

El rack cantiléver se utiliza para almacenar productos de distintas longitudes, tales como tuberías, fierros, maderas, planchas, etc. Consta de una estructura muy simple conformada por columnas y brazos en voladizo donde se deposita la carga. La luz del voladizo varía desde los 0.45 a 1.8 m.

Este sistema permite una gran selectividad de la mercadería, además de ser una estructura simple y resistente. Sin embargo, se logra una baja densidad de almacenaje y el costo inicial es más elevado que los sistemas anteriores.



Figura 2.3. Rack cantiléver.

2.1.2. Almacenaje compacto

Este sistema, también conocido como almacenamiento por acumulación, facilita la máxima utilización del espacio tanto en superficie como en altura. Se desarrolla para el almacenamiento de pallets que contengan unidades homogéneas.

Dentro de este tipo de almacenaje se encuentra un solo tipo denominado Rack Drive – In, descrito a continuación.

2.1.2.1. Rack Drive – In

Esta configuración consiste en una serie de calles unidas que no requieren pasillos. No existen elementos transversales que se interpongan en el desplazamiento de la grúa, por lo que puede circular libremente al interior del área de almacenaje. Los pallets se apoyan en vigas que funcionan como carriles de apoyo orientados en la dirección de las calles de avance de la grúa, como se ve en la Figura 2.4.

Dentro de las ventajas de este sistema se puede mencionar la rentabilidad máxima del espacio disponible, ya que al eliminar los pasillos entre las estanterías se puede disminuir hasta en un 80% la superficie de pasillos.

En este sistema se utiliza una rotación de la mercadería LIFO (Last In – First Out) y se necesita una grúa más angosta que debe operar a una velocidad menor que en los otros sistemas. Dada la configuración de almacenaje se tiene una mala selectividad de las mercaderías, obligando a almacenar un solo ítem de mercadería por columna.



Figura 2.4. Rack drive-in (izquierda) y sistema de carga correspondiente (derecha).

2.1.3. Almacenaje dinámico

En este tipo de sistemas los pallets se desplazan por gravedad a través del rack para su carga y descarga. Los racks dinámicos son una buena alternativa para bodegas con una alta rotación o que manejan mercadería perecible.

2.1.3.1. Flow Rack

Consiste en camas de polines por donde se desplazan por gravedad las unidades de carga. Este sistema permite funcionar bajo la lógica LIFO o FIFO, dependiendo si se carga y descarga por el mismo pasillo o por pasillos diferentes.

Estructuralmente es semejante al rack drive – in, permitiendo una alta densidad de almacenamiento. El flow rack implica una alta inversión inicial y requiere mantención esporádica y pallets especiales, por lo que el costo del sistema es más elevado que en los otros tipos descritos.

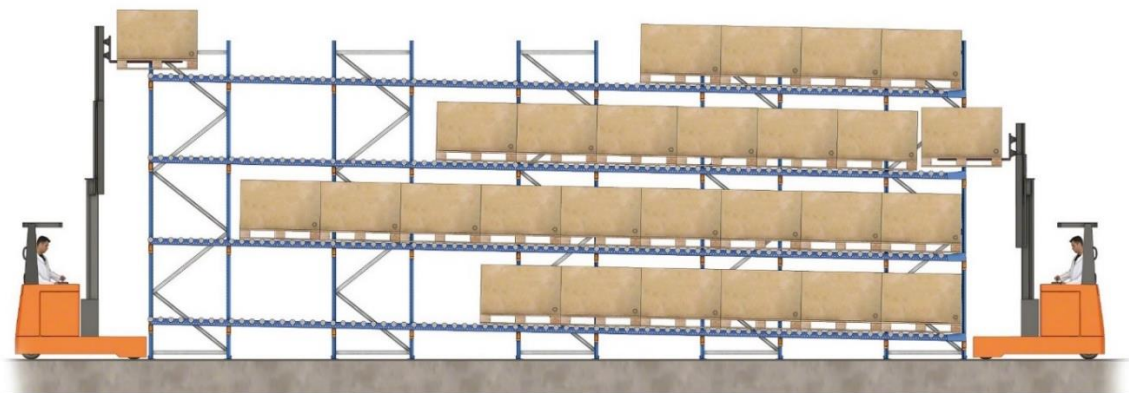


Figura 2.5. Sistema de carga y descarga en Flow Rack.

2.1.3.2. Push Back

Sistema de almacenamiento por acumulación que permite almacenar hasta cuatro pallets en fondo por cada nivel. Todos los pallets excepto el último se asientan sobre un conjunto de carros telescópicos que se desplazan, por empuje, sobre rieles.

Este sistema utiliza la lógica LIFO y logra una densidad de almacenaje muy alta, optimizando el espacio en bodega. Sin embargo, la inversión inicial es alta y requiere de mantenencias. La Figura 2.6 muestra el sistema de carga para este tipo de rack y los carros telescópicos mencionados anteriormente.

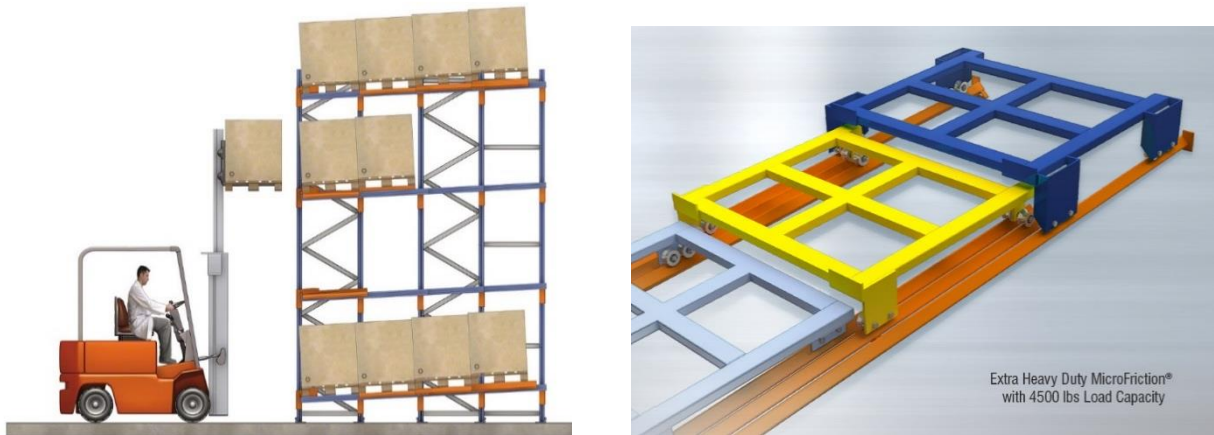


Figura 2.6. Sistema de carga y descarga en rack Push Back (izquierda) y sistema de carros telescópicos (derecha).

2.1.4. Otros sistemas

2.1.4.1. Galpón autoportante

En este sistema las estanterías forman parte del sistema estructural del galpón que las contiene, junto con los laterales y las cubiertas. Por lo tanto, el rack en este caso soporta no sólo las cargas propias de los bienes almacenados, sino también los agentes externos como cargas de viento, sísmicas, etc.

Los galpones autoportantes permiten alcanzar gran altura de almacenamiento, llegando a los 15m de altura en Chile y superando los 40m en algunos países europeos. Son compatibles con casi todos los sistemas de almacenamiento, permiten climatización y disminuyen los costos en obras civiles.



Figura 2.7. Sistema autoportante.

2.1.4.2. Sistemas mixtos

En ocasiones se combinan los distintos tipos de estanterías dependiendo de los requerimientos particulares de cada cliente. La Figura 2.8 muestra un ejemplo de sistema mixto.

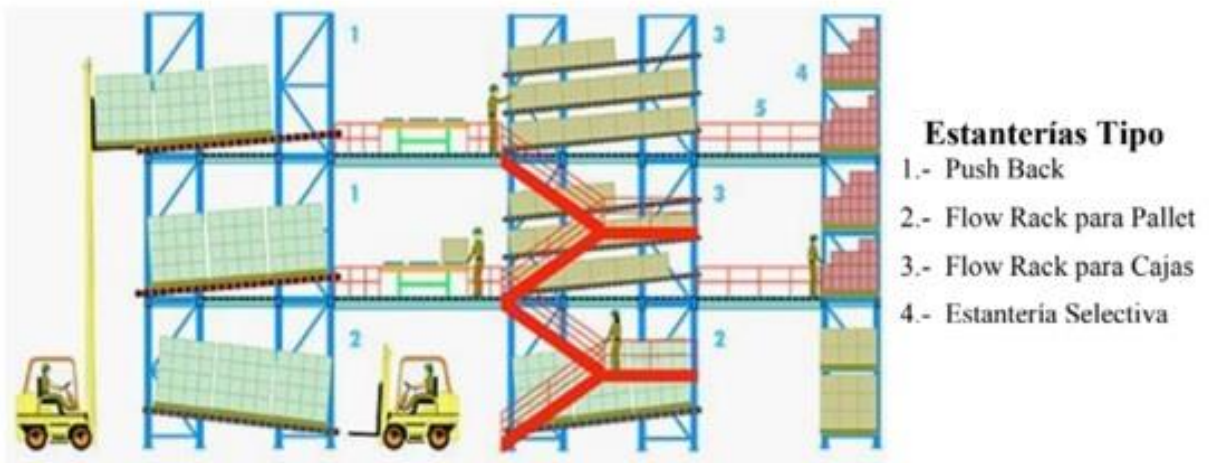


Figura 2.8. Ejemplo de sistema de almacenaje mixto.

2.2. Elementos estructurales conformantes

Los elementos utilizados en los sistemas de almacenaje son construidos mediante el proceso de conformado en frío. Esto es básicamente un proceso de plegado que genera una deformación plástica en el acero. Se realiza de forma gradual en sucesivas etapas mediante juegos de rodillos, como se muestra en la Figura 2.9.

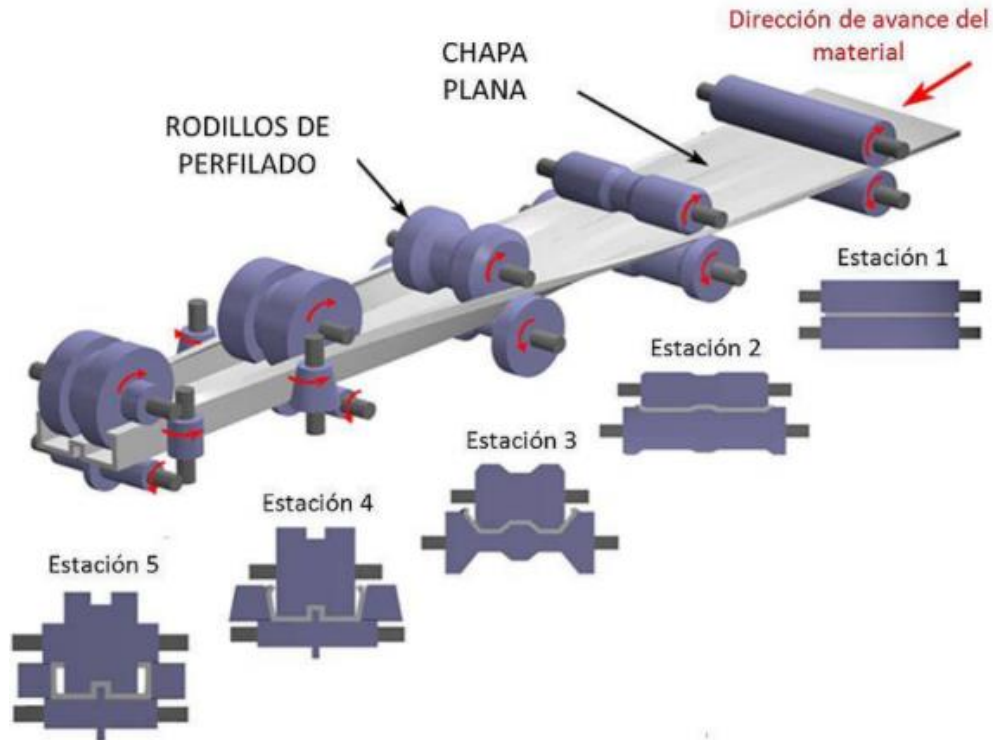


Figura 2.9. Proceso de conformado en frío.

2.2.1. Columnas

Estos elementos verticales son típicamente perfiles omega " Ω ", como los presentados en la Figura 2.10. Generalmente estos perfiles son ranurados para facilitar la modificación de los racks según las necesidades de quien lo utilice, como se muestra en la Figura 2.11.



Figura 2.10. Secciones transversales típicas para columnas.

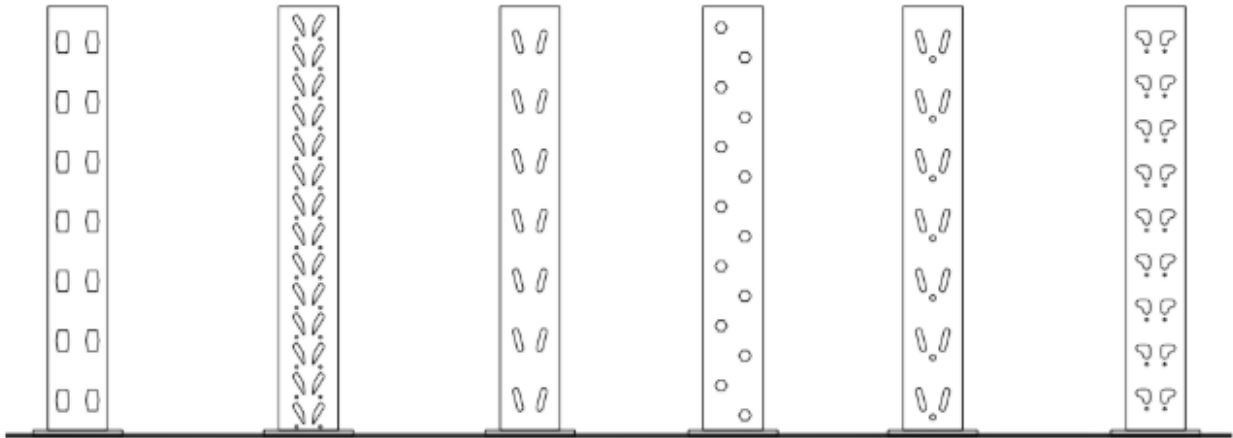


Figura 2.11. Perforaciones usadas en columnas.

2.2.2. Vigas

Las vigas soportan la carga de los pallets. La conexión a la columna puede ser apernada o enganchada, dependiendo del fabricante, del cliente y de las solicitaciones de la estructura. Las secciones transversales de vigas utilizadas típicamente en estas estructuras se muestran en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Secciones transversales típicas para vigas.

2.2.3. Riostras

Estos elementos diagonales pueden ser tanto horizontales como verticales. Las riostras verticales se utilizan siempre en sentido transversal, pero también hay casos de racks con arriostramientos verticales longitudinales. Para estos elementos en general se utilizan secciones plegadas tipo canal.

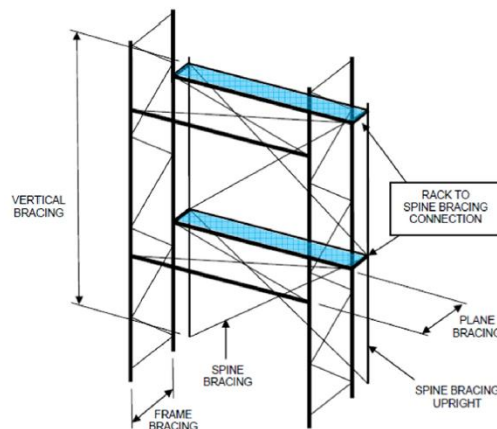


Figura 2.13. Tipos de arriostramientos en racks, Kanyilmaz et al. (2016)

Capítulo 3

Montaje Experimental

En el presente capítulo se describe la estructura estudiada, los elementos que se utilizaron para las mediciones y la posición de los sensores. Los ensayos fueron llevados a cabo en un centro de distribución de Nestlé ubicado en la comuna de Quilicura, el día 4 de mayo de 2018. Se midieron las vibraciones ambientales en dos intervalos de 40 minutos, para dos configuraciones de sensores distintas.

3.1. Geometría del sistema estructural

El rack estudiado tiene un total de 7 niveles, llegando a los 11.35 m de altura. Cuenta con 21 columnas distribuidas cada 2.4 m, alcanzando los 48 m de ancho, con una profundidad de 1.04 m. La Figura 3.1 muestra el modelo 3D realizado en el software de elementos finitos SAP2000.

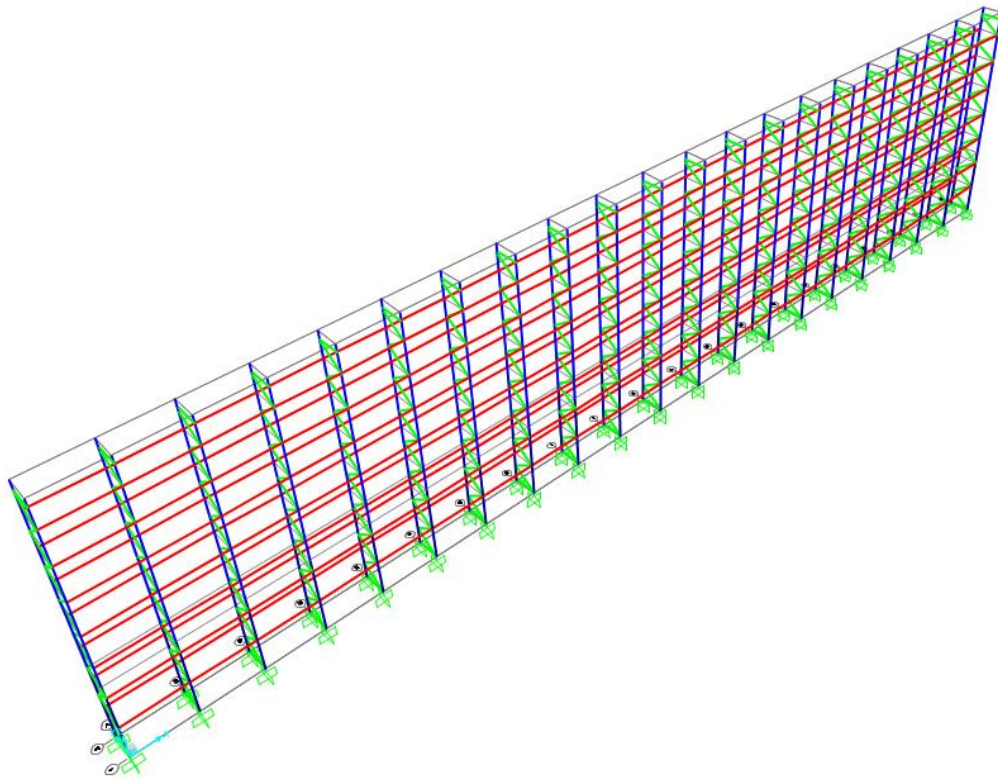


Figura 3.1. Modelo estructural 3D en SAP2000.

A continuación se muestran las vistas en elevación del rack estudiado, con las dimensiones correspondientes.

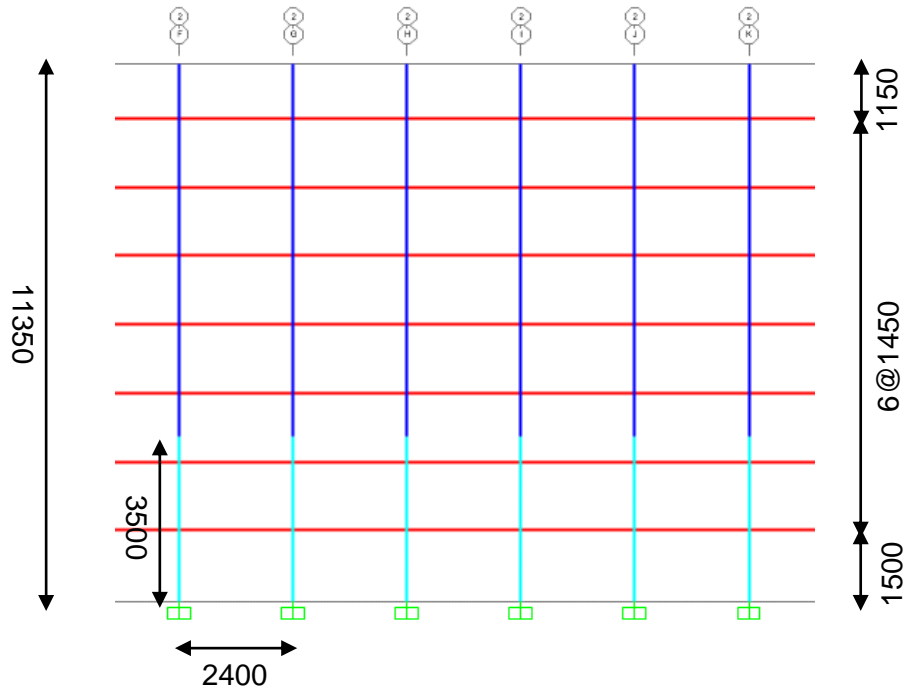


Figura 3.2. Dimensiones en elevación, plano XZ. Dimensiones en [mm].

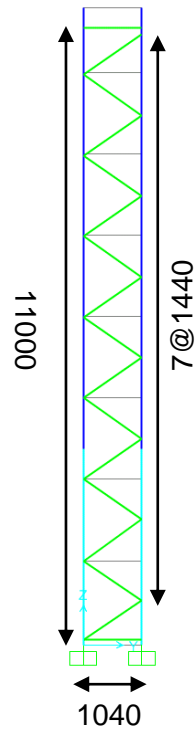


Figura 3.3. Dimensiones en elevación, plano YZ. Dimensiones en [mm].

Los elementos de la estructura se definen en la Tabla 3.1. En la próxima sección de este capítulo se presentan las propiedades geométricas de cada perfil detalladamente.

Tabla 3.1. Secciones de la estructura estudiada

Elemento	Perfil	Color en modelo
Columna (inferior)	TX 100x105x(3y3)	Cian
Columna (superior)	TX 100x105x3	Azul
Vigas	TC 100x50x2	Rojo
Riostras	CA 58x25x3	Verde

3.1.1. Propiedades de los elementos estructurales

El rack estudiado se compone por vigas, columnas, y riostras laterales. Todos estos elementos son fabricados en acero conformado en frío y se describen a continuación. Las propiedades de los elementos se obtienen del software de diseño de elementos conformados en frío CFS.

3.1.1.1. Columnas

Las columnas se componen de dos perfiles distintos. Desde la base de la estructura hasta los 3.5 m de altura corresponde a un perfil doble omega TX100x105x(3y3) como se ve en la Figura 3.4. Las propiedades geométricas se muestran en la Tabla 3.2.

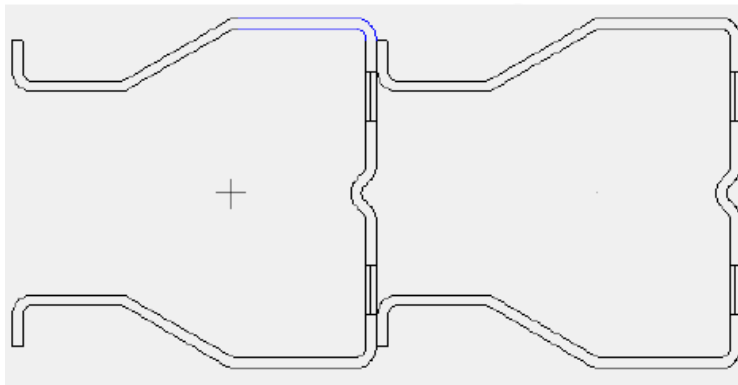


Figura 3.4. Perfil TX100x105x(3y3)

Tabla 3.2. Propiedades perfil TX100x105x(3y3)

Área [cm^2]	19.42
I_x [cm^4]	273.00
I_y [cm^4]	758.1
J [cm^4]	0.58
C_w [cm^6]	6973.2

Desde los 3.5 metros hasta el final de la columna se tiene un perfil omega simple TX100x105x3, mostrado en la Figura 3.5. Las propiedades de este perfil se resumen en la Tabla 3.3.

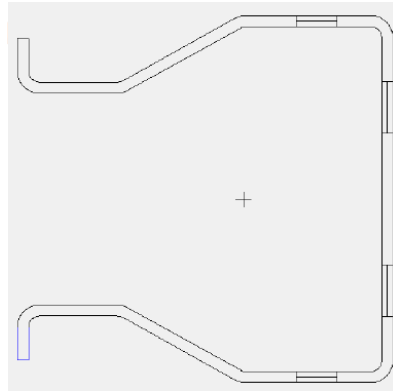


Figura 3.5. Perfil TX100x105x3

Tabla 3.3. Propiedades perfil TX100x105x3

Área [cm^2]	9.85
I_x [cm^4]	137.3
I_y [cm^4]	130.1
J [cm^4]	1535.0
C_w [cm^6]	536

3.1.1.2. Vigas

Las vigas corresponden a un perfil TC100x50x2, como ilustra la Figura 3.6. Las propiedades de este perfil se resumen en la Tabla 3.4.

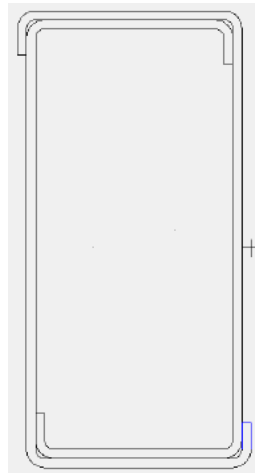


Figura 3.6. Perfil TC100x50x2

Tabla 3.4. Propiedades perfil TC100x50x2

Área [cm^2]	8.11
I_x [cm^4]	129.3
I_y [cm^4]	30.0
J [cm^4]	1041.7
C_w [cm^6]	560

3.1.1.3. Riostras laterales

Este rack tiene sólo arriostramientos laterales en la dirección cross-aisle, es decir transversal al plano predominante de la estructura.

El perfil utilizado para las riostras corresponde al CA 58x25x3, mostrado en la Figura 3.7, y sus propiedades geométricas se presentan en la Tabla 3.5.

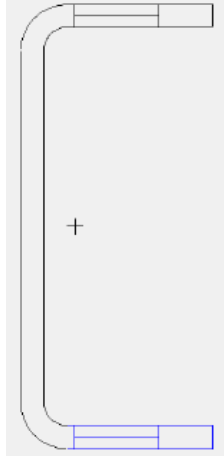


Figura 3.7. Perfil CA 58x25x3

Tabla 3.5. Propiedades perfil CA 58x25x3

Área [cm^2]	2.94
I_x [cm^4]	13.93
I_y [cm^4]	1.67
J [cm^4]	0.08
C_w [cm^6]	8.04

3.1.2. Conexiones y anclaje

Las conexiones viga – columna son apernadas, mientras que cada columna está anclada al radier con una placa base y 10 pernos. Esto se ilustra en la Figura 3.8.

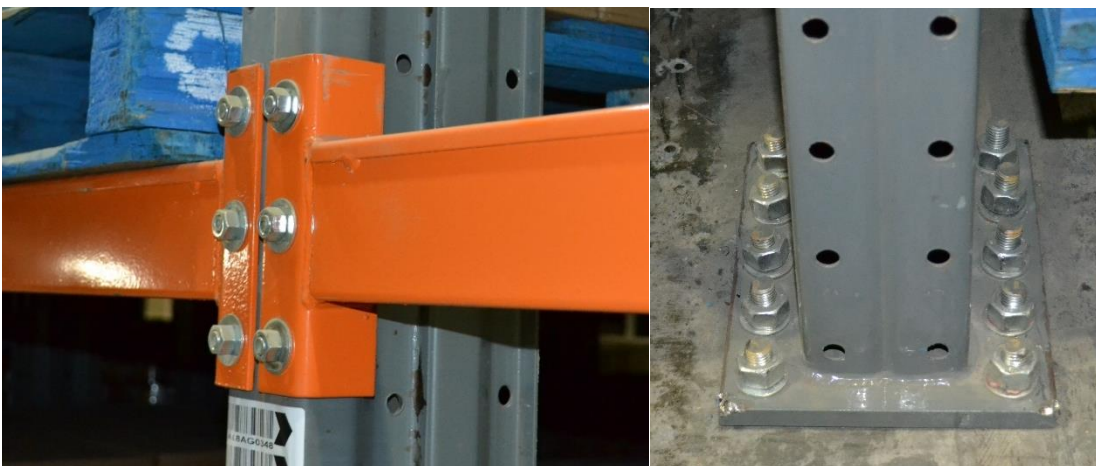


Figura 3.8. Conexión viga – columna (izquierda) y anclaje de columnas (derecha).

3.2. Equipos y materiales utilizados

A continuación se detallan todos los implementos y equipos utilizados para la medición y adquisición de datos.

Cables y conectores

Se dispone de 12 cables de entre 60 y 200 metros de largo, cada uno con un conector en cada extremo. En las semanas previas a los ensayos los cables fueron medidos, etiquetados y ordenados, y los conectores soldados y probados.



Figura 3.9. Cable con sus respectivos conectores.

Batería

Para energizar los acelerómetros, el sistema es alimentado por una batería de 12V-7Ah previamente cargada para asegurar su funcionamiento durante toda la jornada. En cuanto a la estación de trabajo y el computador, fueron conectados directamente a la corriente.

Perfiles metálicos e hilo metálico

Para fijar los acelerómetros a las columnas de la estructura durante el tiempo que duran las mediciones se utiliza un sistema de prensas compuesto básicamente por perfiles metálicos y barras de hilo metálico. En cada posición se coloca un sensor en la dirección longitudinal y uno en la dirección transversal.



Figura 3.10. Elementos utilizados para la fijación de sensores. Regla de referencia.

Sistema de adquisición de datos

Se utiliza un sistema DAQBOOK/2005 multicanal de conversión analógica de 16 bit.



Figura 3.11. DAQBOOK/2005

Acelerómetros EpiSensor (ES-U2)

Se cuenta con 11 sensores EpiSensor, acelerómetros uniaxiales que miden en rangos de ± 0.25 a $\pm 4g$. Para los ensayos fueron configurados en un rango de $\pm 0.5g$.



Figura 3.12. Acelerómetro EpiSensor ES-U2

3.3. Posición de sensores

En cada ensayo se escogieron puntos estratégicos para posicionar los acelerómetros. A continuación se presentan las dos configuraciones utilizadas.

3.3.1. Medición 1

Para el primer ensayo se colocan los acelerómetros dispuestos como se observa en la Figura 3.13. Se elige la columna central de la estructura para poner dos sensores en la base que después se consideran como input en el procesamiento de datos (punto A).

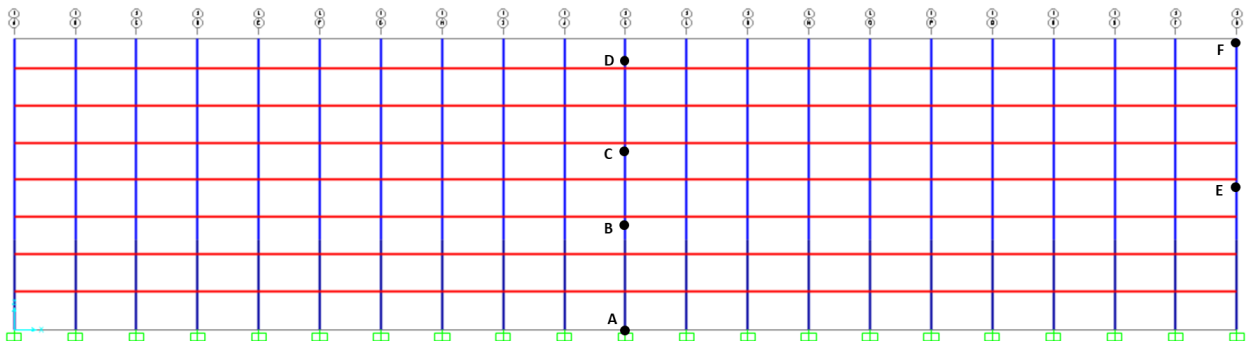


Figura 3.13. Esquema de sensores para medición 1

En cada punto, excepto en el punto E, se fijan dos sensores: uno en dirección longitudinal y el otro transversal al plano del esquema. El resumen de los sensores y su posición se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Posición y orientación de sensores para la medición 1.

Posición	Sensor	Dirección
A	8	Transversal
	9	Longitudinal
B	3	Longitudinal
	4	Transversal
C	1	Longitudinal
	7	Transversal
D	2	Longitudinal
	10	Transversal
E	6	Transversal
F	5	Longitudinal
	11	Transversal

3.3.2. Medición 2

En esta ocasión se dejan en la misma posición anterior los sensores de los extremos de la columna central y los del extremo de la columna final. Los demás se cambian de posición a la columna intermedia y a la columna final del plano $y = 0$ cm. La Figura 3.14 ilustra lo descrito.

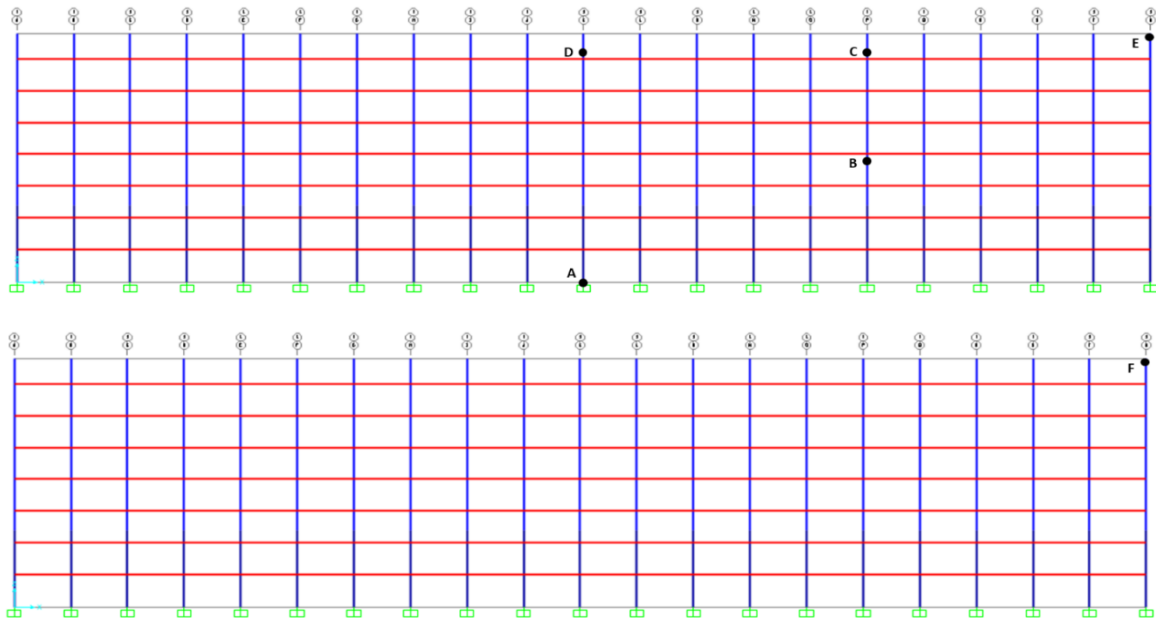


Figura 3.14. Esquema de sensores para medición 2. Y=0 cm (arriba); Y=104 cm (abajo)

A continuación la Tabla 3.7 resume los sensores, su orientación y posición para el segundo ensayo realizado.

Tabla 3.7. Posición y orientación de sensores para la medición 2.

Posición	Sensor	Dirección
A	8	Transversal
	9	Longitudinal
B	1	Transversal
C	3	Longitudinal
	4	Transversal
D	2	Longitudinal
	10	Transversal
E	5	Longitudinal
	11	Transversal
F	6	Longitudinal
	7	Transversal

3.4. Metodología de montaje experimental y mediciones

3.4.1. Calibración

Previo a las mediciones se deben calibrar los acelerómetros para su correcto funcionamiento. Se sitúan en línea recta en el suelo, todos en la misma dirección como se muestra en la Figura 3.15. En esta calibración se graban datos por 10 minutos.

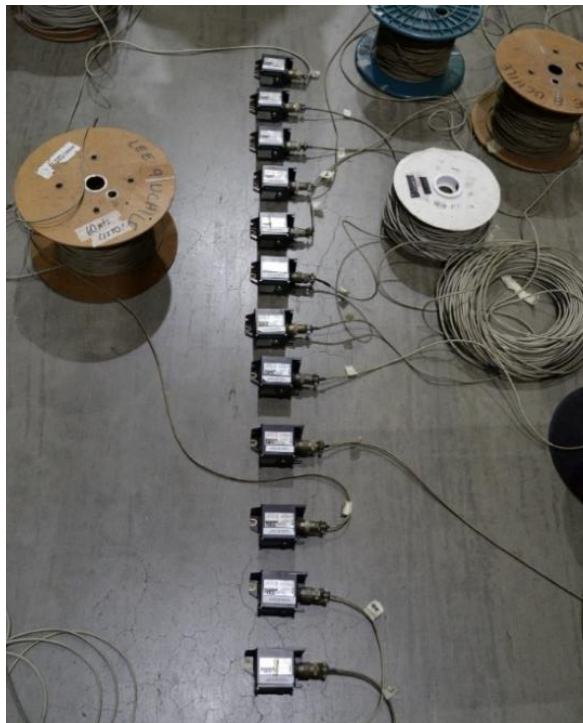


Figura 3.15. Calibración de acelerómetros.

3.4.2. Fijación de acelerómetros

Se colocan los sensores según las posiciones definidas en la sección anterior, con la ayuda de una plataforma elevadora para alcanzar los niveles más altos.



Figura 3.16. Plataforma elevadora utilizada.

Los acelerómetros son fijados a la columna del rack como se muestra en la Figura 3.17. El cable correspondiente se conecta una vez el sensor está seguro en su posición definitiva.

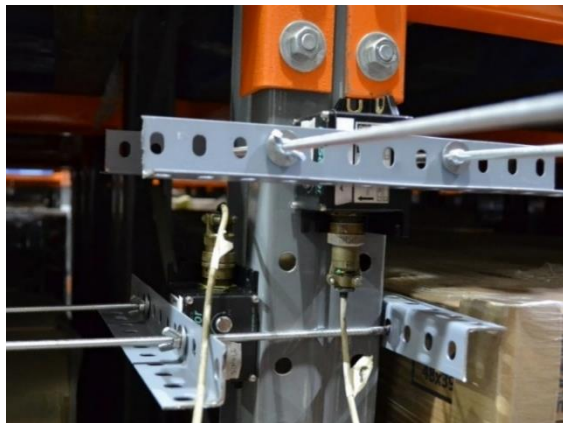


Figura 3.17. Sistema de prensa con acelerómetros fijados a la columna.

Cada cable se conecta por su otro extremo al sistema de adquisición de datos, el que a su vez es conectado a un computador gracias a su salida digital.

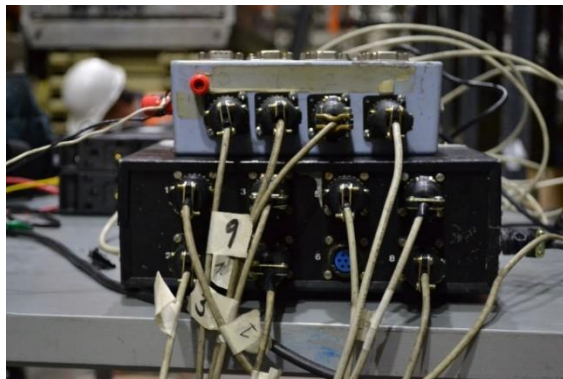


Figura 3.18. Cables conectados al sistema de adquisición de datos.

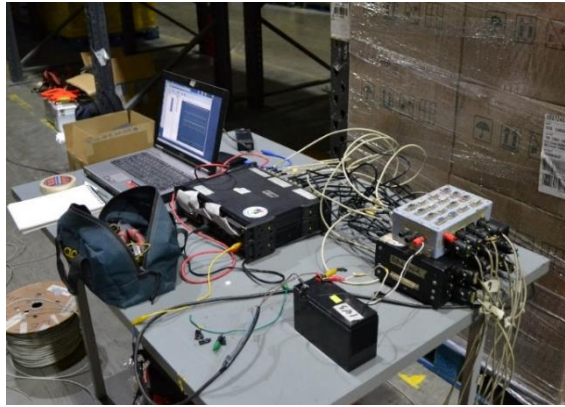


Figura 3.19. Estación de trabajo en terreno.

3.4.3. Toma de datos

Una vez cada sensor está en su posición y conectado, se energiza el sistema y se comienza a registrar los datos. Se registran datos en dos ocasiones, con las posiciones descritas en la sección 3.3, por 40 minutos cada una y a una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Los registros son guardados como “NES1” y “NES2” para el primer y segundo ensayo respectivamente.

3.5. Prospección geofísica

Con el fin de caracterizar el suelo donde se encuentra la estructura en estudio, paralelo a los ensayos de microvibraciones se realizan mediciones en el terreno aledaño al centro de distribución, mostrado en la Figura 3.20 (izquierda).

Para esto se utilizan 4 trominos en un arreglo presentado en la Figura 3.20 (derecha).



Figura 3.20. Ubicación de trominos y centro de distribución (izquierda), arreglo de trominos en el terreno (derecha)

Capítulo 4

Resultados

Los datos obtenidos con las mediciones son procesados con distintos métodos de identificación de estructuras. A continuación se presentan los resultados de cada método de identificación.

4.1. Registros ambientales

La distribución de los acelerómetros para cada medición se presenta en la Tabla 3.6 y la Tabla 3.7. La Figura 4.1 muestra la serie de tiempo de aceleraciones registrada en el primer ensayo, en el punto A. Los registros de aceleraciones para los demás sensores, tanto en la primera como en la segunda medición, se encuentran adjuntos en el Anexo A.

La tasa de muestreo es de 200 Hz. Se utilizan filtros del tipo Butterworth de orden 8, pasa bajo a 40 Hz y pasa alto a 0.35 Hz.

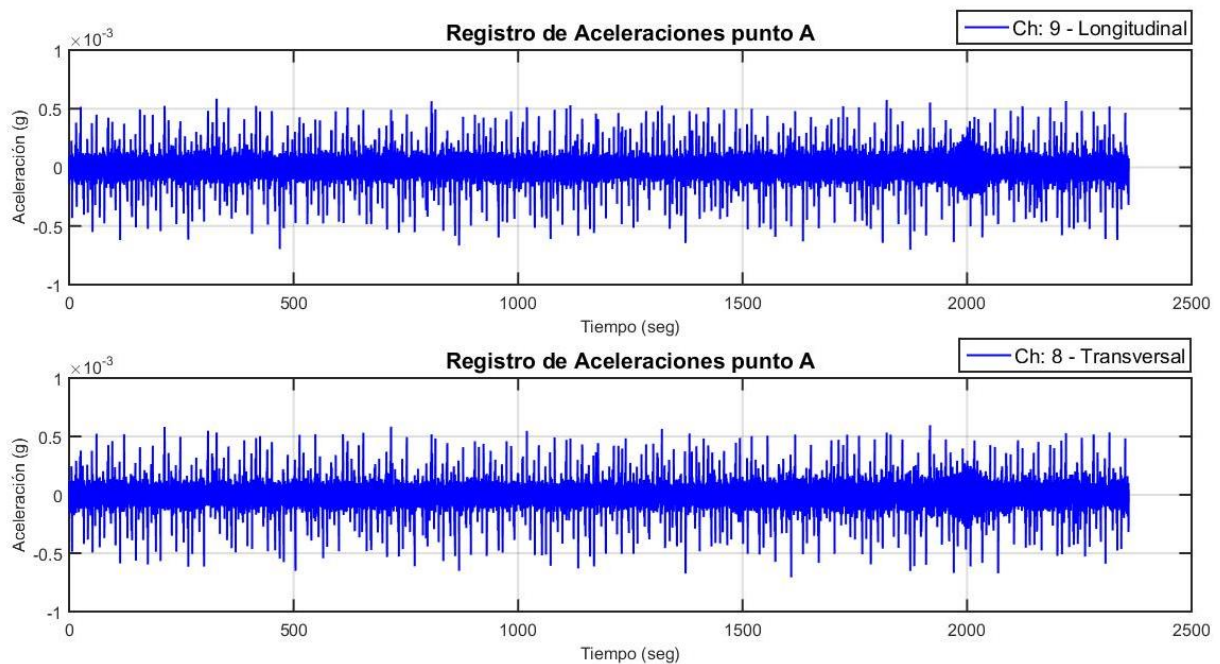


Figura 4.1. Registro punto A, NES1

4.2. Densidad del espectro de potencia (PSD)

Esta sección presenta los resultados del método PSD. Para tener resultados representativos de cada dirección de la estructura, se procesan los datos de los conjuntos de sensores longitudinales y transversales por separado.

4.2.1. Dirección longitudinal

En primer lugar se grafican los espectros de potencia para los sensores en dirección longitudinal para ambos registros, presentados en la Figura 4.2 y Figura 4.3.

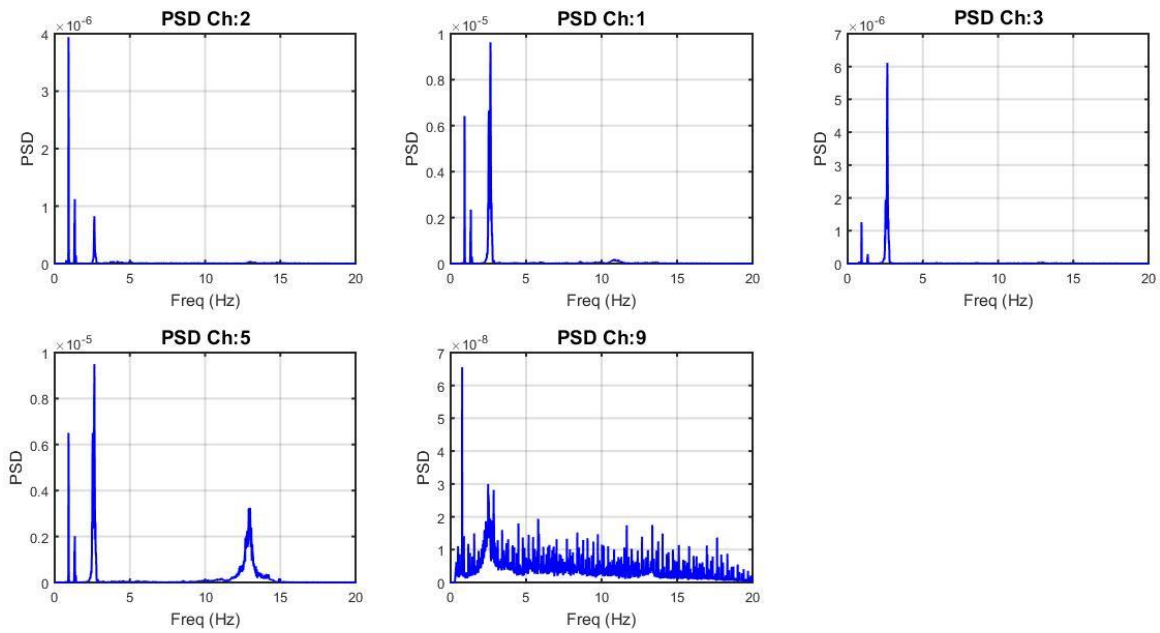


Figura 4.2. Espectros de potencia para sensores en dirección longitudinal, NES1

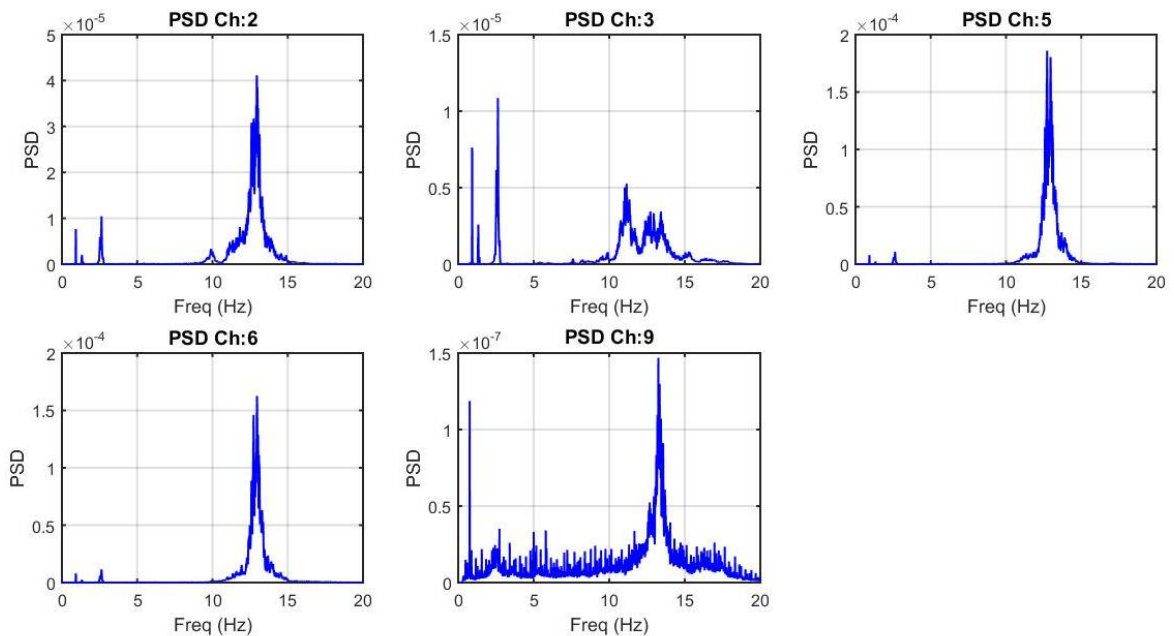


Figura 4.3. Espectros de potencia para sensores en dirección longitudinal, NES2

Se identifican las frecuencias con mayor energía a partir de los espectros de potencia anteriores. La Tabla 4.1 resume las frecuencias encontradas, que podrían corresponder a las frecuencias modales de la estructura.

Tabla 4.1. Frecuencias identificadas para la dirección longitudinal mediante PSD

NES1	NES2
f [Hz]	f [Hz]
0.76	0.76
0.92	0.92
1.34	1.33
2.64	2.63
8.59	9.91
12.95	12.96

Luego se grafican las formas modales para cada frecuencia identificada para lo cual se utiliza la razón espectral (función de transferencia) entre canales para las frecuencias que dominan las señales medidas (mostradas en el Anexo B). En la Figura 4.4 se presentan las formas modales para el primer ensayo, graficadas en elevación, mientras que en la Figura 4.5 las formas modales están graficadas en planta debido a la posición de los sensores en la segunda medición.

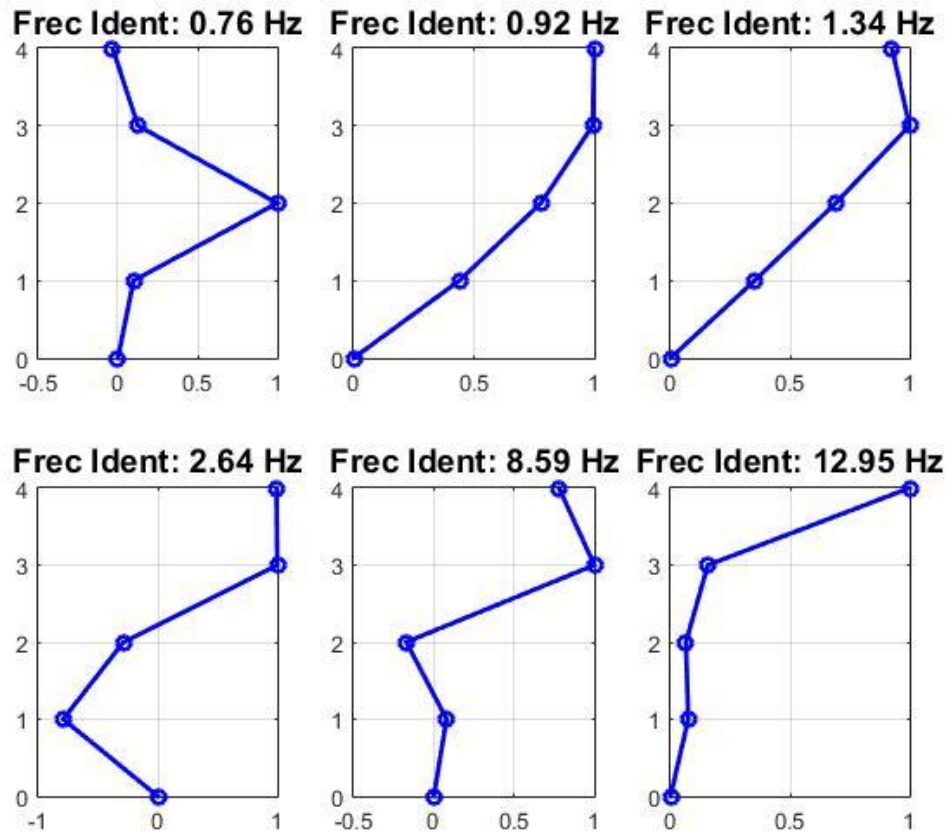


Figura 4.4. Formas modales longitudinales, NES1

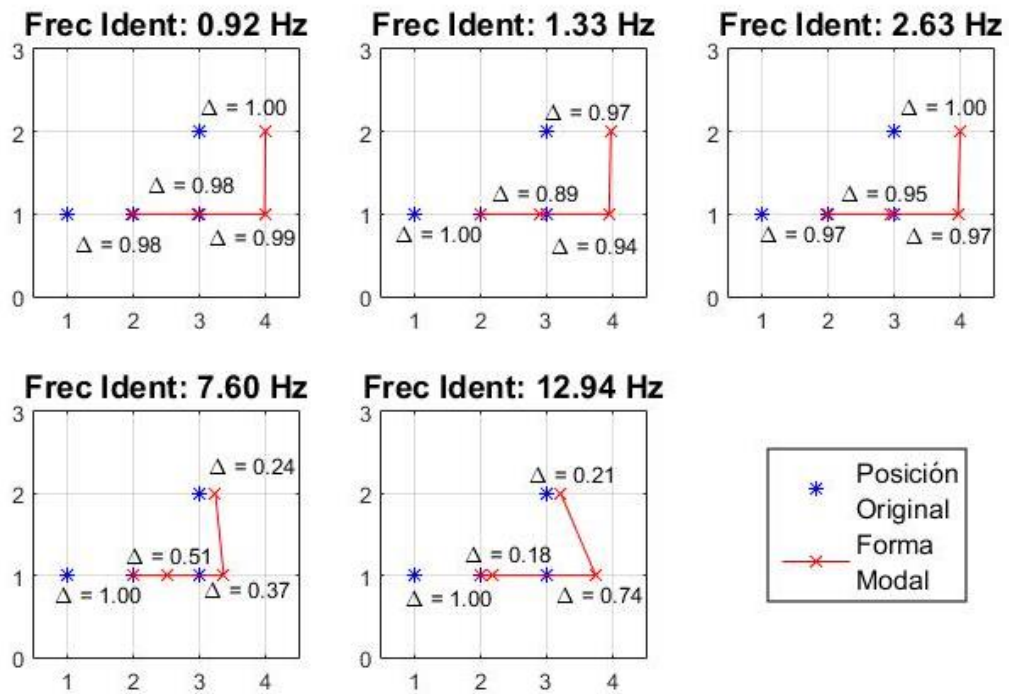


Figura 4.5. Formas modales longitudinales, NES2

4.2.2. Dirección transversal

Se grafican los espectros de potencia para la dirección transversal en ambas mediciones, presentados en la Figura 4.6 y Figura 4.7.

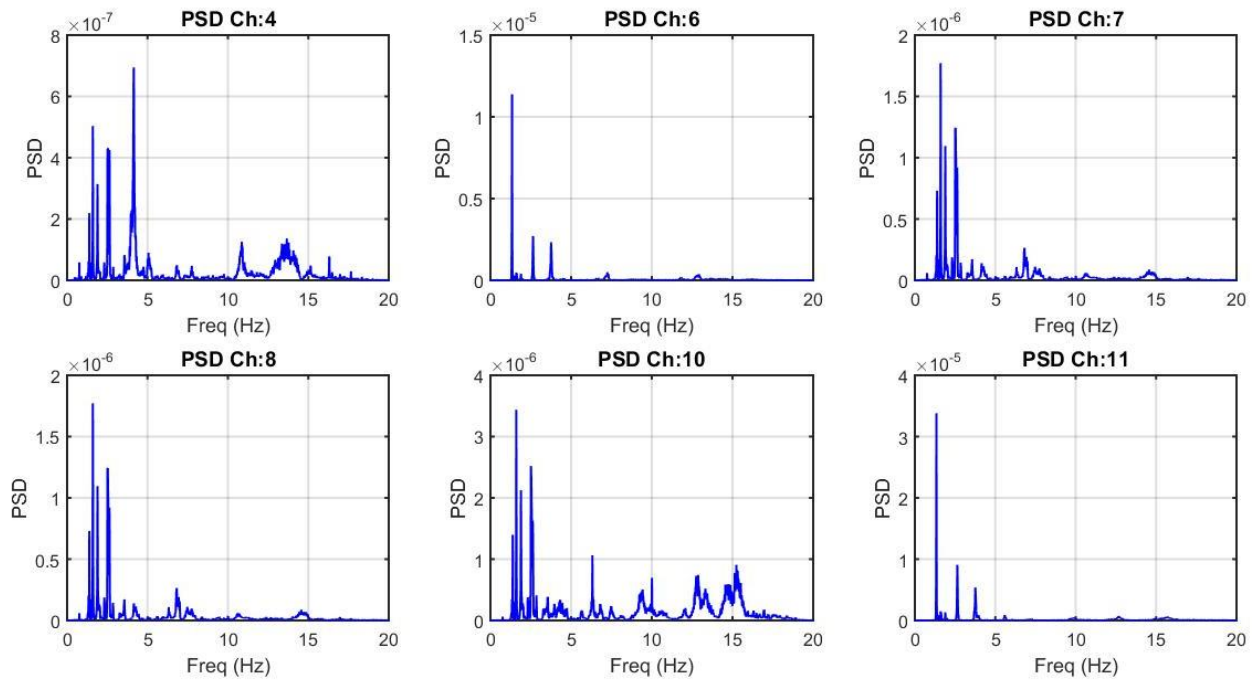


Figura 4.6. Espectros de potencia para sensores en dirección transversal, NES1

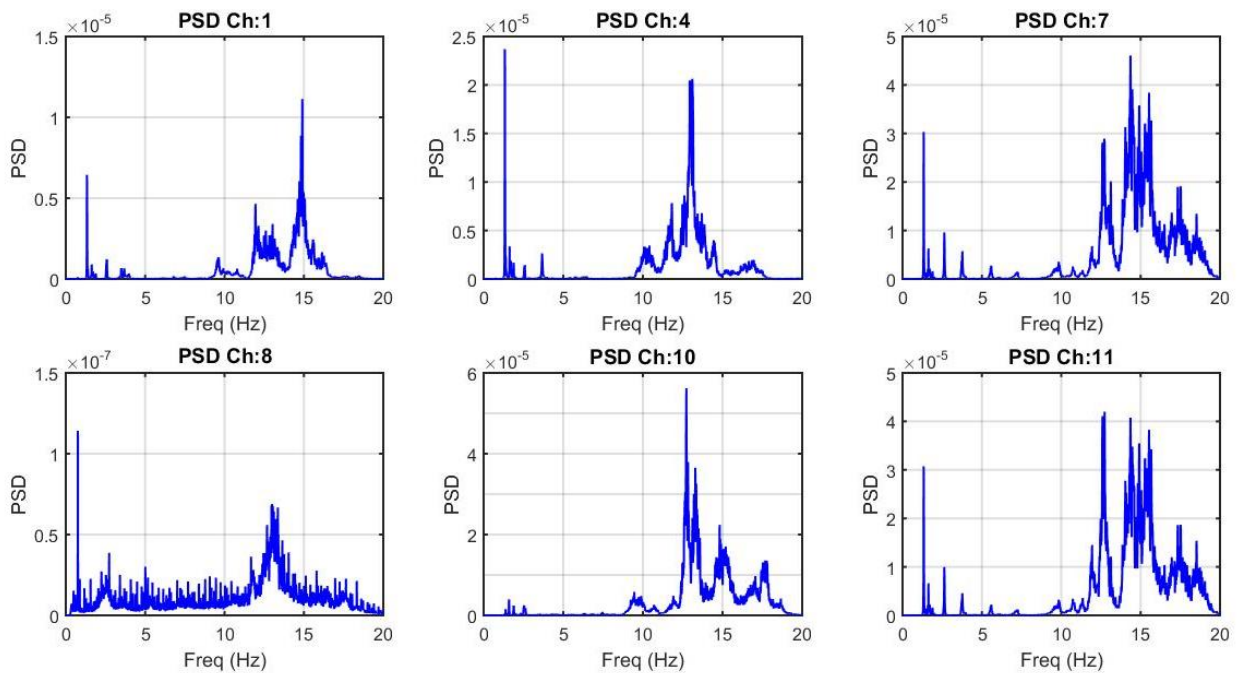


Figura 4.7. Espectros de potencia para sensores en dirección transversal, NES2

A partir de los espectros de potencia de ambos ensayos se identifican las frecuencias con mayor energía, resumidas en la Tabla 4.2 a continuación.

Tabla 4.2. Frecuencias identificadas para la dirección transversal mediante PSD

NES1	NES2
f [Hz]	f [Hz]
0.76	0.76
1.34	1.33
1.56	2.63
1.85	3.69
2.64	9.91
3.52	11.81
6.82	12.73
10.71	
12.67	

Se calculan las funciones de transferencia y coherencia, gracias a las cuales se obtienen las formas modales de la estructura. A continuación, en la Figura 4.8, se muestran las formas modales para el registro NES1. Fueron graficadas en elevación para las dos columnas instrumentadas.

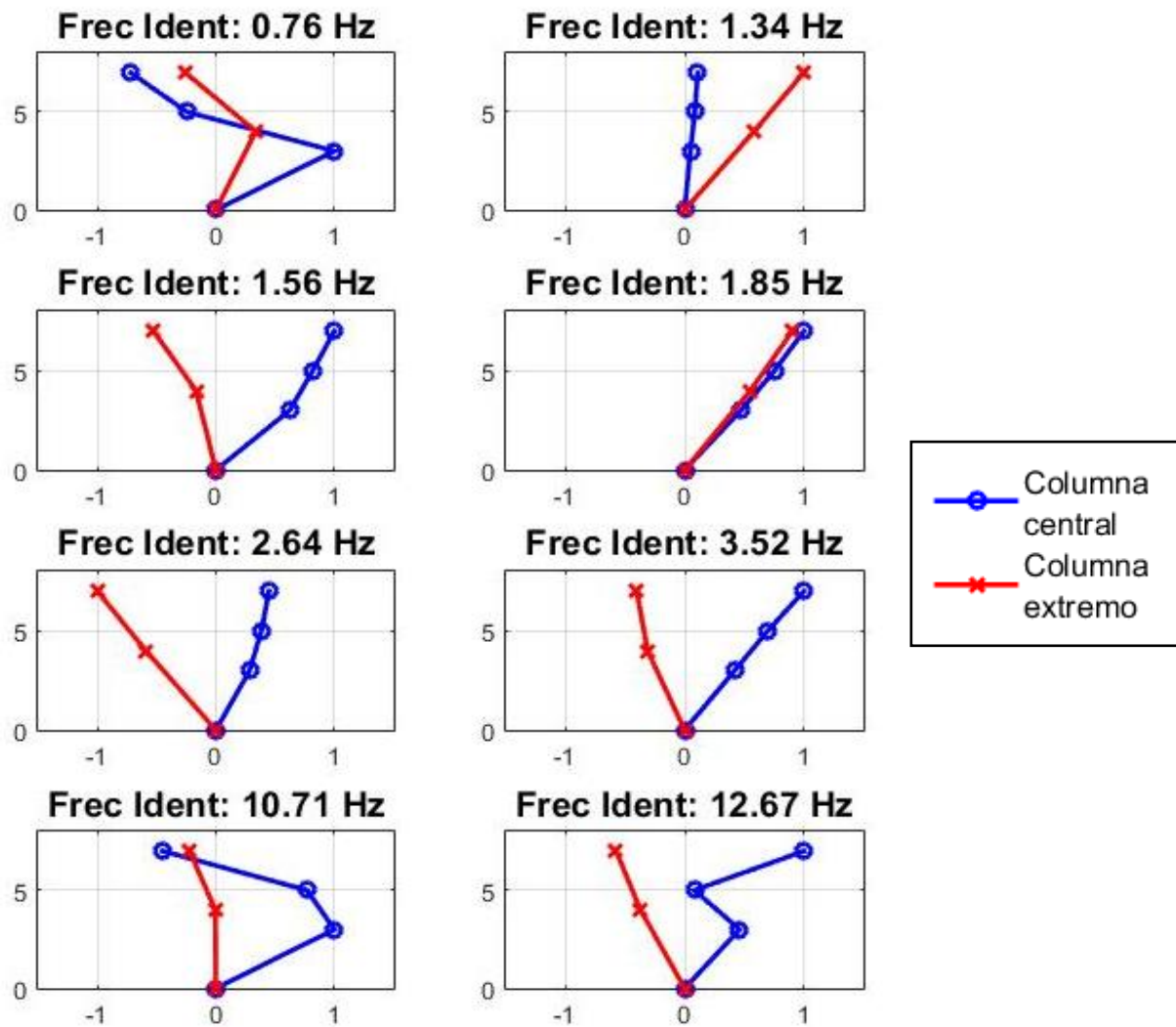


Figura 4.8. Formas modales transversales, NES1

La Figura 4.9 presenta las formas modales identificadas para el registro NES2, graficadas en planta. Para una mejor comprensión se grafica la posición original y la deformada.

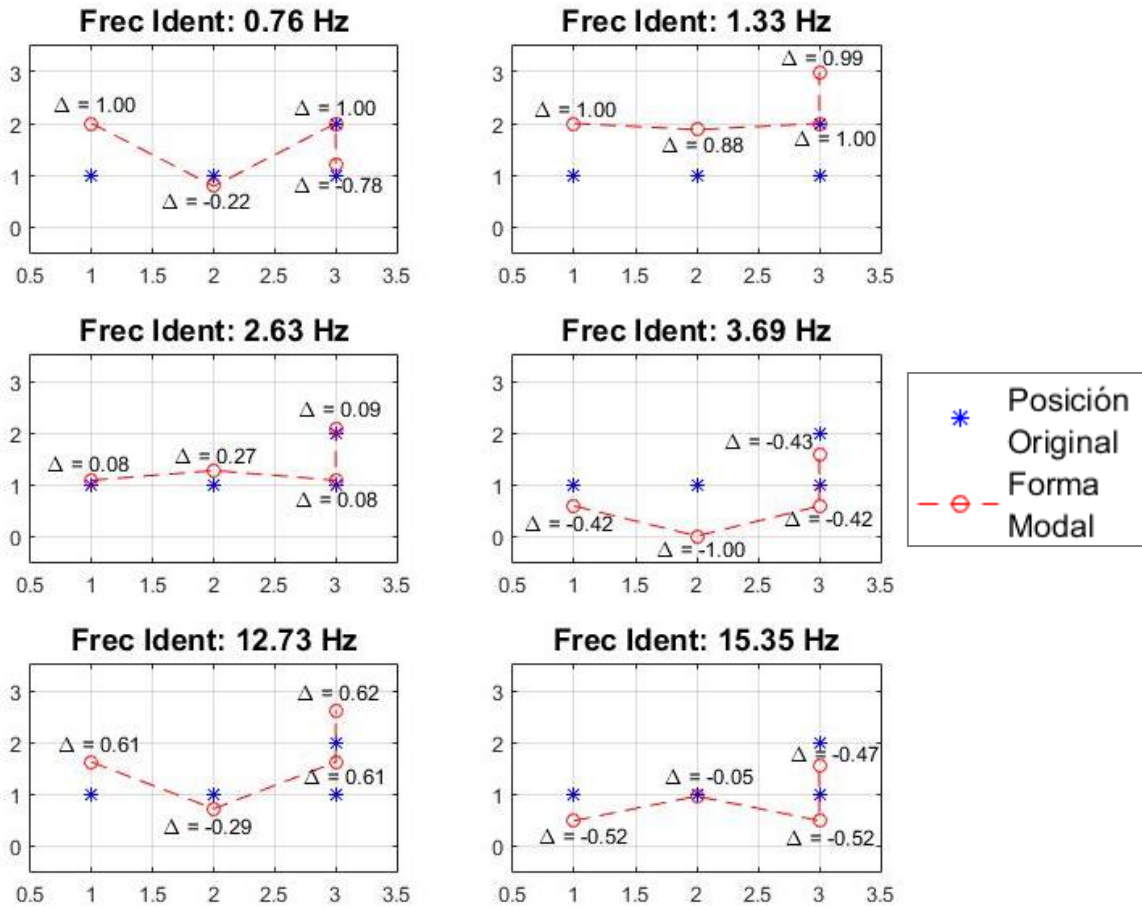


Figura 4.9. Formas modales transversales, NES2

4.2.3. Modos torsionales

A partir de las frecuencias identificadas en ambas direcciones se puede observar que se repiten las frecuencias 1.33 Hz, 2.64 Hz y 12.90 Hz tanto en dirección longitudinal como transversal. Dado esto se supone que estas frecuencias representan modos torsionales de la estructura. Se grafican las formas modales en la Figura 4.10, con los resultados del segundo ensayo.

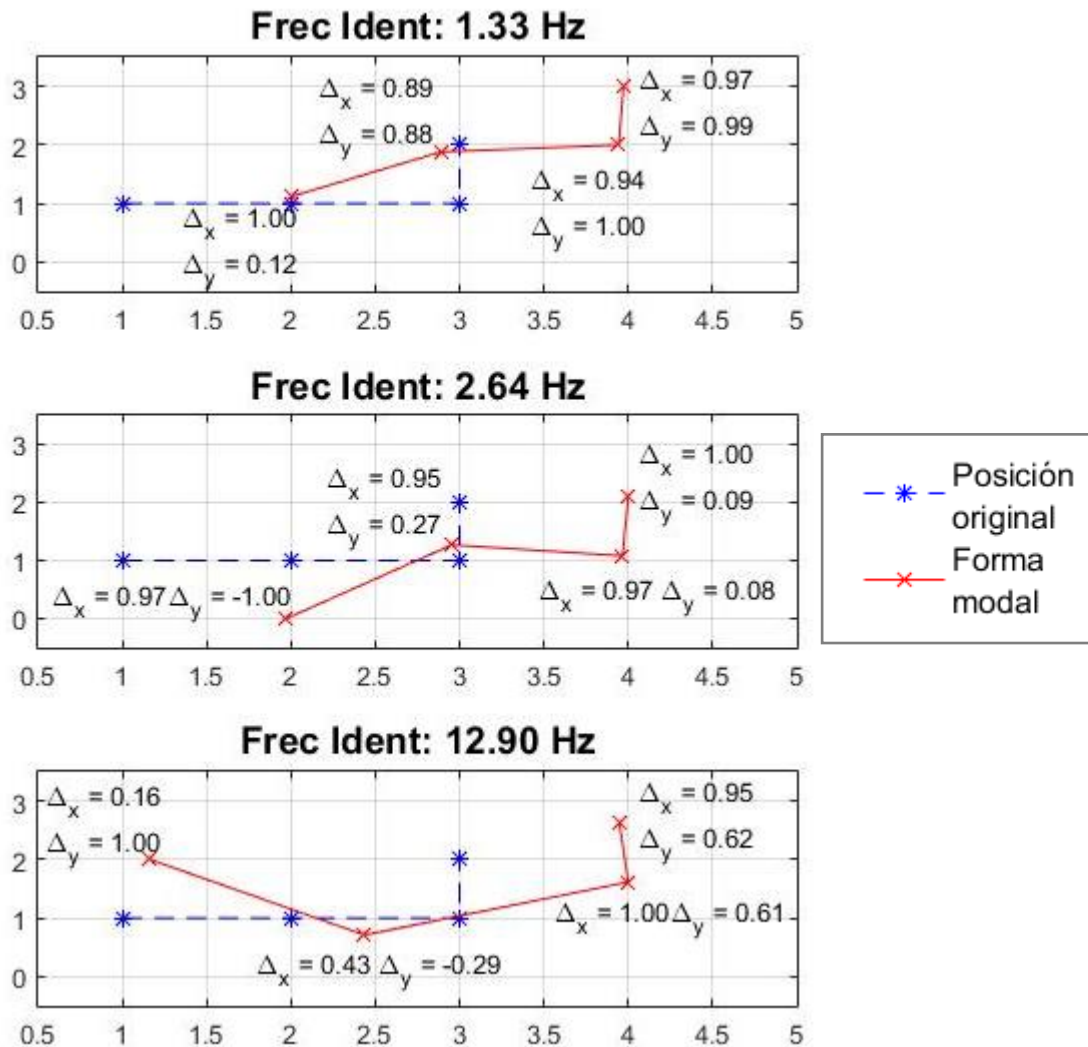


Figura 4.10. Formas modales torsionales, NES2

4.3. Sub-espacio estocástico (SSI)

Esta sección presenta los resultados del método SSI, separados según la dirección de los sensores.

4.3.1. Dirección Longitudinal

Se grafican los diagramas de estabilidad obtenidos a partir de este método, para los sensores en dirección longitudinal en ambos registros. La Figura 4.11 presenta el diagrama de estabilidad obtenido a partir del registro NES1.

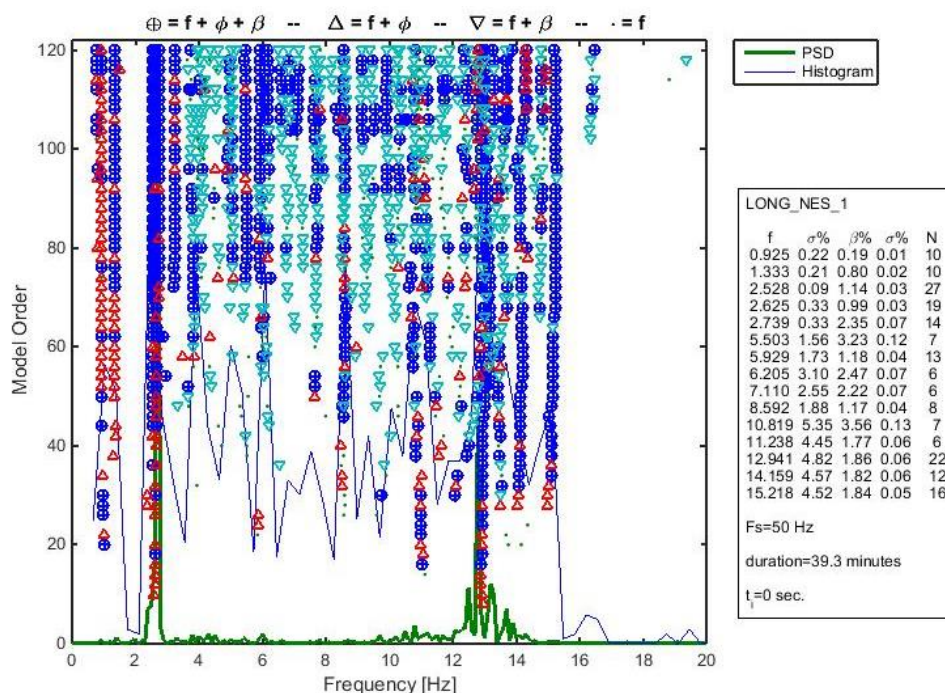


Figura 4.11. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método SSI, NES1

A continuación, la Tabla 4.3 muestra las frecuencias identificadas a partir del registro NES1 con sus respectivos períodos y razones de amortiguamiento.

Tabla 4.3. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES1 en dirección longitudinal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
0.925	1.081	0.19
1.333	0.750	0.80
2.528	0.396	1.14
2.625	0.381	0.99
5.503	0.182	3.23
7.110	0.141	2.22
8.592	0.116	1.17
10.819	0.092	3.56
12.941	0.077	1.86
15.218	0.066	1.84

Se grafican las formas modales asociadas al diagrama de estabilidad del ensayo NES1 en dirección longitudinal:

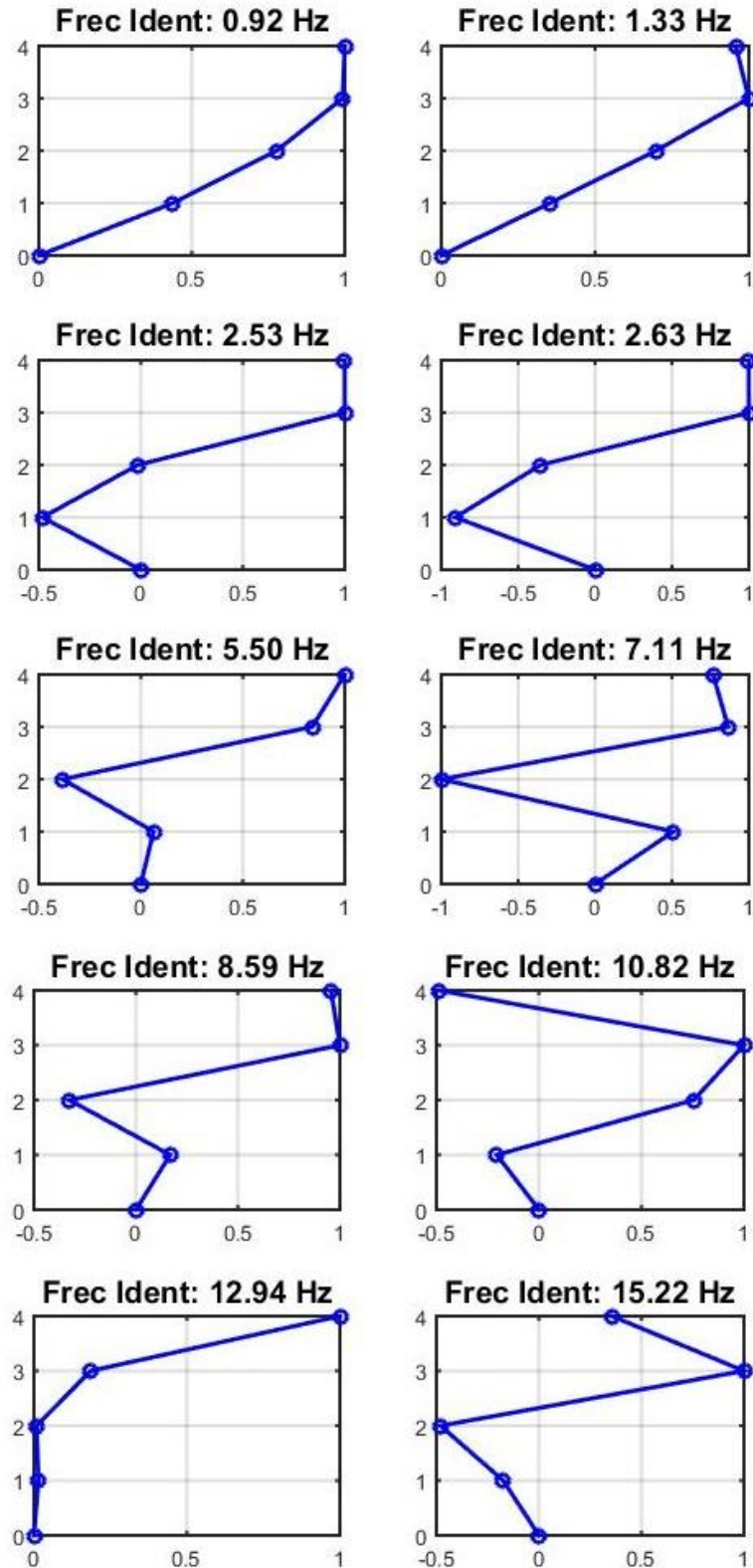


Figura 4.12. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores longitudinales NES1.

El diagrama de estabilidad correspondiente al registro NES2 se presenta en la Figura 4.13:

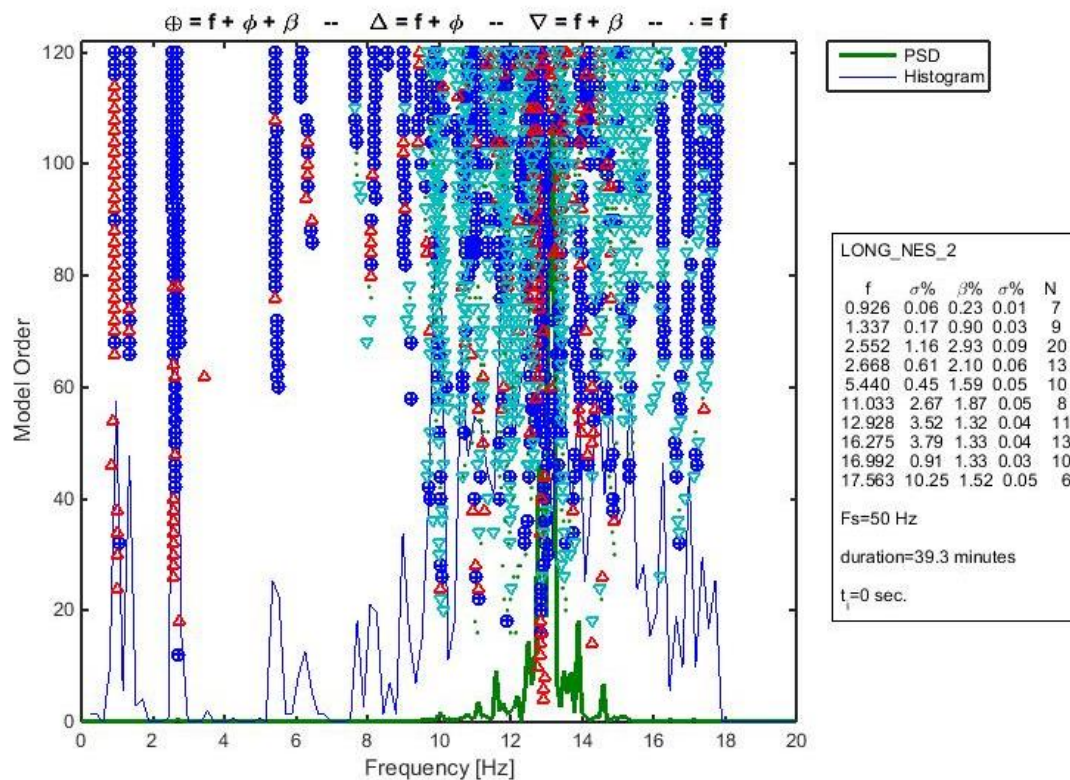


Figura 4.13. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método SSI, NES2

A partir del diagrama anterior se identifican las frecuencias modales, períodos y amortiguamientos asociados, presentados en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES2 en dirección longitudinal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
0.926	1.080	0.23
1.337	0.748	0.90
2.552	0.392	2.93
2.668	0.375	2.10
5.440	0.184	1.59
12.928	0.077	1.32

Se grafican las formas modales en la dirección longitudinal para el ensayo NES2. La Figura 4.14 presenta un esquema de la posición de los sensores, mostrados en planta. En la Figura 4.15 se muestran las formas modales obtenidas, con los respectivos desplazamientos de cada punto.

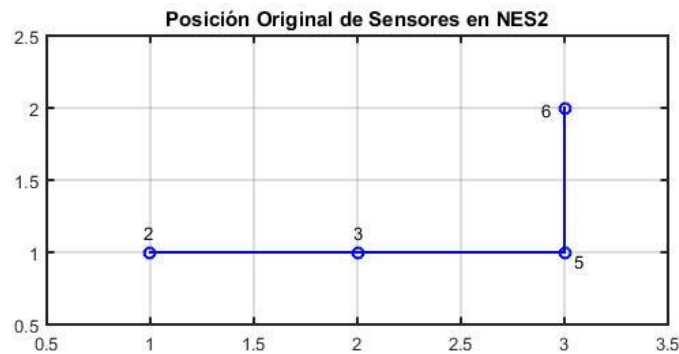


Figura 4.14. Posición de sensores en planta, NES2.

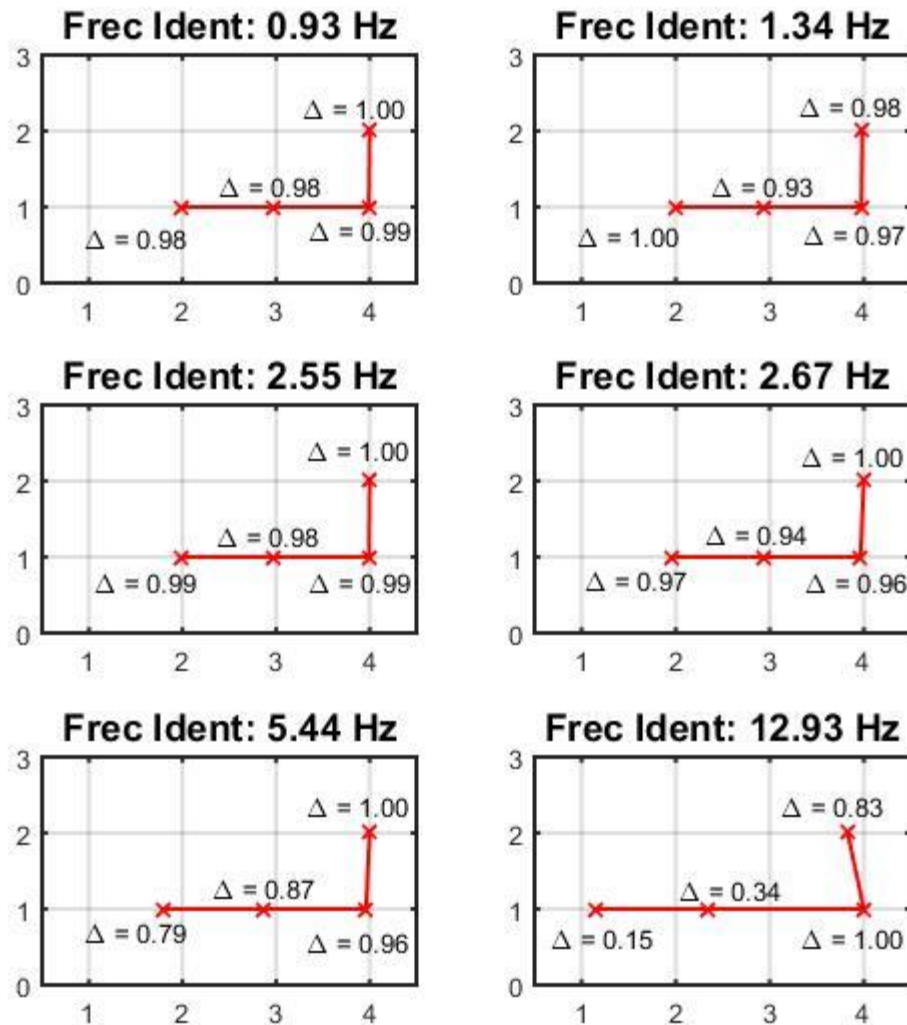


Figura 4.15. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores longitudinales NES2

4.3.2. Dirección transversal

Se grafican los diagramas de estabilidad obtenidos a partir de este método, para los sensores en dirección transversal en ambos registros. La Figura 4.16 presenta el diagrama de estabilidad en esta dirección para el registro NES1.

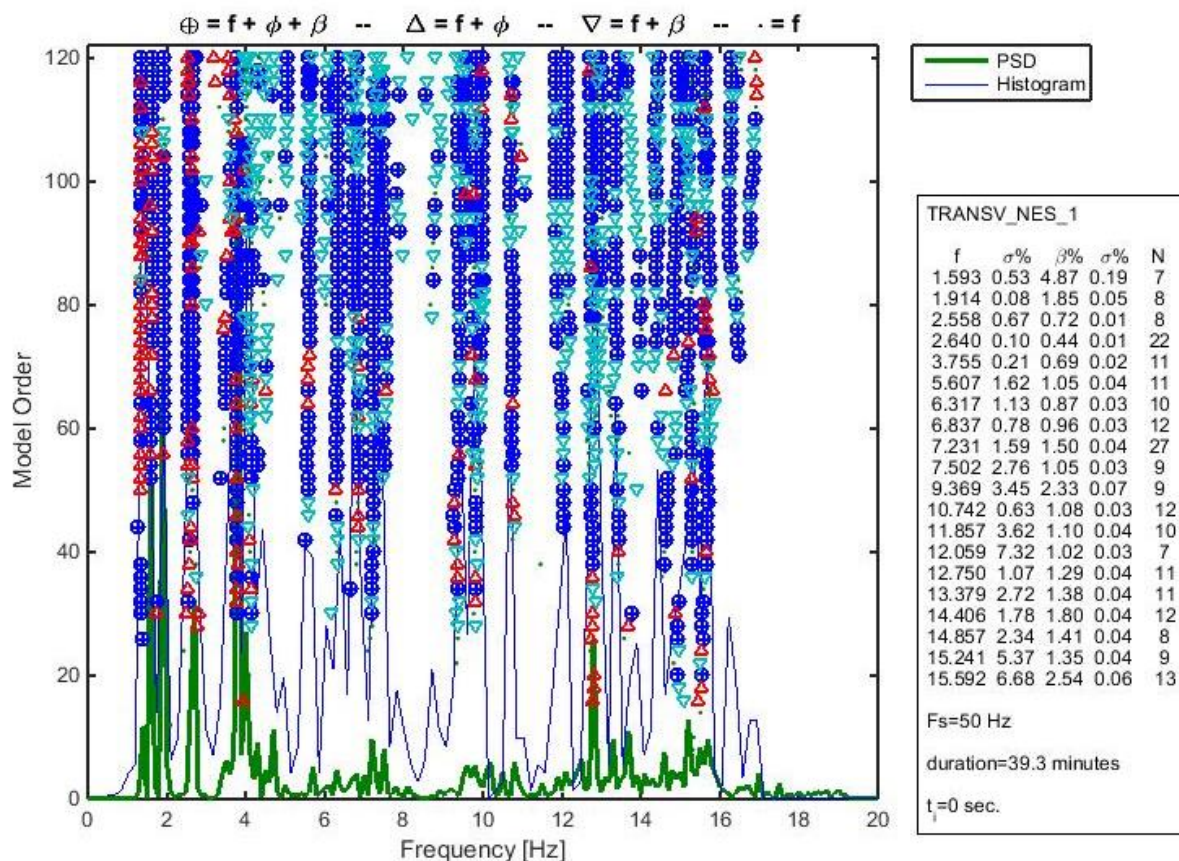


Figura 4.16. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método SSI, NES1

A partir del diagrama anterior se identifican las frecuencias modales, períodos y amortiguamientos asociados, presentados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES1 en dirección transversal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
1.593	0.628	4.87
1.914	0.522	1.85
2.558	0.391	0.72
2.640	0.379	0.44
3.755	0.266	0.69
5.607	0.178	1.05
7.231	0.138	1.50
10.742	0.093	1.08
12.750	0.078	1.29
15.241	0.066	1.35

Se grafican las formas modales para cada frecuencia identificada, para las dos columnas instrumentadas en este ensayo:

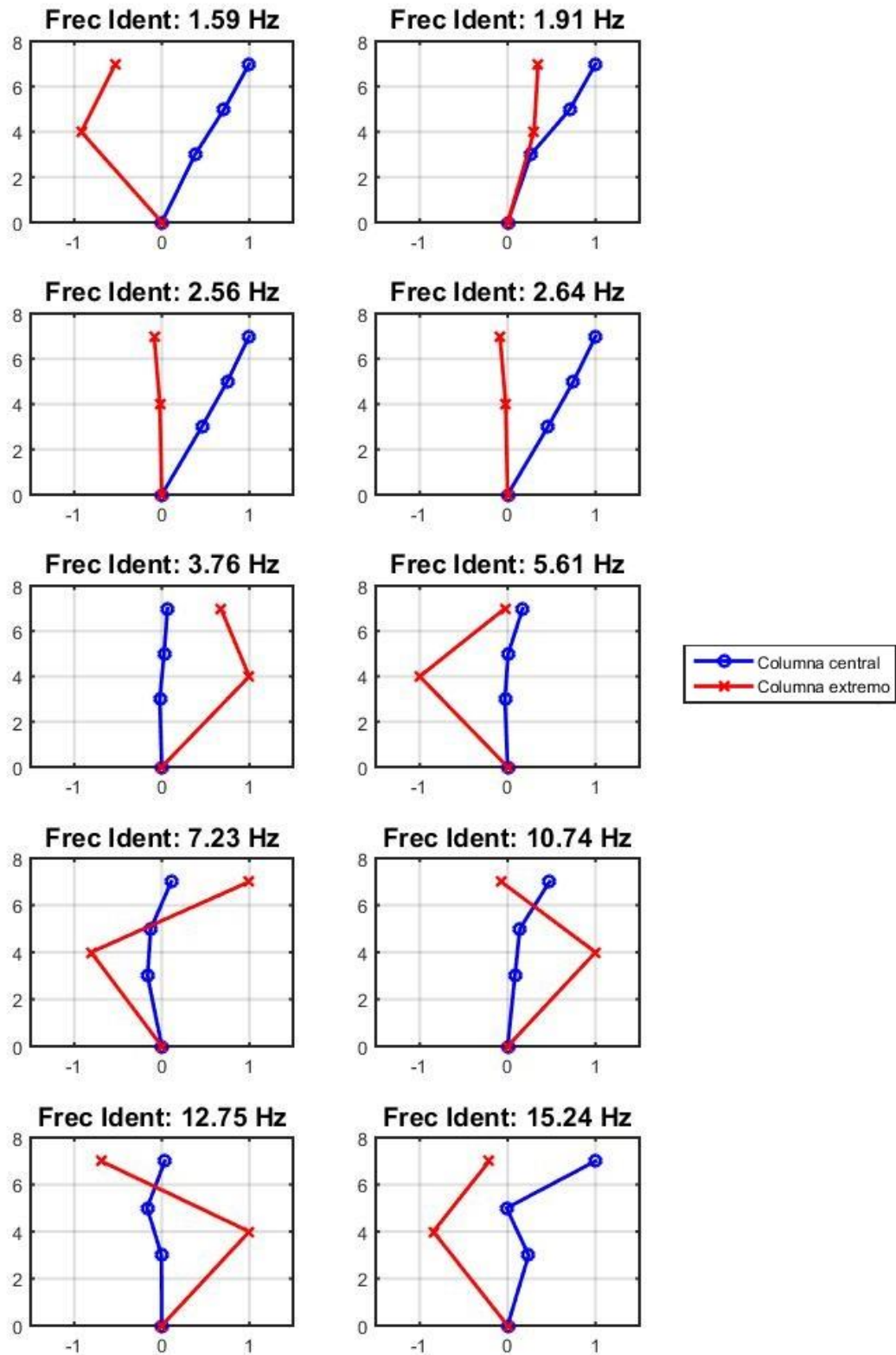


Figura 4.17. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores transversales NES1

La Figura 4.18 presenta el diagrama de estabilidad del registro NES2:

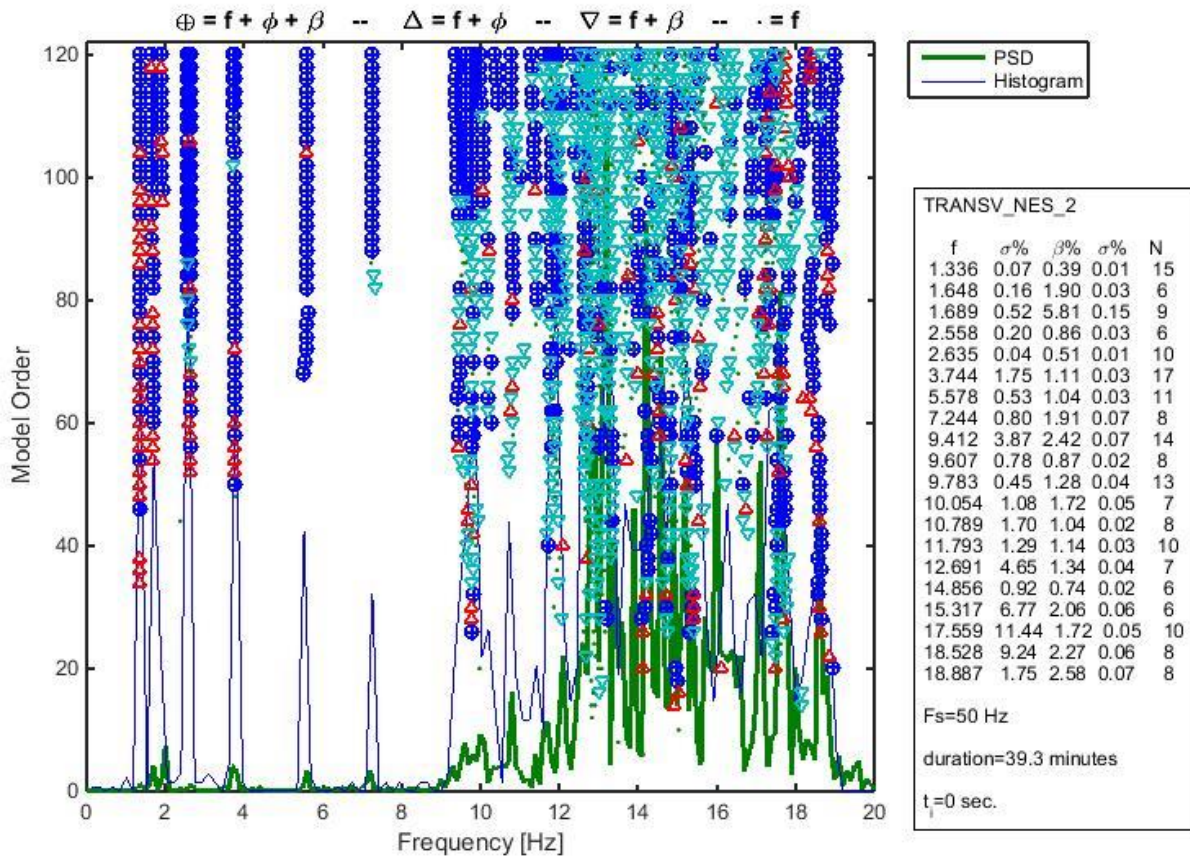


Figura 4.18. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método SSI, NES2.

Con los datos de la Figura 4.18, se elabora la Tabla 4.6 que presenta las frecuencias identificadas con los períodos y razones de amortiguamiento asociados a cada una de ellas.

Tabla 4.6. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método SSI para el registro NES2 en dirección transversal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
1.336	0.749	0.39
1.648	0.607	1.90
2.558	0.391	0.86
2.635	0.380	0.51
3.744	0.267	1.11
5.578	0.179	1.04
7.244	0.138	1.91
10.789	0.093	1.04
12.691	0.079	1.34
15.317	0.065	2.06

Se grafican las formas modales en dirección transversal, para el registro NES2:

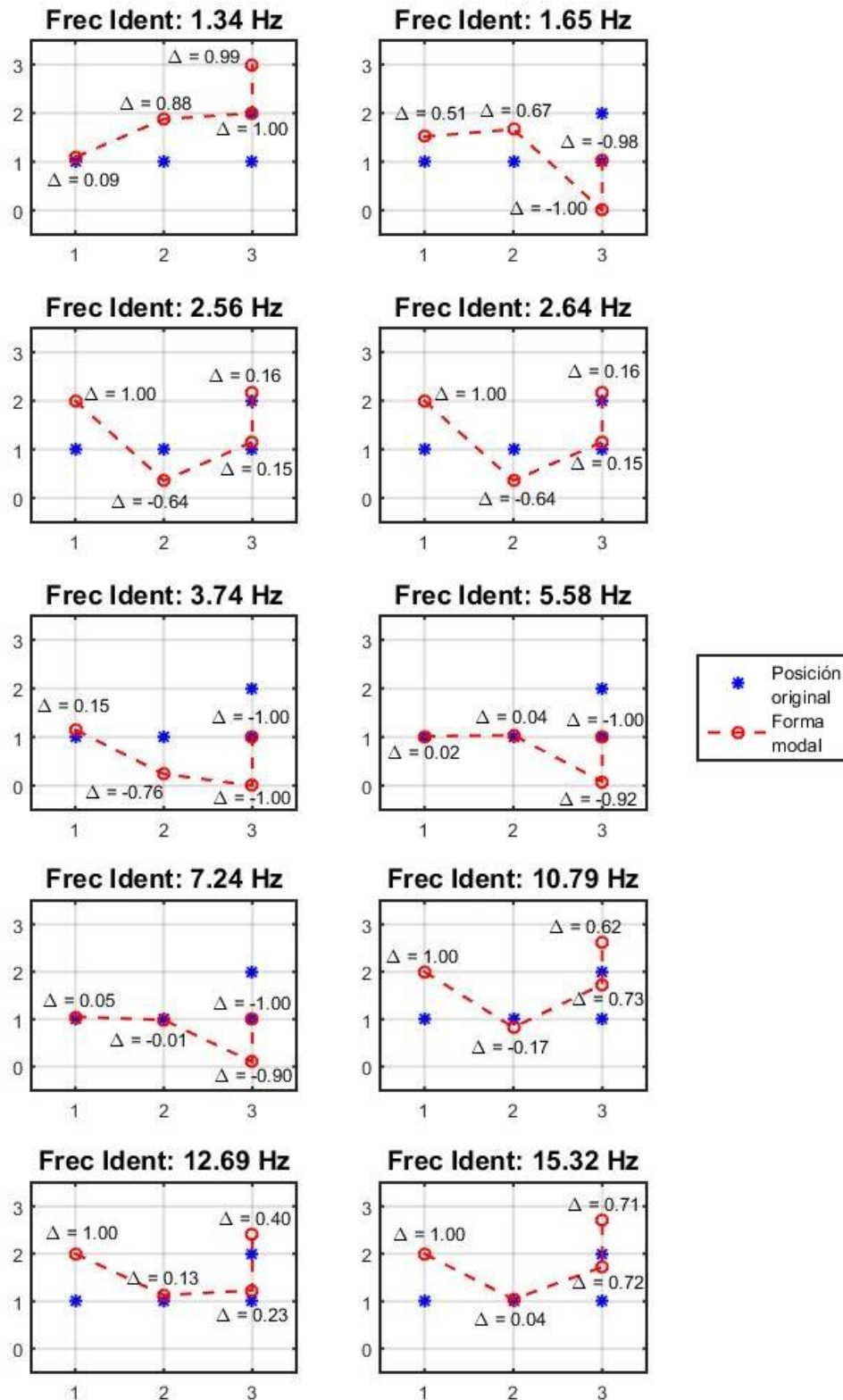


Figura 4.19. Formas modales para frecuencias identificadas según método SSI, sensores transversales NES2

4.3.3. Modos torsionales

Dadas las frecuencias identificadas, se puede asumir que aquellas que se encuentran tanto en dirección longitudinal como transversal corresponden a modos torsionales de la estructura. En la Figura 4.20 se grafica para el caso del registro NES2, debido a que la posición de los sensores permite una mejor comprensión de la torsión del rack.

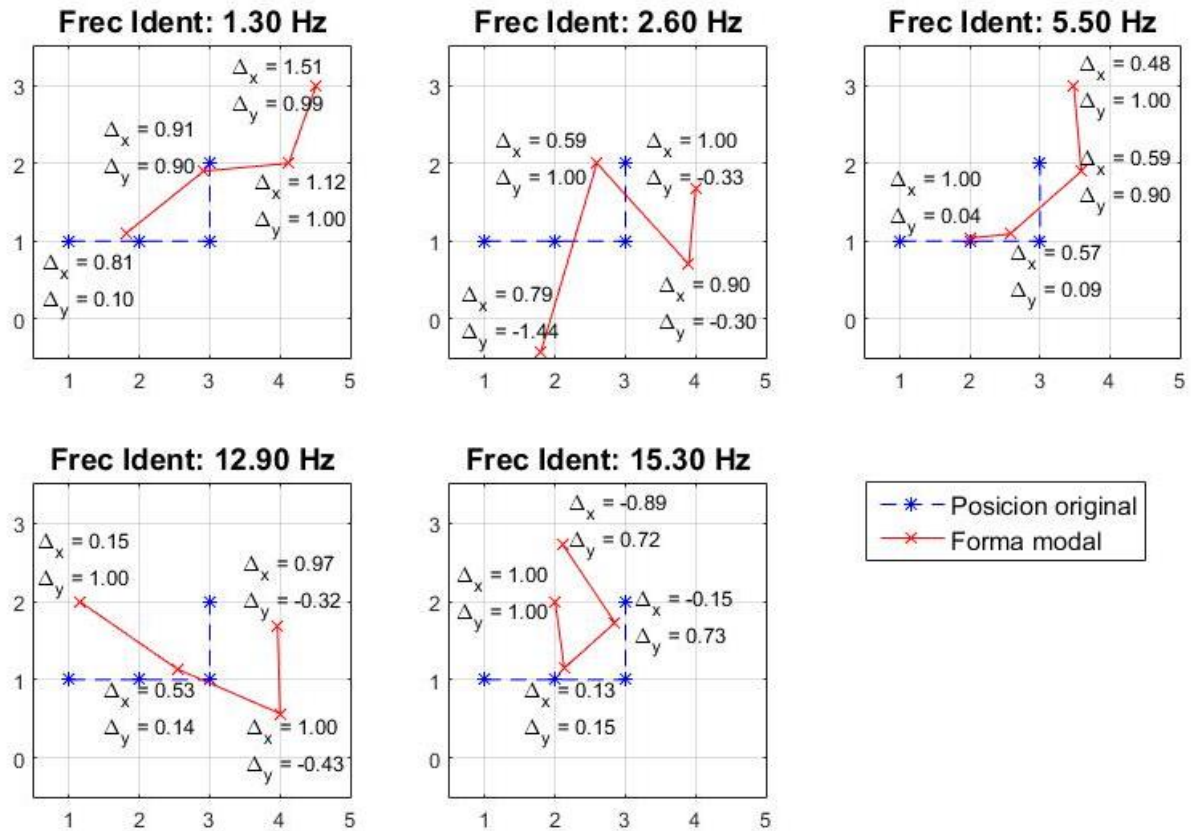


Figura 4.20. Formas modales torsionales según método SSI, NES2

4.4. DSI (Deterministic – Stochastic Subspace Identification)

A continuación se presentan los resultados para el método DSI, según la dirección de los sensores en cada ensayo.

Para este método, se considera como entrada los sensores 8 y 9, ubicados en la base de la columna central del rack. La finalidad de utilizar esta metodología era verificar si de los modos identificados corresponden a la estructura o se asocian a una interacción suelo-estructura. De esta forma, esta metodología permite identificar los modos referidos a la base del sistema (i.e., solamente estructural).

4.4.1. Dirección longitudinal

Se grafican los diagramas de estabilidad obtenidos a partir de este método, para los sensores en dirección longitudinal en ambos registros. La Figura 4.21 presenta el diagrama de estabilidad obtenido a partir del registro NES1.

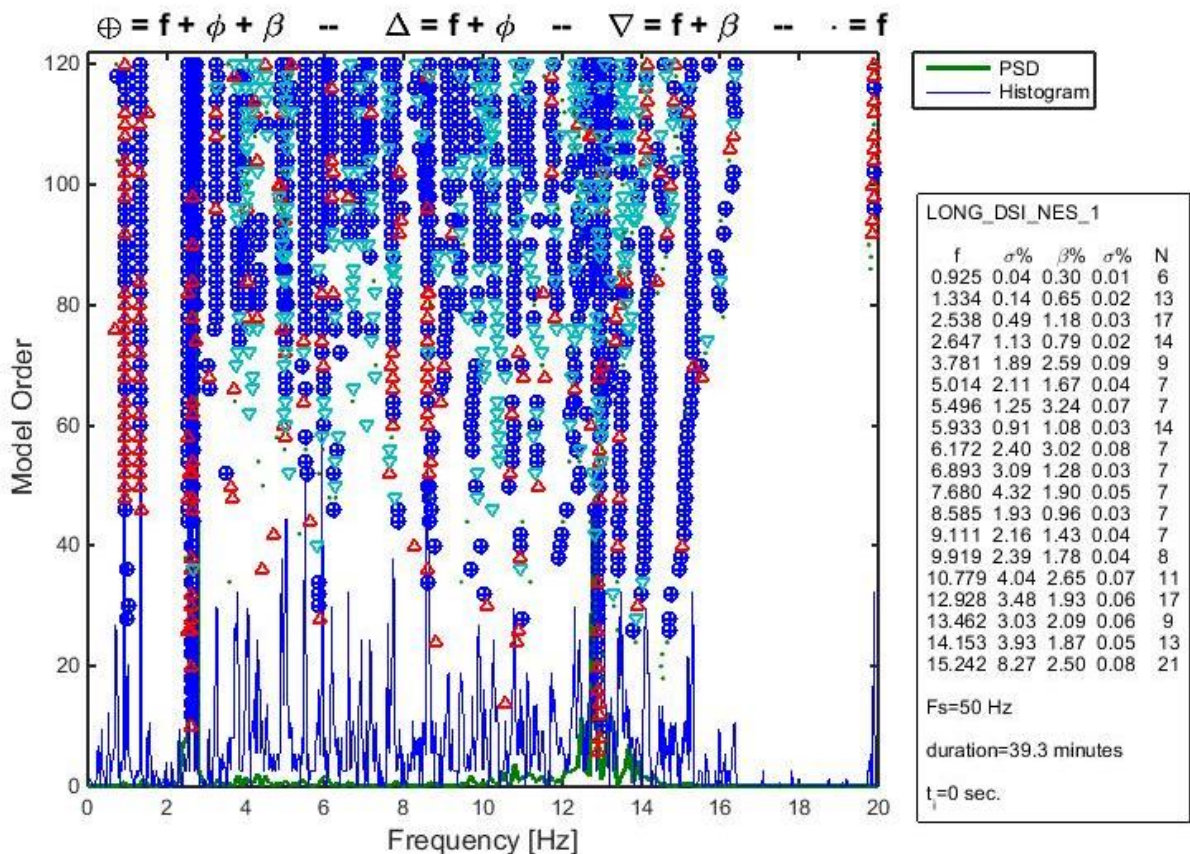


Figura 4.21. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método DSI, NES1

A partir del diagrama anterior se identifican las frecuencias modales, períodos y amortiguamientos asociados, presentados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES1 en dirección longitudinal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
0.925	1.081	0.30
1.334	0.750	0.65
2.538	0.394	1.18
2.647	0.378	0.79
3.781	0.264	2.59
5.496	0.182	3.24
6.172	0.162	3.02
7.680	0.130	1.90
8.585	0.116	0.96
10.779	0.093	2.65
12.928	0.077	1.93
15.242	0.066	2.50

Se grafican las formas modales en dirección longitudinal para el primer registro. En este caso se muestran en elevación según la distribución de los acelerómetros en el ensayo.

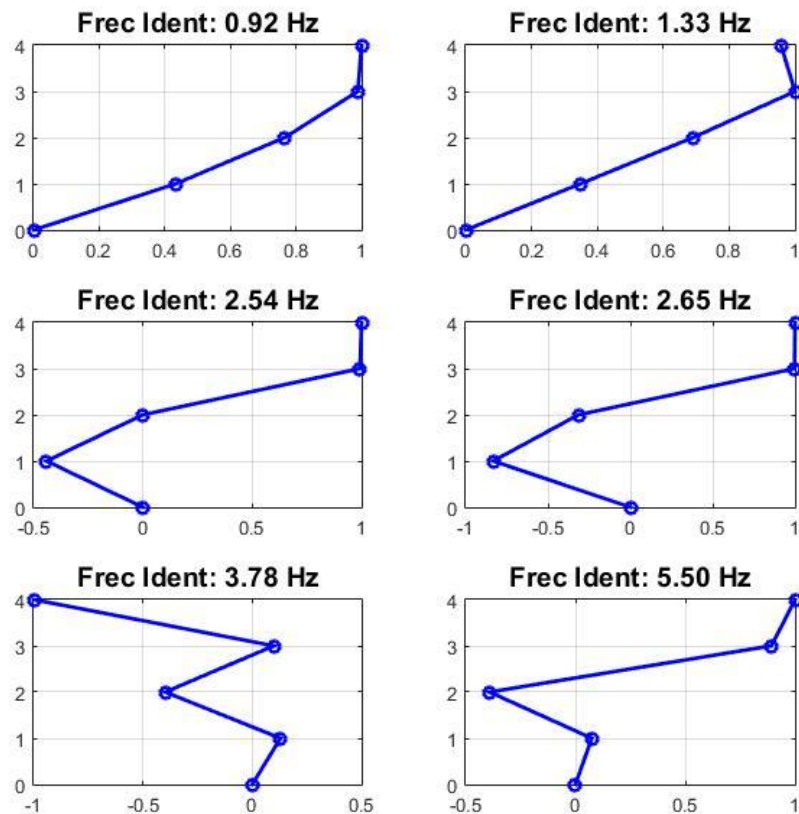


Figura 4.22. Formas modales según método DSI en dirección longitudinal, NES1. Modos 1 al 6.

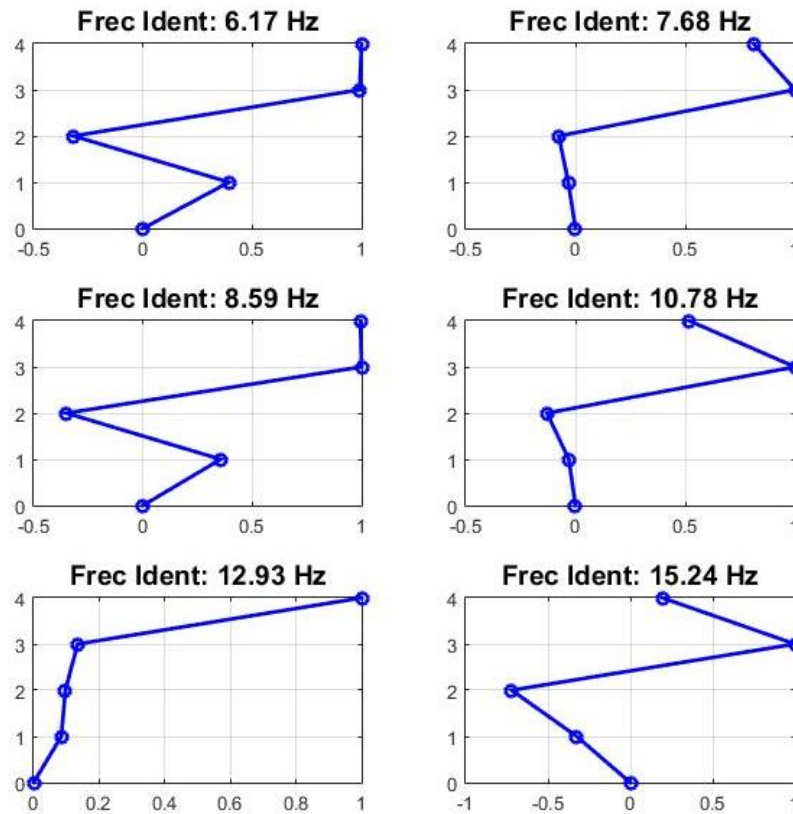


Figura 4.23. Formas modales según método DSI en dirección longitudinal, NES1. Modos 7 al 12.

La Figura 4.24 presenta el diagrama de estabilidad para la dirección longitudinal en la medición NES2:

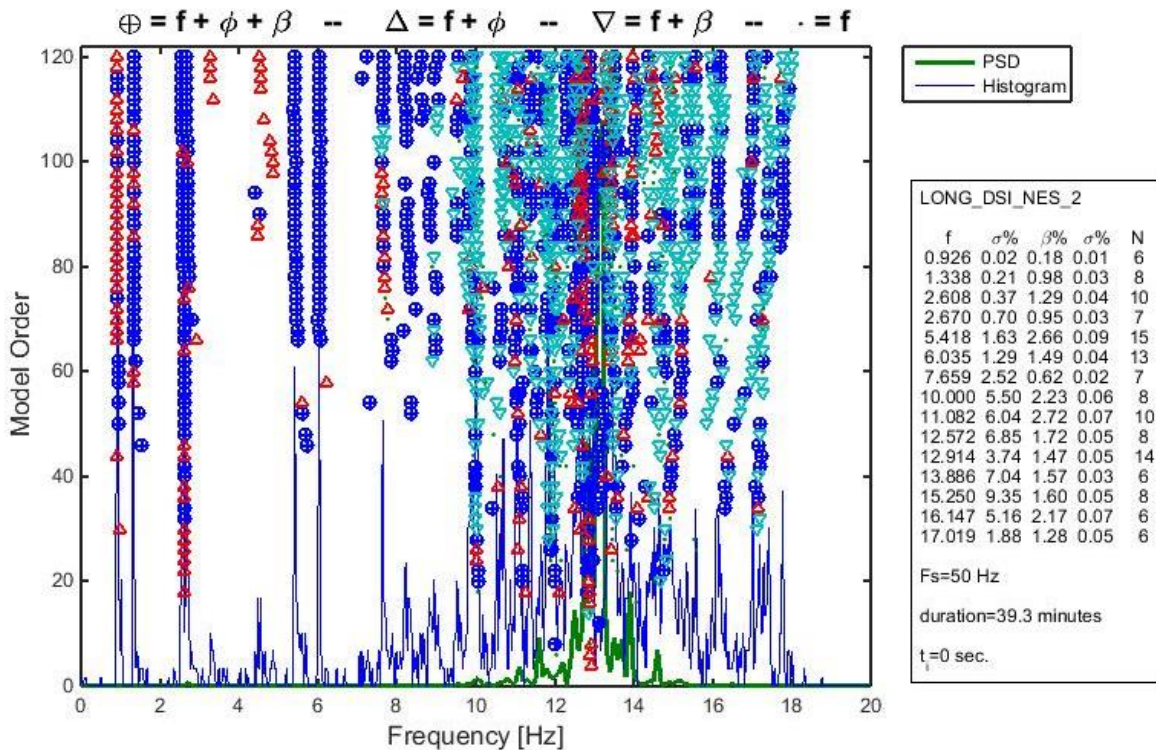


Figura 4.24. Diagrama de estabilidad longitudinal a partir del método DSI, NES2

A partir del diagrama anterior se identifican las frecuencias modales, períodos y amortiguamientos asociados, presentados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES1 en dirección longitudinal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
0.925	1.081	0.30
1.334	0.750	0.65
2.538	0.394	1.18
2.647	0.378	0.79
3.781	0.264	2.59
5.496	0.182	3.24
6.172	0.162	3.02
7.680	0.130	1.90
8.585	0.116	0.96
10.779	0.093	2.65
12.928	0.077	1.93
15.242	0.066	2.50

Se grafican las formas modales para cada frecuencia identificada, en la Figura 4.25:

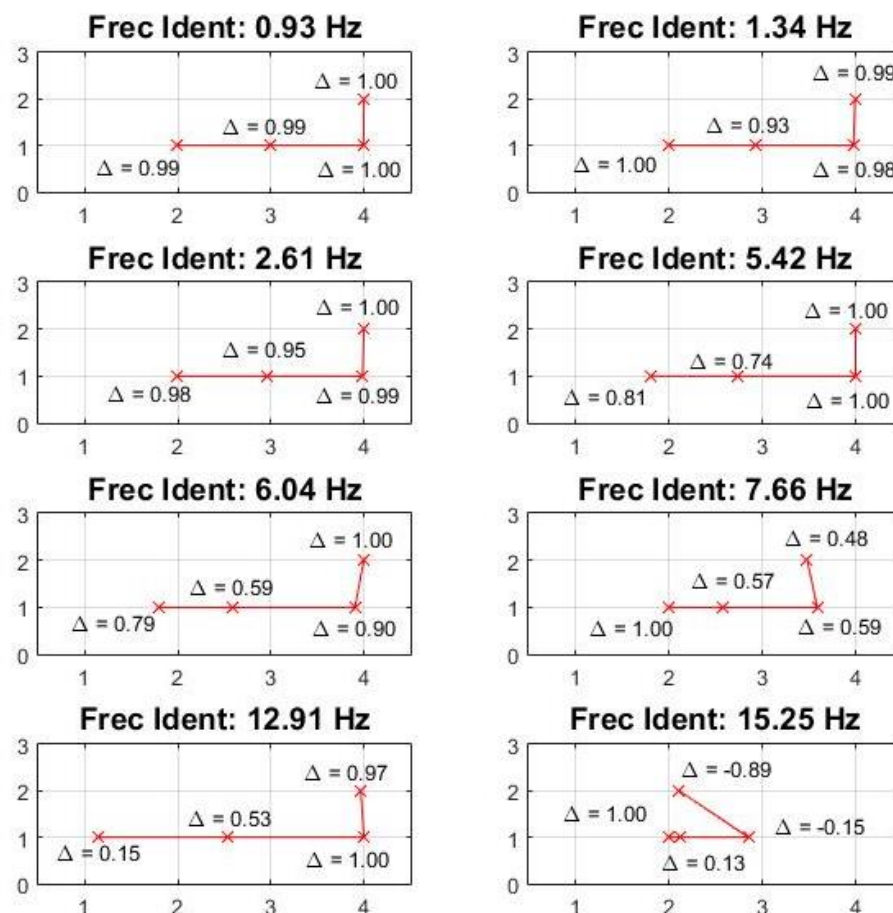


Figura 4.25. Formas modales según método DSI, sensores longitudinales, NES2

4.4.2. Dirección transversal

La Figura 4.26 muestra el diagrama de estabilidad para la dirección transversal, obtenido a partir de los datos del registro NES1.

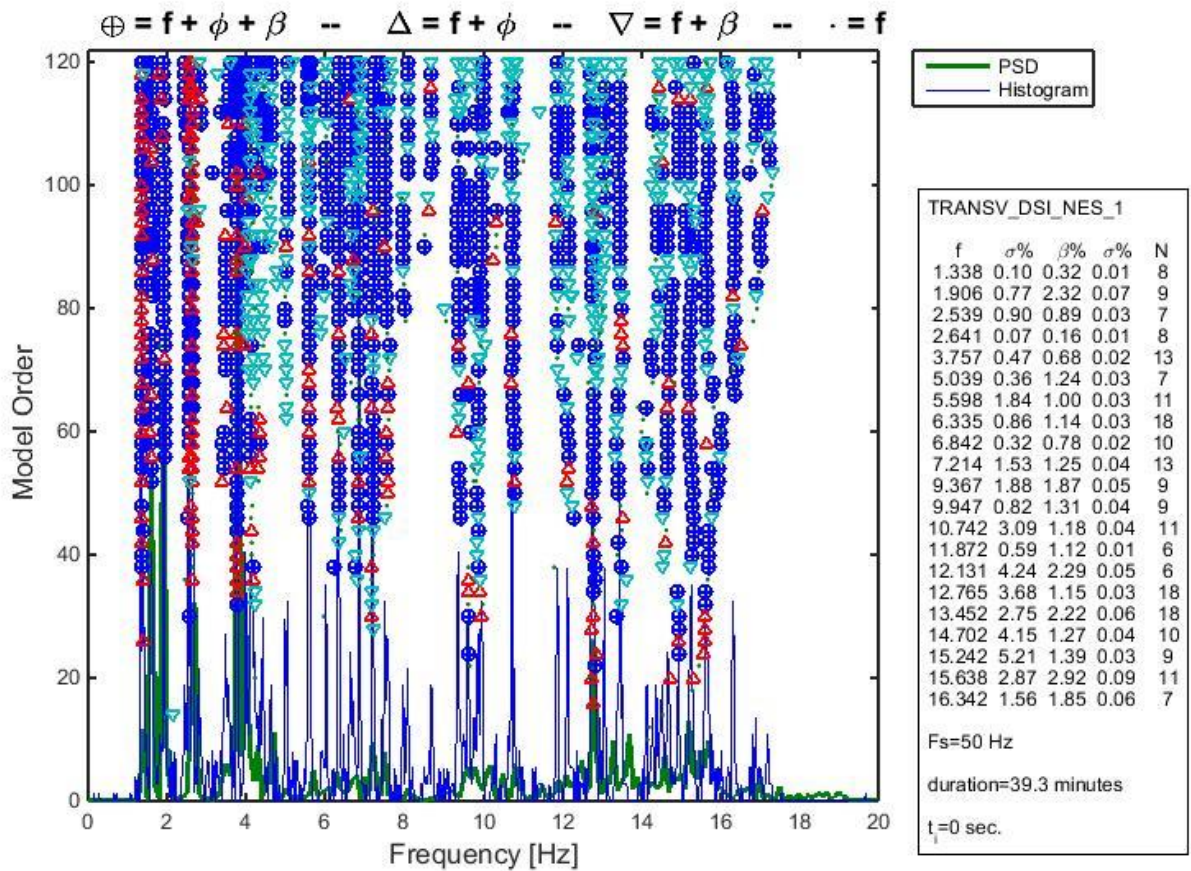


Figura 4.26. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método DSI, NES1

Del diagrama anterior se obtienen las frecuencias modales, presentadas en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES1 en dirección transversal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
1.338	0.747	0.32
1.906	0.525	2.32
2.539	0.394	0.89
2.641	0.379	0.16
3.757	0.266	0.68
5.598	0.179	1.00
6.335	0.158	1.14
7.214	0.139	1.25
10.742	0.093	1.18
12.765	0.078	1.15
15.242	0.066	1.39

En la Figura 4.27 se grafican las formas modales para las frecuencias de la tabla anterior.

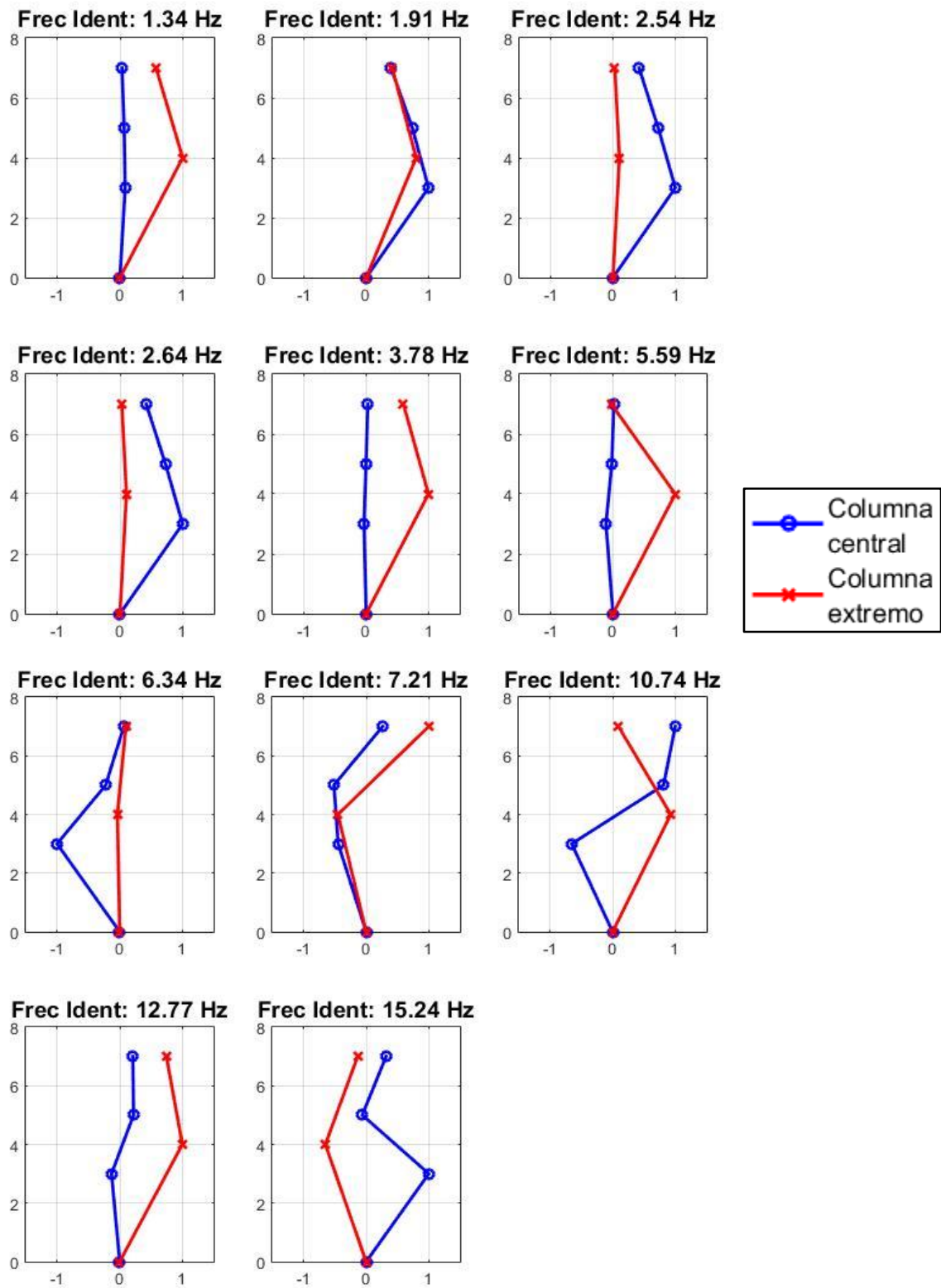


Figura 4.27. Formas modales según método DSI, sensores transversales NES1

La Figura 4.28 muestra el diagrama de estabilidad para la dirección transversal, obtenido a partir de los datos del registro NES2.

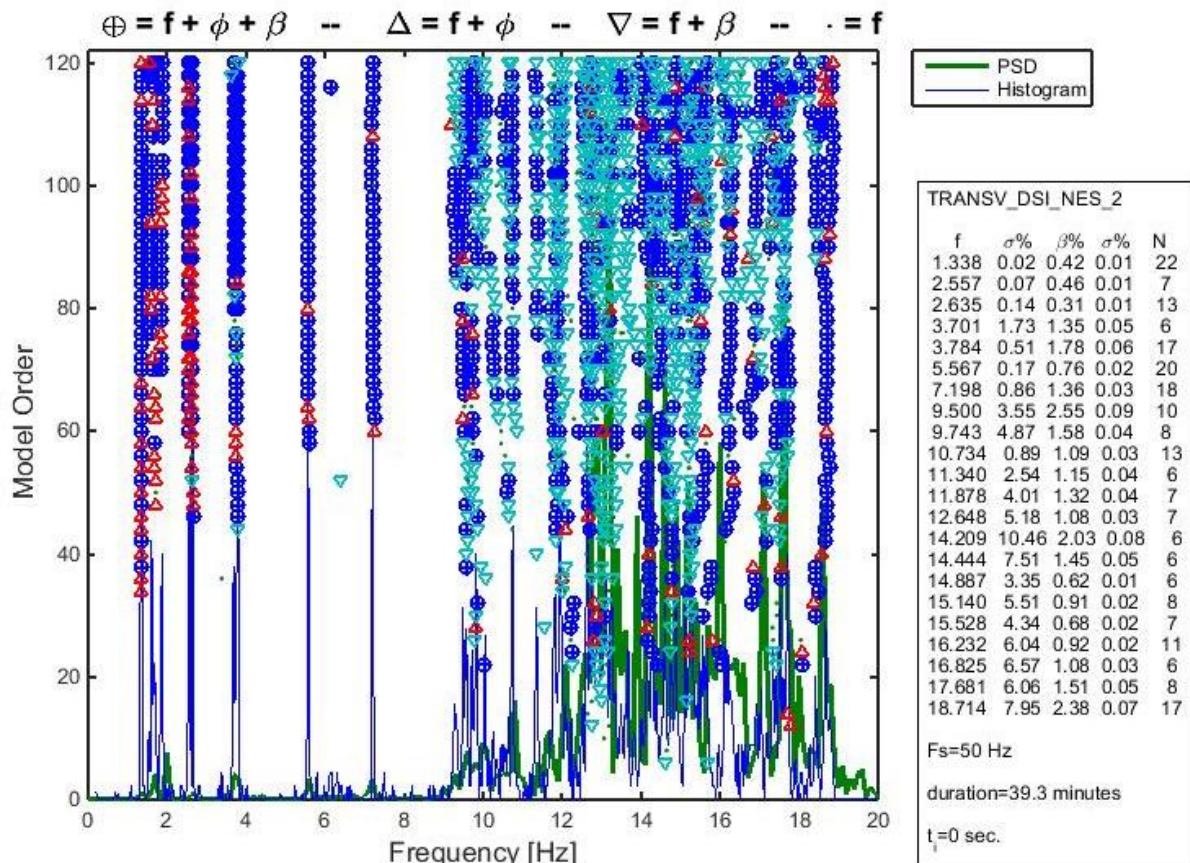


Figura 4.28. Diagrama de estabilidad transversal a partir del método DSI, NES2

Del diagrama de estabilidad se identifican frecuencias modales junto a sus períodos y amortiguamientos:

Tabla 4.10. Frecuencias, períodos y razones de amortiguamiento identificadas mediante el método DSI para el registro NES2 en dirección transversal

Frecuencia [Hz]	Período [s]	Amortiguamiento [%]
1.338	0.747	0.42
2.557	0.391	0.46
2.635	0.380	0.31
3.784	0.264	1.78
5.567	0.180	0.76
7.198	0.139	1.36
10.734	0.093	1.09
12.648	0.079	1.08
15.140	0.066	0.91

En la Figura 4.29 se grafican las formas modales para las frecuencias identificadas.

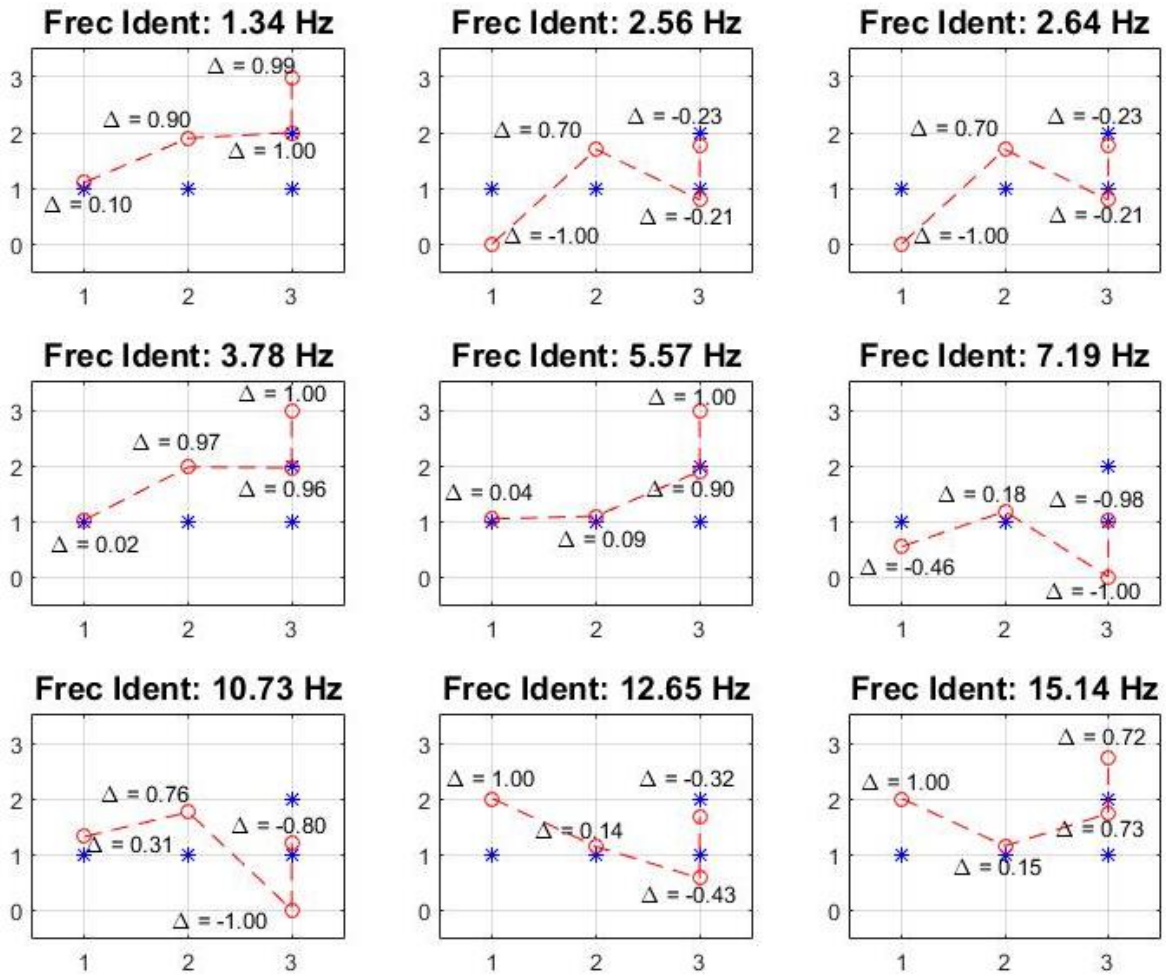


Figura 4.29. Formas modales según método DSI, sensores transversales NES2

4.4.3. Modos torsionales

Dadas las frecuencias identificadas, se puede asumir que aquellas que se encuentran tanto en dirección longitudinal como transversal corresponden a modos torsionales de la estructura. En la Figura 4.30 se grafica para el caso del registro NES2, debido a que la posición de los sensores permite una mejor comprensión de la torsión del rack.

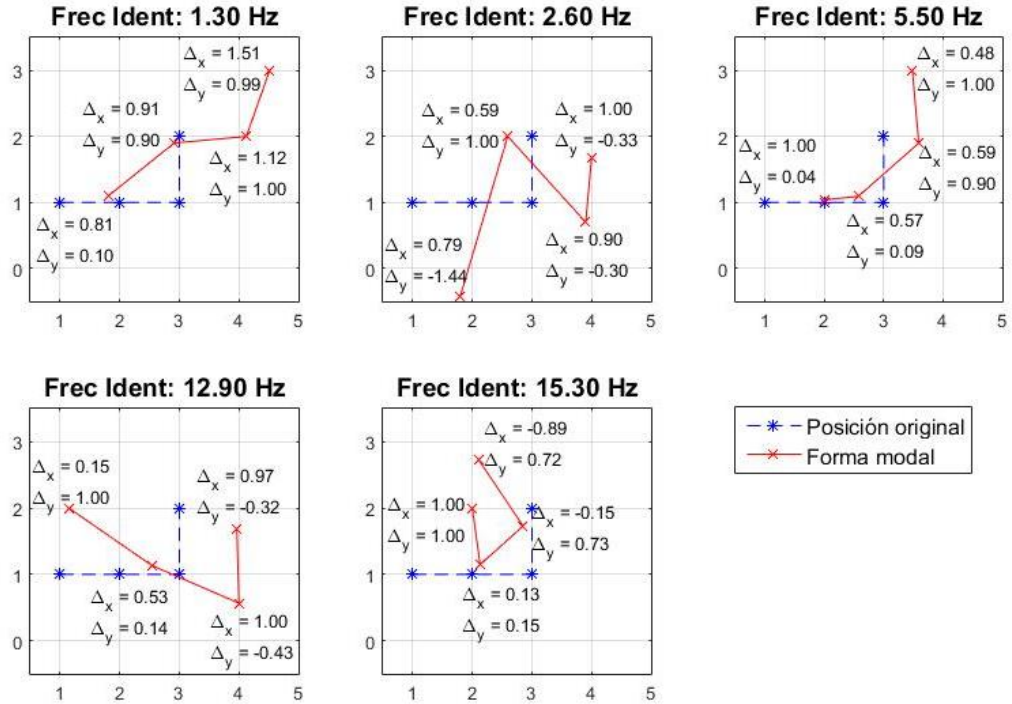


Figura 4.30. Formas modales torsionales según método DSI, NES2

4.5. CMIF (Complex Mode Indicator Function)

4.5.1. Dirección Longitudinal

Se grafican los valores singulares obtenidos con este método de identificación, en la dirección longitudinal para ambos registros.

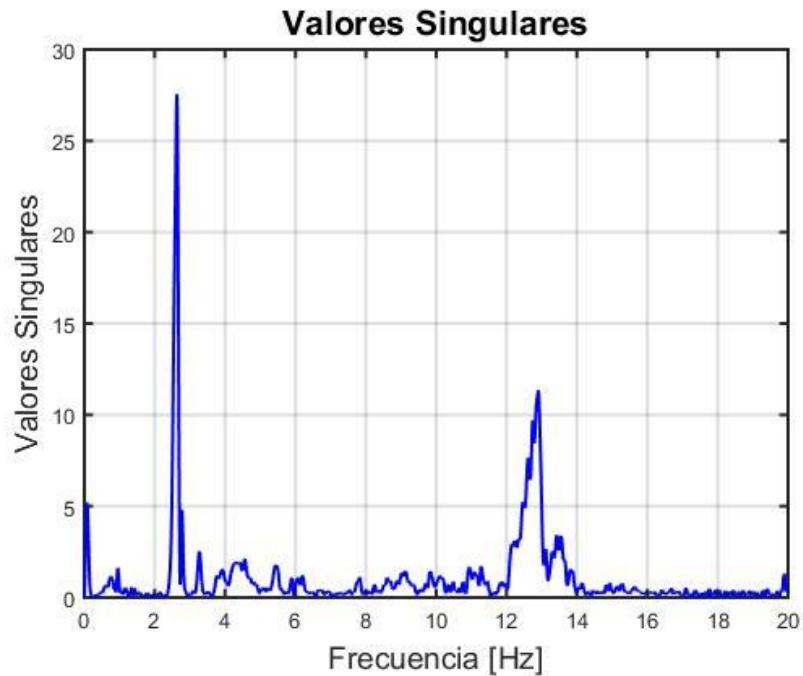


Figura 4.31. Valores singulares según método CMIF, sensores longitudinales NES1

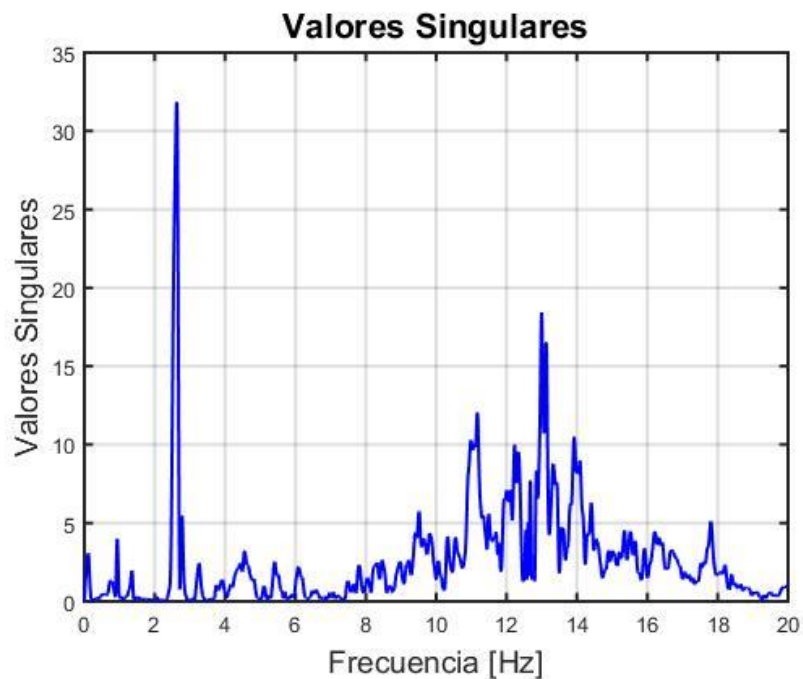


Figura 4.32. Valores singulares según método CMIF, sensores longitudinales NES2.

Las frecuencias identificadas se presentan en la Tabla 4.11:

Tabla 4.11. Frecuencias identificadas en dirección longitudinal, según método CMIF

NES1	NES2
f [Hz]	f [Hz]
0.95	0.94
2.63	1.35
5.45	2.63
6.20	5.41
7.82	6.09
8.61	7.81
10.95	13.00
12.90	15.35
15.28	

4.5.2. Dirección Transversal

Las Figuras Figura 4.33 y Figura 4.34 presentan los valores singulares en dirección transversal, para el primer y segundo registro respectivamente.

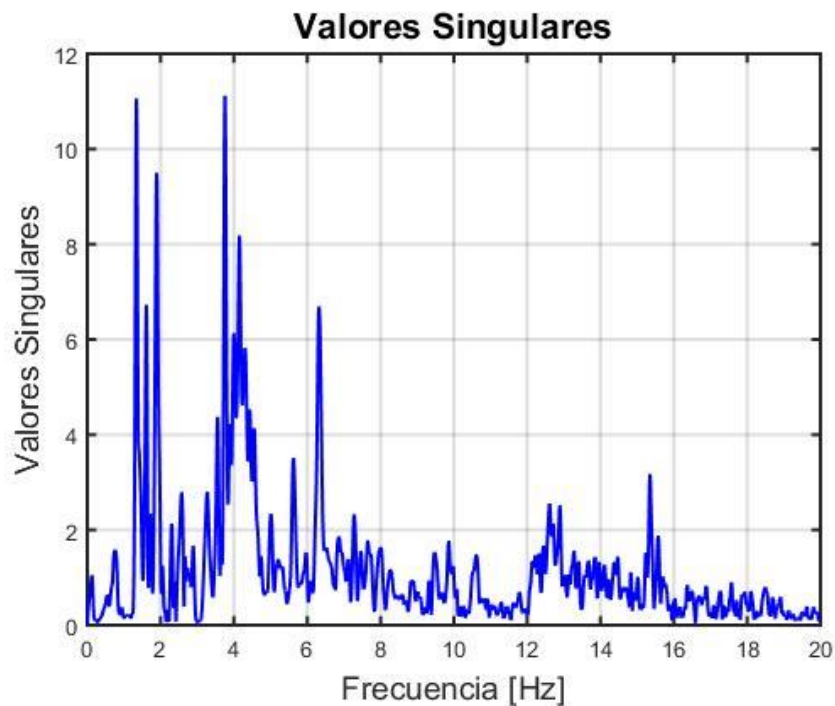


Figura 4.33. Valores singulares según método CMIF, sensores transversales NES1

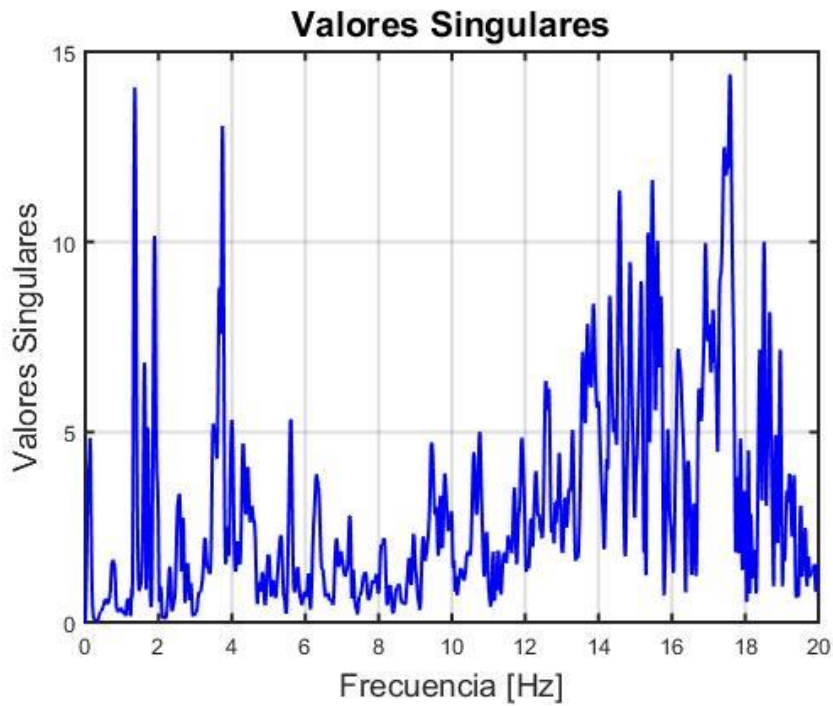


Figura 4.34. Valores singulares según método CMIF, sensores transversales NES2

Las frecuencias identificadas se presentan en la Tabla 4.12

Tabla 4.12. Frecuencias identificadas en dirección transversal, según método CMIF

NES1 f [Hz]	NES2 f [Hz]
1.34	1.35
1.61	1.62
1.89	1.89
2.57	2.57
3.76	3.74
5.62	5.61
6.32	6.30
7.28	7.22
10.61	10.76
12.89	12.56
15.35	15.47

4.6. Resumen de Identificación

Considerando la gran cantidad de frecuencias identificadas por cada método, se presentan las Tablas Tabla 4.13 y Tabla 4.14, que sintetizan los resultados para cada uno de ellos. A partir de esto, es posible suponer qué frecuencias corresponden a los modos de la estructura, al repetirse según dirección y método de identificación.

Tabla 4.13. Resumen de frecuencias identificadas para los métodos PSD y SSI.

Frec. Ident. [Hz]	PSD				SSI			
	LONGITUDINAL		TRANSVERSAL		LONGITUDINAL		TRANSVERSAL	
	NES1	NES2	NES1	NES2	NES1	NES2	NES1	NES2
0.9	0.92	0.92			0.93	0.93		
1.3	1.34	1.33	1.34	1.33	1.33	1.34		1.34
1.6			1.56				1.59	1.65
1.9			1.85				1.91	
2.5					2.53	2.55	2.56	2.56
2.6	2.64	2.63	2.64	2.63	2.63	2.67	2.64	2.64
3.7			3.52	3.69			3.76	3.74
5.5					5.50	5.44	5.61	5.58
6.2								
7.2					7.11		7.23	7.24
7.7								
8.6	8.59				8.59			
10.7			10.71		10.82		10.74	10.79
12.9	12.95	12.96	12.67	12.73	12.94	12.93	12.75	12.69
15.3					15.22		15.24	15.32

Tabla 4.14. Resumen de frecuencias identificadas para los métodos DSI y CMIF.

Frec. Ident. [Hz]	DSI				CMIF			
	LONGITUDINAL		TRANSVERSAL		LONGITUDINAL		TRANSVERSAL	
	NES1	NES2	NES1	NES2	NES1	NES2	NES1	NES2
0.9	0.93	0.93			0.95	0.94		
1.3	1.33	1.34	1.34	1.34		1.35	1.34	1.35
1.6							1.61	1.62
1.9			1.91				1.89	1.89
2.5	2.54		2.54	2.56			2.57	
2.6	2.65	2.61	2.64	2.64	2.63	2.63		2.63
3.7	3.78		3.76	3.78			3.76	3.74
5.5	5.50	5.42	5.60	5.57	5.45	5.41	5.62	5.61
6.2	6.17	6.04	6.34		6.20	6.09	6.32	6.30
7.2			7.21	7.20				
7.7	7.68	7.66			7.82	7.81	7.82	7.81
8.6	8.59				8.61			
10.7	10.78		10.74	10.73	10.95		10.61	10.76
12.9	12.93	12.91	12.77	12.65	12.90	13.00	12.89	12.56
15.3	15.24	15.25	15.24	15.14	15.28	15.35	15.35	15.47

Se identifica la frecuencia y dirección de cada modo:

Tabla 4.15. Frecuencias modales y dirección del modo correspondiente

Modo	Frecuencia [Hz]	Dirección
1	0.92	Longitudinal
2	1.33	Torsional
3	1.6	Transversal
4	1.89	Transversal
5	2.5	Torsional
6	2.6	Torsional
7	3.7	Transversal
8	5.5	Torsional
9	6.2	Torsional
10	7.2	Transversal
11	7.7	Longitudinal
12	8.59	Longitudinal
13	10.7	Transversal
14	12.9	Torsional
15	15.3	Torsional

4.7. Caracterización del suelo

A partir de los datos recolectados por los sismómetros trominos se grafica el perfil de inversión para la velocidad de onda de corte V_s , mostrado en la Figura 4.35:

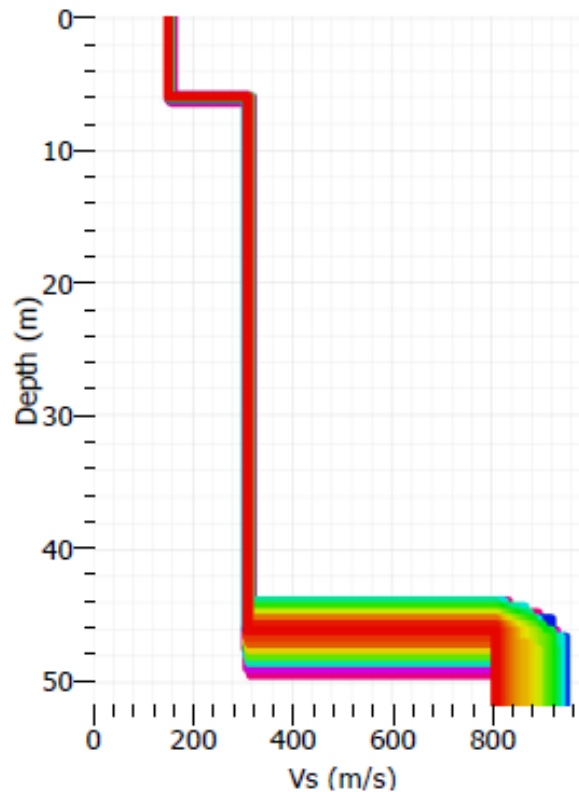


Figura 4.35. Perfil de inversión para velocidad de onda de corte V_s .

La norma NCh433 of.1996 define el valor de V_{s30} como

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}}$$

Donde:

V_{s-i} [m/s]: velocidad de ondas de corte en el estrato i .

h_i [m]: espesor del estrato i .

n : número de estratos en los 30 metros superiores del terreno.

Se tiene por lo tanto un valor de $V_{s30} = 232$ m/s.

La Figura 4.36 muestra la Tabla 4.2 de la NCh433 of. 1996 Mod2009, que clasifica el suelo según distintos criterios, entre ellos la velocidad de onda de corte.

Suelo Tipo		V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	(N_1) (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\varepsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compactidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Figura 4.36. Tabla 4.2 de NCh433 of. 1996: clasificación sísmica del terreno de fundación.

Según la figura anterior el suelo se clasificaría como tipo D, es decir Suelo medianamente denso o firme.

La Figura 4.37 muestra la relación H/V obtenida de la prospección geofísica:

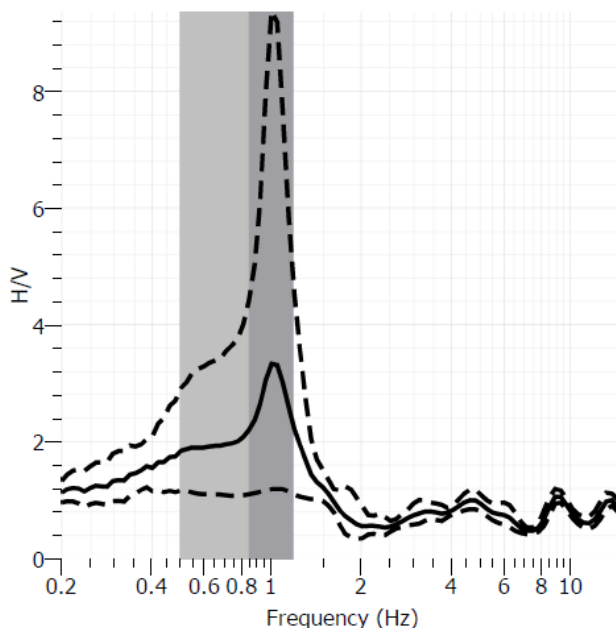


Figura 4.37. Relación espectral H/V.

A partir de la figura anterior se puede observar que la frecuencia predominante del suelo es de 1 [Hz], lo que se traduce en un período de 1[s].

Cabe mencionar que Verdugo y Pasten (2017) han sugerido una nueva clasificación de suelos para la NCh 433. Of1996 Modificada en 2012 toma en cuenta el V_{s30} y el periodo predominante según muestra la Figura 4.38. En este contexto, la estructura estudiada estaría sobre un suelo tipo E teniendo en cuenta que el periodo predominante supera 0,75 segundos (Figura 4.39). Cabe mencionar que la memoria utilizada para el diseño de las estanterías se consideró suelo **tipo C**.

Nueva Propuesta

Tipo de Suelo	V_{s30} [m/s]	Periodo predominante T [s]
A	>900	Plano ó < 0.15
B	500 – 900	Plano ó < 0.30
C	350 – 500	Plano ó < 0.40
D	180 – 350	< 0.75
E	< 180	N/A

Si no satisface el período predominante, se degrada en un tipo de suelo

Figura 4.38. Propuesta de Clasificación de suelos según Verdugo y Pasten (2017).

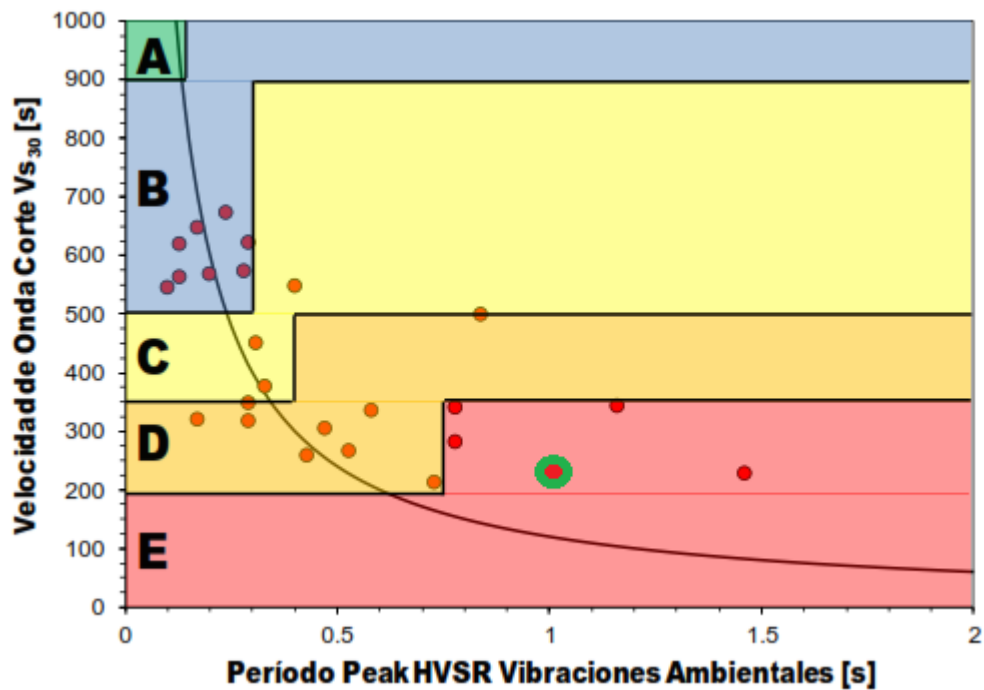


Figura 4.39. V_{s30} y período de estructura estudiada indican que se debiera clasificar como suelo tipo E. Verdugo y Pasten 2017.

Capítulo 5

Modelo estructural

En el presente capítulo se describe el modelo estructural creado en el software de elementos finitos SAP2000.

5.1. Descripción del modelo de elementos finitos

Se crea un modelo en el programa SAP2000, considerando las dimensiones y los perfiles mencionados en la sección 3.1 del presente documento.

Se agregan riostras horizontales con el fin de simular los pallets ubicados sobre las vigas, ya que éstos actúan de cierta forma como diafragmas en la estructura. La Figura 5.1 muestra el modelo estructural.

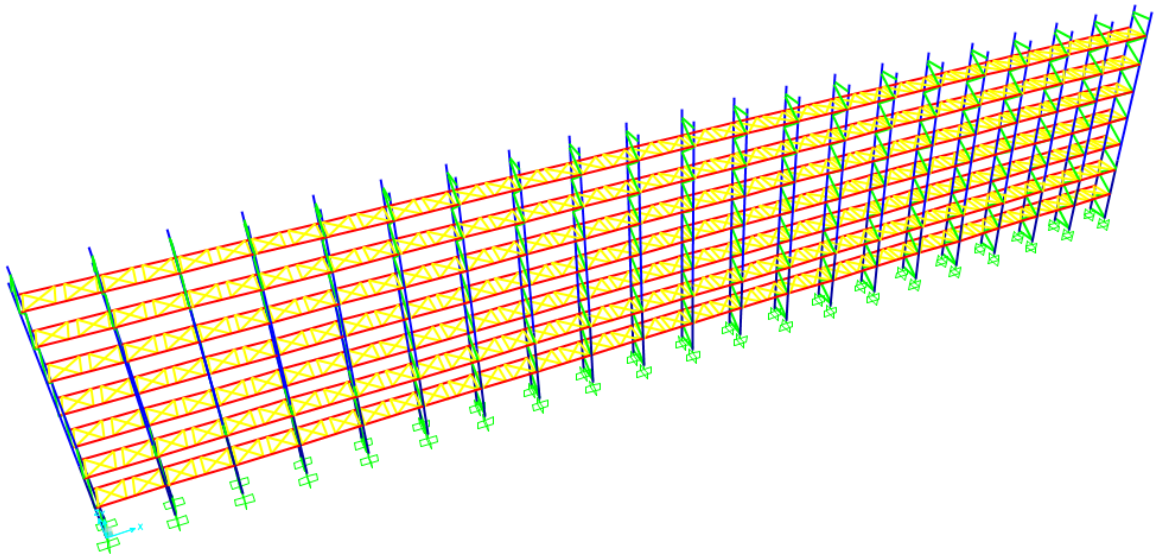


Figura 5.1. Modelo de elementos finitos en SAP2000.

La Figura 5.2 muestra en planta las riostras horizontales agregadas entre dos columnas del rack, que simulan los dos pallets que van posicionados en cada vano:

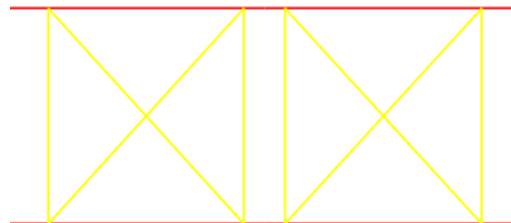


Figura 5.2. Riostras horizontales agregadas al modelo.

Los ejes locales en los elementos vigas y columnas son los siguientes:

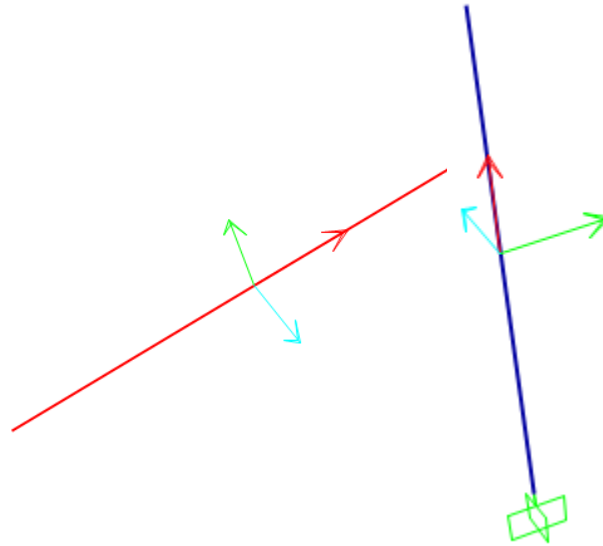


Figura 5.3. Ejes locales de vigas y columnas en modelo estructural. (1=rojo, 2=verde, 3=celeste)

5.2. Cargas aplicadas

Las cargas consideradas en el modelo fueron entregadas por el Centro de Distribución y corresponden al peso de los pallets en el momento del ensayo de microvibraciones. Se tiene una sobrecarga total sobre la estructura de aproximadamente 124 [tonf].

Para calcular la carga sobre cada viga se distribuye el peso del pallet en la mitad de las dos vigas que lo soportan, de la siguiente manera:

$$SC = \frac{Q[\text{kgf}] \cdot 1,2[\text{m}]}{2}$$

Las cargas por posición se encuentran en el Anexo D. A modo ilustrativo, la Figura 5.4 muestra el diagrama de las cargas aplicadas en las vigas del modelo:

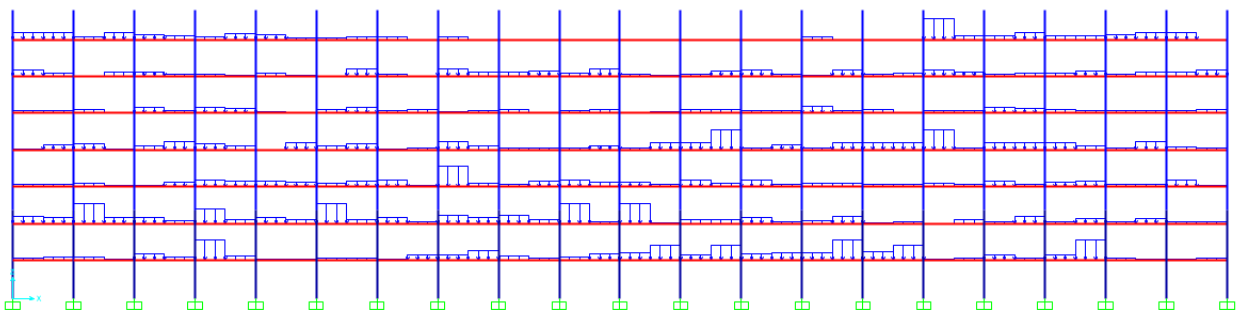


Figura 5.4. Cargas en vigas.

5.3. Rigidez de las conexiones y apoyos

Luego de variar sus valores para ajustarlo de mejor manera a los resultados experimentales, en el modelo se consideran los siguientes valores de rigideces de las conexiones y apoyos:

Tabla 5.1. Rigidez aplicada en modelo estructural para conexiones y apoyos.

	M22 [tonf m/rad]	M33 [tonf m/rad]
Viga -- Pilar simple	Continuo	100
Viga -- Pilar doble	Continuo	130
Columna - Base	13	32

5.4. Formas modales

Al correr el análisis modal en el programa se encuentran los siguientes períodos y frecuencias:

Tabla 5.2. Modos identificados en modelo estructural.

Modo	Período [s]	Frecuencia [Hz]
1	1.104	0.906
2	0.728	1.372
3	0.522	1.913

A continuación se presentan las formas modales obtenidas en el análisis del modelo para los primeros tres modos:

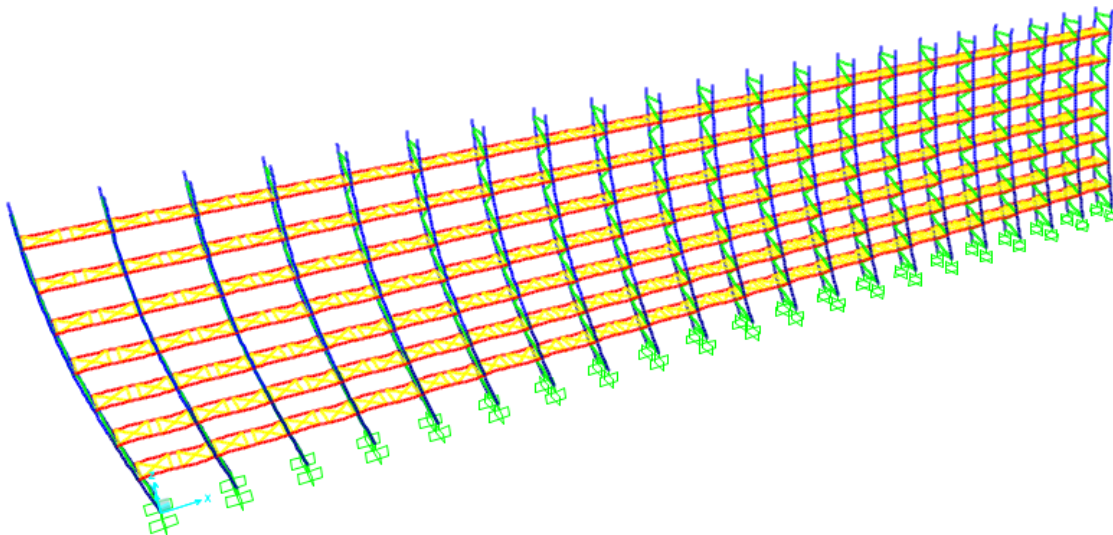
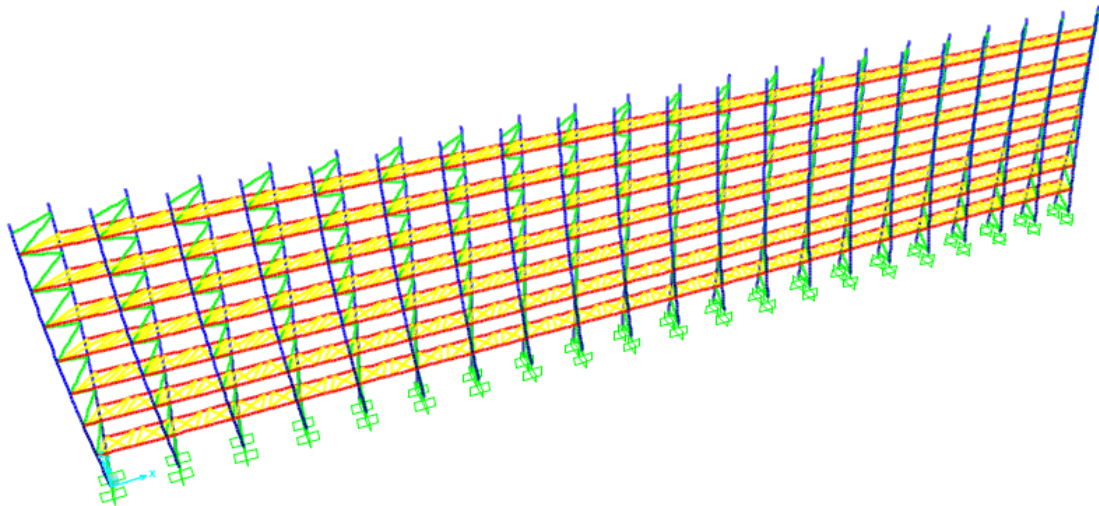
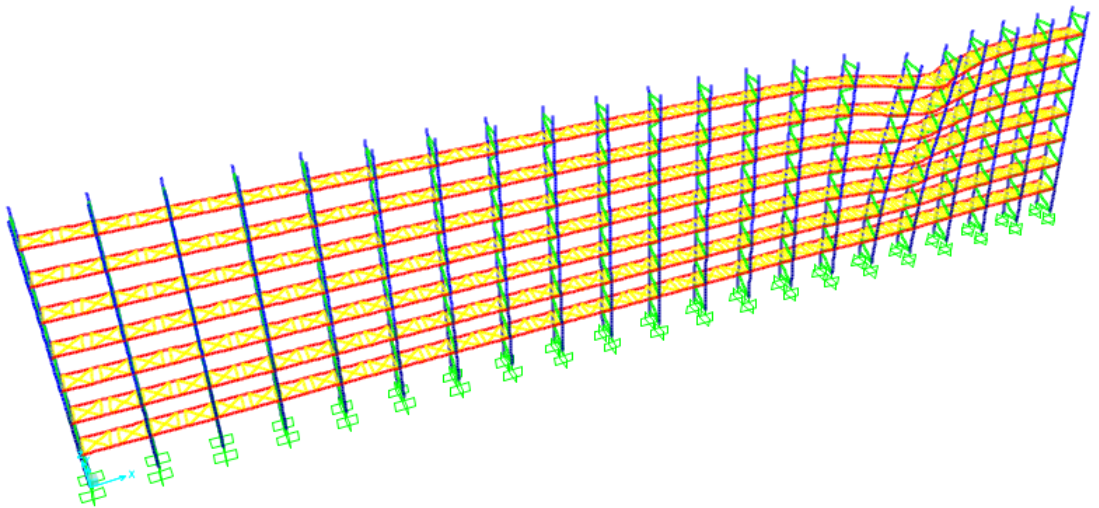


Figura 5.5. Modo 1: $f=0.91$ [Hz]

Figura 5.6. Modo 2: $f=1.37$ [Hz]Figura 5.7. Modo 3: $f=1.91$ [Hz]

5.5. Resultados al variar rigideces:

A modo de ejemplificar lo que sucede en el modelo al rigidizar la conexión viga – columna en la dirección del eje local 3 (ver Figura 5.3), se presentan los valores de períodos y frecuencias de los tres primeros modos al reducir la rigidez a la mitad de la presentada en la Tabla 5.1. Rigidez aplicada en modelo estructural para conexiones y apoyos.

Tabla 5.3. Períodos y frecuencias modales para distintas rigideces en el eje local 3 de las vigas.

M3 Viga pilar doble [kgf cm/rad]	M3 Viga pilar Simple [kgf cm/rad]	Modo	T [s]	f [Hz]
130	100	1	1.10	0.91
		2	0.73	1.37
		3	0.52	1.92
65	50	1	1.23	0.81
		2	0.76	1.31
		3	0.52	1.91

Capítulo 6

Comentarios y Conclusiones

Se concluye que el período fundamental de la estructura estudiada es igual a 1,08[s] en dirección longitudinal, en cambio el modo fundamental en dirección transversal está acoplado con efectos torsión e igual a 0,75 [s].

Por otra parte, la prospección geofísica dio como resultado un periodo predominante del suelo igual a 1[s]. En este contexto, es reconocido que en la zona norponiente de Santiago, donde se emplaza la estructura, se produce una alta amplificación sísmica en torno a las frecuencias fundamentales de los depósitos de suelo. De lo que se puede concluir que la estructura estudiada podría tener altas demandas sísmicas debido a que sus frecuencias fundamentales coinciden con las frecuencias fundamentales del suelo, generándose posiblemente el fenómeno de resonancia. Cabe mencionare que según la clasificación de suelos que sugiere Pasten y Verdugo (2017) se cumple con el hecho que la estructura estaría en un suelo tipo E y no en suelo tipo C (como la utilizada para su diseño), y por cuanto tendría una demanda sísmica mayor a la considerada en el diseño original.

En este contexto, se debe destacar que la estructura analizada es excepcional dado que se ubica en la zona norponiente de Santiago donde aún no existen edificios altos, por lo que el estudio de esta estructura podría ser relevante al estar emplazada en un suelo de alta amplificación sísmica y de un periodo similar al de la estructura generándose el efecto de resonancia. Al ser una estructura industrial es una estructura especial, dado que no existen registros de estanterías sujetas a sismos fuertes. En este contexto, sería interesante analizar la posibilidad de implementar un sistema de monitoreo permanente de la estructura dado que posibles registros serían de una alta contribución científica por ser una estructura especial y porque indirectamente permitiría analizar qué sucedería en estructuras altas (con un periodo similar) en la zona norponiente de Santiago.

El colapso de un rack con una sobrecarga del orden de 100 [tonf] en un centro de distribución donde hay decenas de estanterías con sobrecargas similares y características dinámicas parecidas aumentan la probabilidad de colapso de alguna de estas (la más débil), la cual podría desencadenar el colapso en cadena como se ha observado en distintos terremotos alrededor del mundo y en Chile. Esta falla debiera ser evitada no sólo por las pérdidas millonarias que significaría para la industria correspondiente, sino que también por las vidas humanas que corren peligro si el sismo ocurriera en horario de operación de la bodega o centro de distribución. Por otra parte, es reconocido que las estanterías pueden presentar diversos niveles de carga y distribución de masas durante su operación, lo cual hace que las estructuras sean susceptibles a torsión y a tener frecuencias que pueden alejarse o acercarse a las frecuencias fundamentales del suelo en cual se emplaza. Teniendo en cuenta que existen varias estanterías con diverso nivel de carga aumenta la probabilidad que alguna de estas entre en resonancia, dado que sus frecuencias pudiesen coincidir con las del suelo.

En cuanto al montaje experimental del rack estudiado se puede decir que fue suficiente para identificar las frecuencias fundamentales. Sin embargo, al realizar tan sólo dos mediciones con un número limitado de sensores se hace complejo realizar una identificación apropiada de las formas modales en el sentido transversal, teniendo en

cuenta que dada la baja rigidez transversal existen múltiples modos de frecuencias cercanas en el sentido transversal-torsional, por lo que se hace necesario emplear múltiples sensores para desagregar estos modos y tener una mejor visualización de estos. Cabe mencionar que este resultado fue observado en los datos experimentales y respaldado de las modelaciones realizadas en SAP2000, donde se observan múltiples modos transversales debido a la distribución heterogénea de la carga.

Los distintos métodos de identificación dieron resultados similares y consistentes; sin embargo, se concluye que el método del espectro de potencia (PSD) entrega una cantidad menor de frecuencias identificadas siendo el método SSI el método más robusto para identificar múltiples modos fundamentales de la estructura. En este contexto, se señala que la estructura estudiada presenta la complejidad de tener múltiples modos superiores en especial entre los 10 a 20 Hz. Esto se debe posiblemente a que la estructura posee varios modos transversales de frecuencias similares y debido a que las cargas apiladas sobre los pallets pudieron tener frecuencias en este rango contaminando los datos.

Algunos de los modos obtenidos en el modelo estructural en SAP2000 presentan deformaciones locales. Esto se asocia a la asimetría de las cargas, ya que existen zonas del rack que concentran más carga que otras, apareciendo de esta forma una serie de modos transversales-torsionales de la estructura.

Desafortunadamente, a la fecha no se ha podido calibrar en forma cabal un modelo en SAP2000 a las frecuencias y formas modales identificadas. En esa línea se señala que la modelación de la rigidez horizontal provista por los pallets es un factor fundamental para un ajuste adecuado. En esa línea, se puede señalar que un modelo que despreja este efecto posee un periodo del orden de 2 [s] el cual es bastante lejano y por cuanto no puede ser calibrado. La necesidad de incluir elementos que modelan la rigidez horizontal provista por los pallets se confirma dado que no se observaron modos de la estructura que tengan un comportamiento independiente de cada eje longitudinal de los racks (lo cual se observa cuando no se considera la modelación de los pallets), implicando la existencia de un diafragma horizontal flexible provisto por los pallets.

El hecho que los pallets trabajen como diafragmas horizontales flexibles hace que cambie significativamente el periodo de la estructura y en este caso produce que el periodo coincida con el del suelo. De igual forma incrementa posibles efectos de torsión debido a la heterogeneidad intrínseca (incluso aleatoria) de las cargas almacenadas en la estructura pudiendo ser un efecto contraproducente y por tanto debiera ser considerado en el diseño de racks.

Dentro de los parámetros del modelo en SAP2000 se observó que las rigideces de las conexiones viga-columna tanto en el eje fuerte como en el débil juegan un rol relevante para el comportamiento longitudinal y transversal de la estructura. De igual forma se observa que las rigideces de las columnas en la base son relevantes al momento de realizar un ajuste. Otros parámetros que se pudiesen emplear para el ajuste es la modificación del módulo de Young del acero (dentro de un rango aceptable) y la consideración de diversas rigideces en las uniones viga-columna para diversas posiciones.

En estudios posteriores se sugiere analizar la respuesta sísmica de la estantería estudiada considerando entradas sísmicas ad-hoc al suelo de fundación y al riesgo

sísmico de la zona de emplazamiento, para lo cual sería sugerido generar registros sintéticos para el emplazamiento. De igual forma, sería interesante realizar estudios que permitan predecir la resistencia de las uniones y de los elementos estructurales ya sea en forma experimental y/o a partir de modelos de elementos finitos detallados, de manera de estudiar su comportamiento histerético e inelástico para ser incluidos en modelaciones detalladas del tipo push-over o tiempo historia no-lineal.

Adicionalmente, otro aspecto interesante sería llevar a cabo modelaciones en modelos elementos finitos de las uniones viga-columna y del apoyo de las columnas en programas especializados como ANSYS. Estos resultados pudiesen ser corroborados a partir de ensayos cantiléver de carga monotónicas o cíclica. De igual forma, dadas las dimensiones de las estanterías sería plausible realizar ensayos a mediana escala tanto en mesas vibratorias o a partir de ensayos de cargas cíclicas de una porción de una estantería en las instalaciones de la FCFM.

Otro aspecto importante que no ha sido abordado en este estudio se refiere a la modelación de impactos que son frecuentes durante la operación, el análisis del deterioro de este tipo de estructuras a través del tiempo producto de factores ambientales como la corrosión o por factores propios de la operación. Observándose que las estanterías suelen tener arriostres pandeados, uniones deterioradas y el fallo de varios anclajes de las columnas debido a los frecuentes impactos que sufre cuando es cargada por los montacargas durante la operación.

Capítulo 7

Bibliografía

- RMI, *Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks*, vol. 2012. 2012.
- FEMA. (2005). *Seismic Considerations for Steel Storage Racks*. Building Seismic Safety Council of National Institute of Building Sciences, (September), 160.
- Kanyilmaz, A., Brambilla, G., Chiarelli, G. P., & Castiglioni, C. A. (2016). Assessment of the seismic behaviour of braced steel storage racking systems by means of full scale push over tests. *Thin-Walled Structures*, 107, 138–155. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.004>
- Instituto Nacional de Normalización – INN. Norma Chilena Oficial Nch433 of.1996, “Diseño Sísmico de Edificios”
- Hernández Prado, F. (2009). *Análisis de Métodos de Identificación de Variación de Propiedades Dinámicas*. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102194>
- Allemang, R. J., and D. L. Brown. "A complete review of the complex mode indicator function (CMIF) with applications." Proceedings, international conference on noise and vibration engineering (ISMA), Katholieke Universiteit Leuven, Belgium. Vol. 38. 2006.
- Núñez Acuña, T. (2009). *Variación Debido a Cambios de Masa y Rigidez de las Propiedades Dinámicas de una Estructura en Proceso Constructivo*. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102122>
- Patricio Andrés Lazcano Corvalán, “*Variación de los parámetros modales del edificio de la Cámara Chilena de la Construcción a partir de registros ambientales y sísmicos*”. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, Chile, 2008.
- Bernuzzi, C., & Simoncelli, M. (2016). *An advanced design procedure for the safe use of steel storage pallet racks in seismic zones*. *Thin-Walled Structures*, 109, 73–87. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.09.010>
- Bernuzzi, C., & Simoncelli, M. (2017). *Steel storage pallet racks in seismic zones: Advanced vs. standard design strategies*. *Thin-Walled Structures*, 116(April), 291–306. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.002>
- Castiglioni, C., Carydis, P., & Negro, P. (2009). *Seismic behaviour of steel storage racking systems*. Proceedings of the. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2325.5929>
- Insituto Chileno del Acero (2018). *Bases técnicas para el diseño estructural de estantería metálica en Chile*.

Anexos

Anexo A

A.1. Registros de aceleraciones para primer ensayo (NES1).

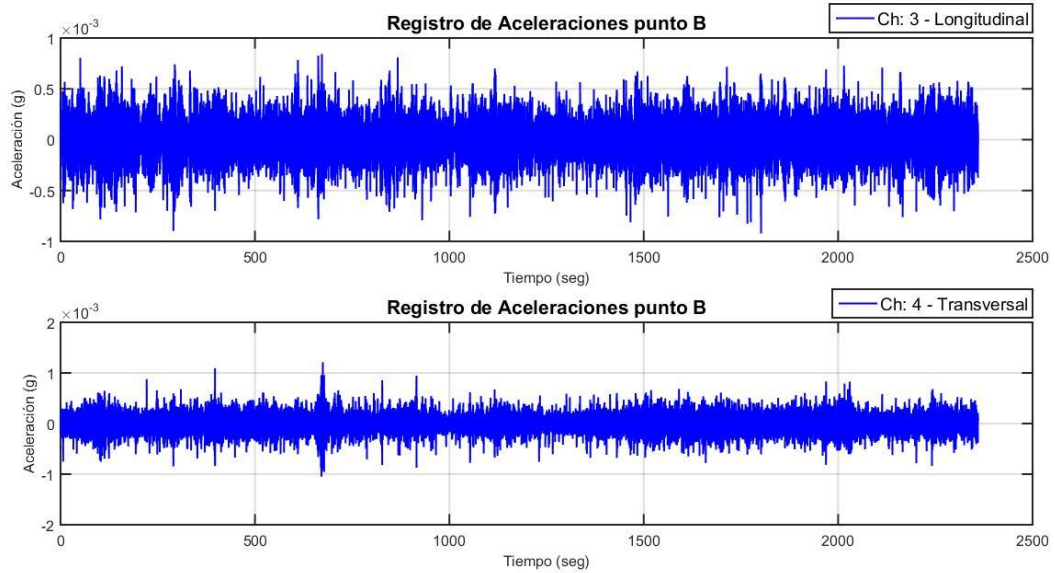


Figura A. 1. Registro punto B, NES1

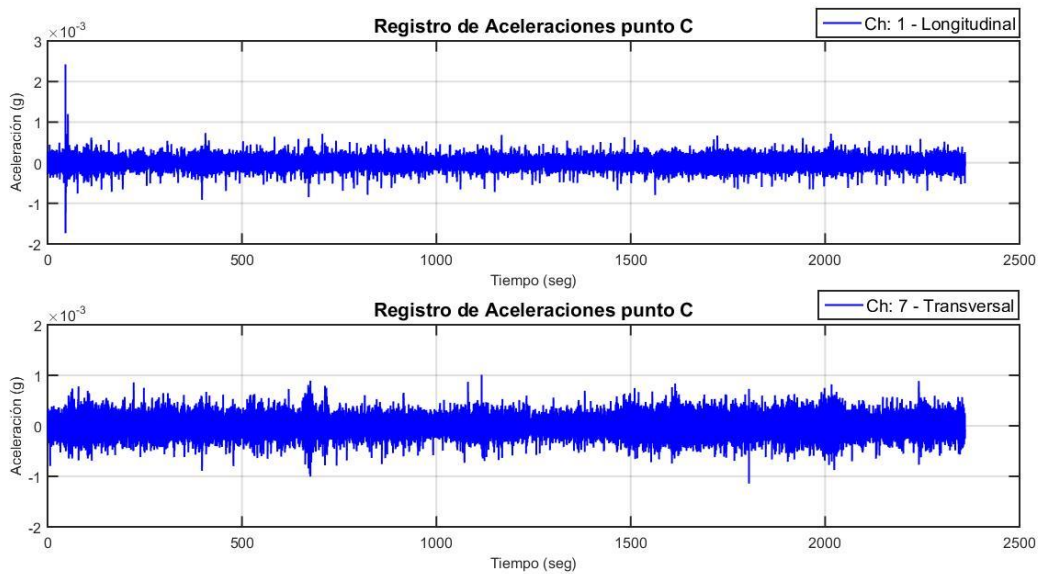


Figura A. 2. Registro punto C, NES1

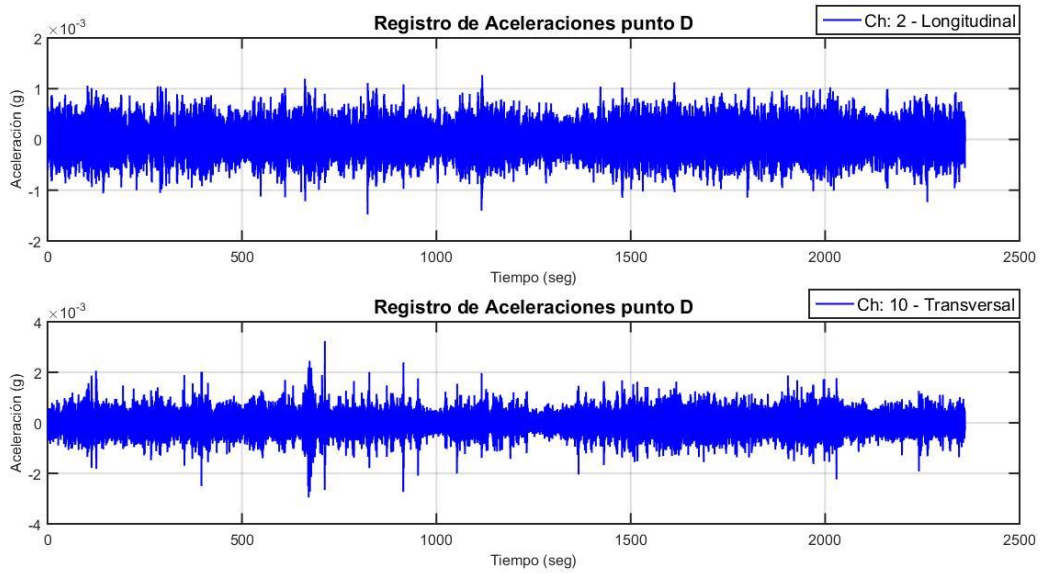


Figura A. 3. Registro punto D, NES1

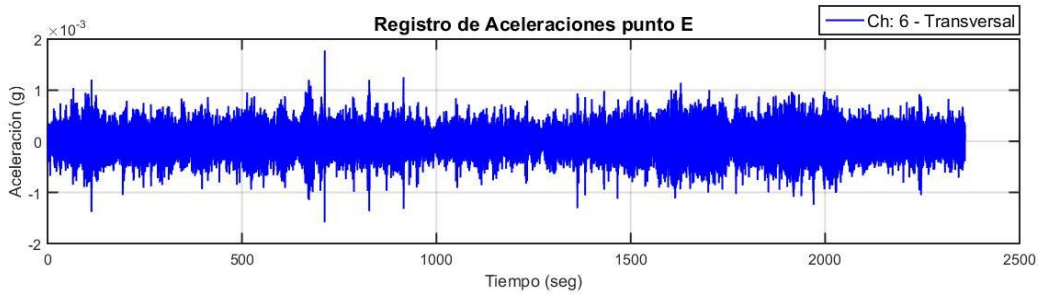


Figura A. 4. Registro punto E, NES1

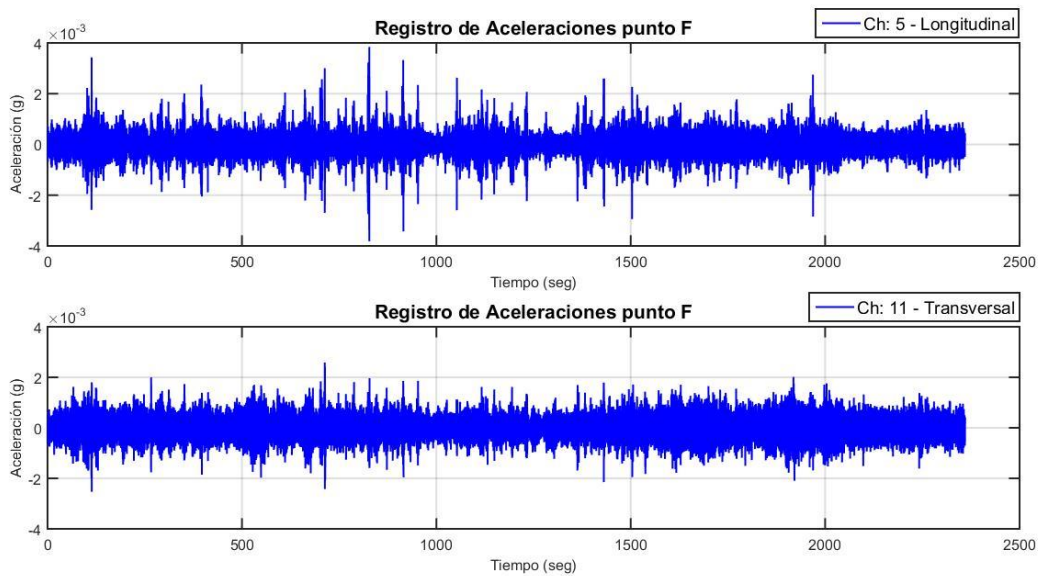


Figura A. 5. Registro punto F, NES1

A.2. Registros de aceleraciones para segundo ensayo (NES2).

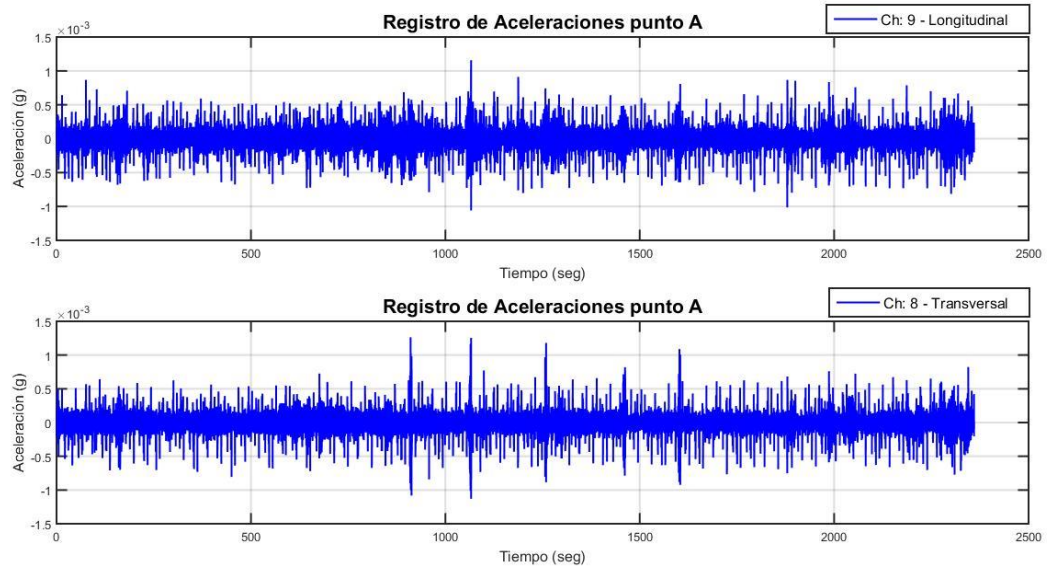


Figura A. 6. Registro punto A, NES2

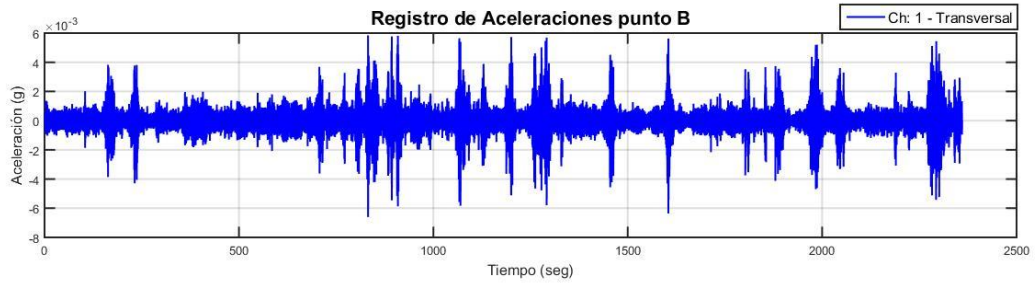


Figura A. 7. Registro punto B, NES2

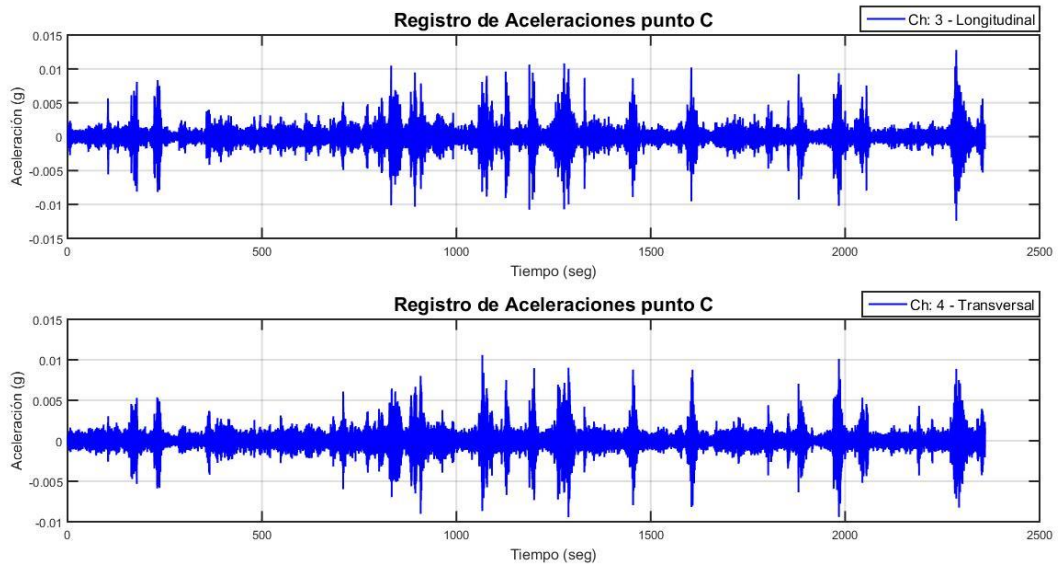


Figura A. 8. Registro punto C, NES2

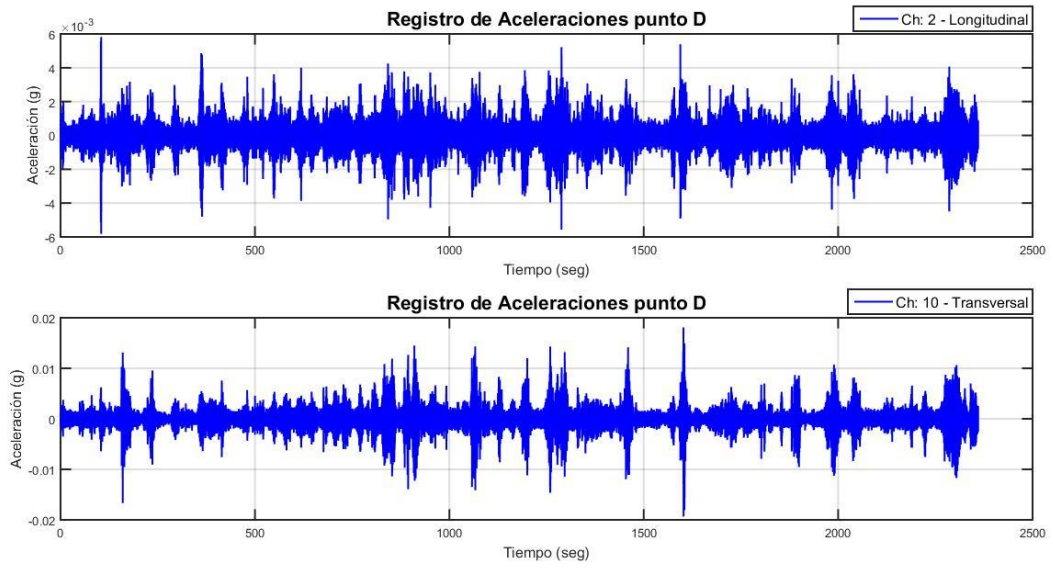


Figura A. 9. Registro punto D, NES2

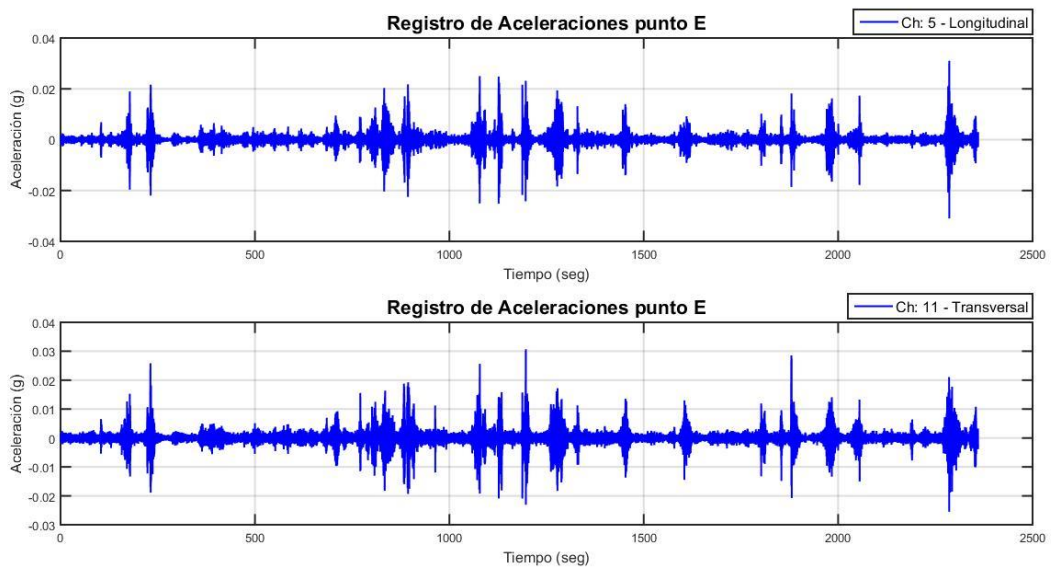


Figura A. 10. Registro punto E, NES2

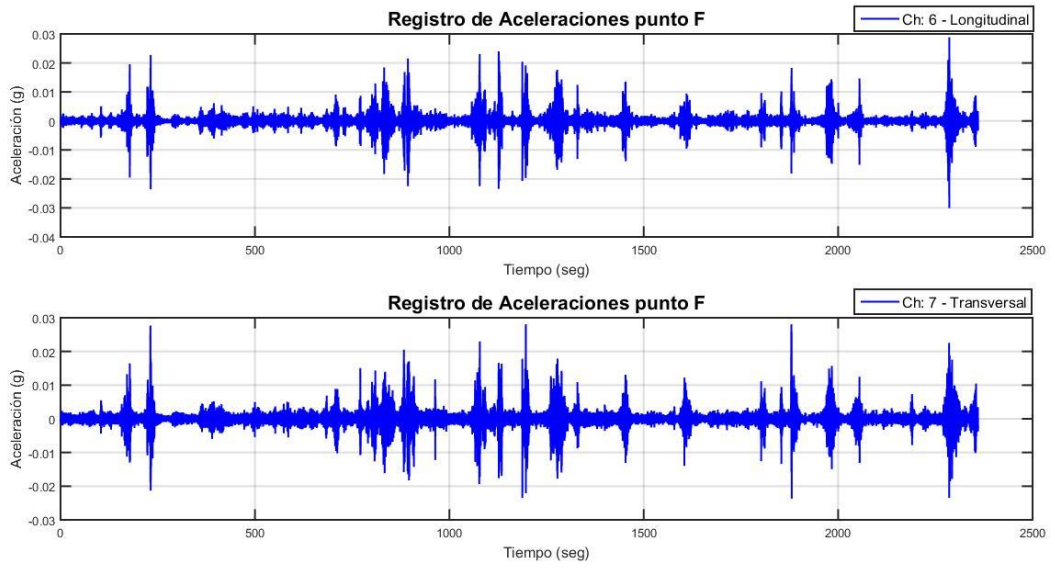


Figura A. 11. Registro punto F, NES2

Anexo B

B.1. Función de transferencia, desfase y coherencia a partir del método PSD, sensores longitudinales

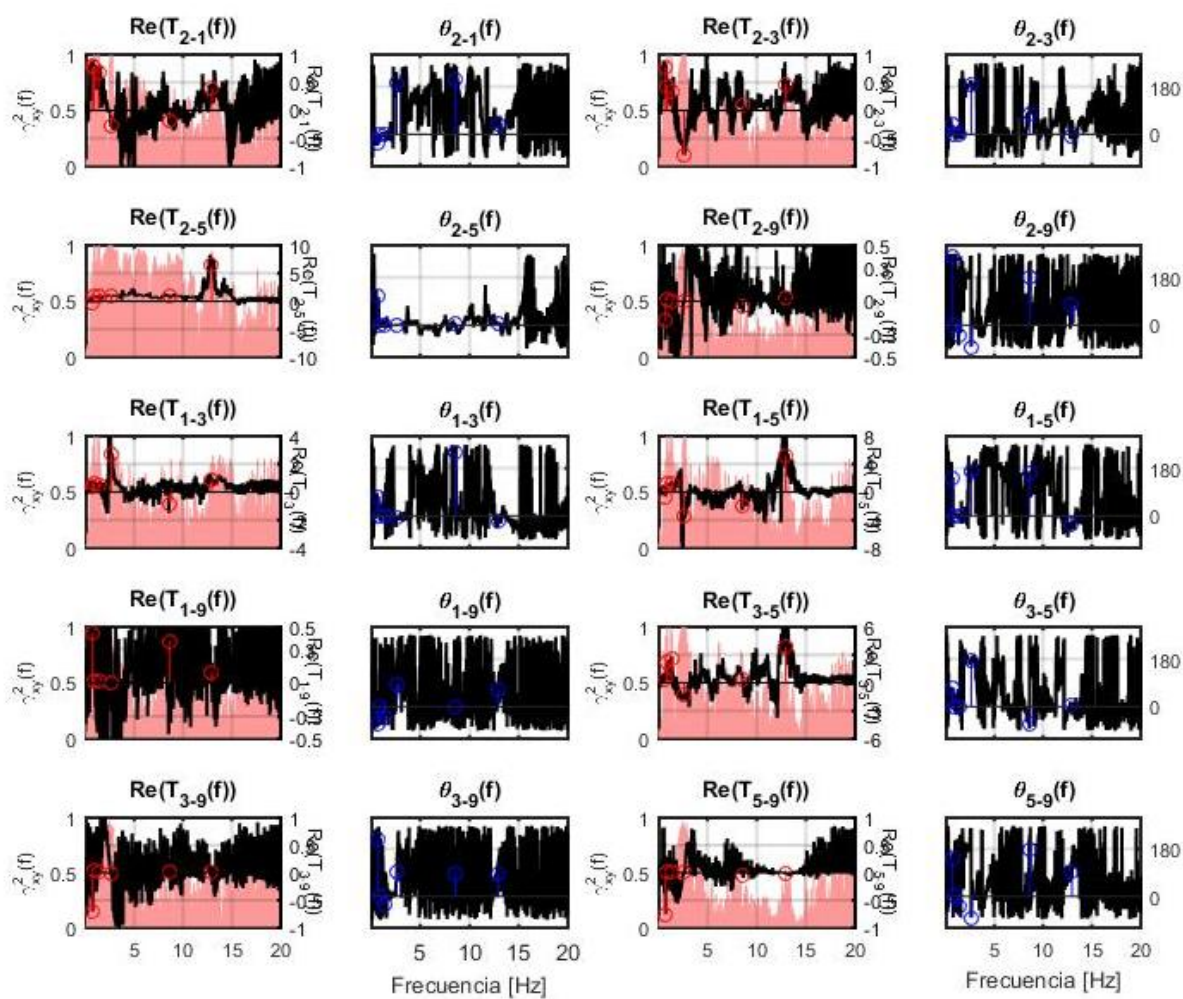


Figura B. 1. Función de transferencia, desfase y coherencia para sensores longitudinales, NES1

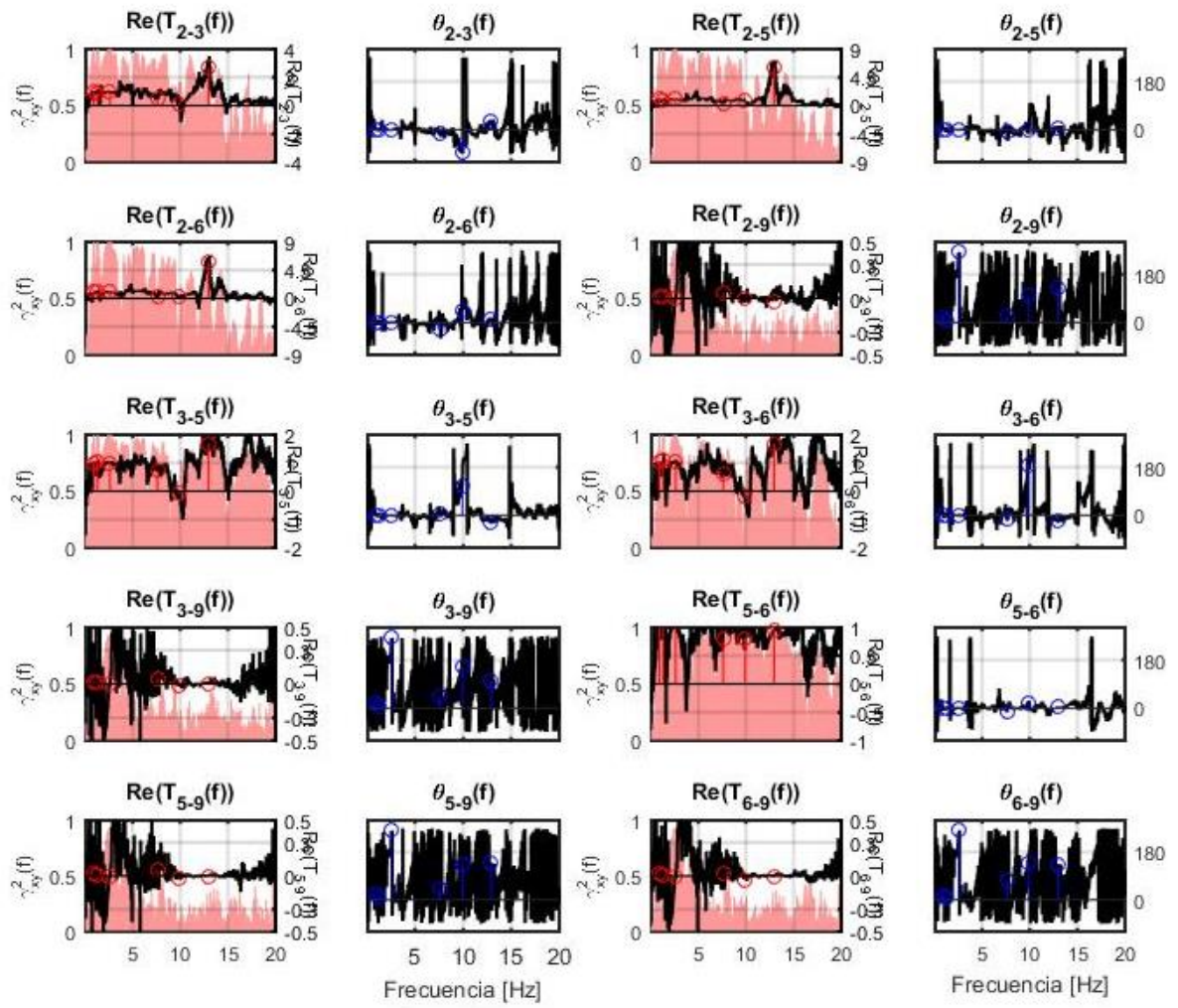


Figura B. 2 Función de transferencia, desfase y coherencia para sensores longitudinales, NES2

B.2. Función de transferencia, desfase y coherencia a partir del método PSD, sensores transversales.

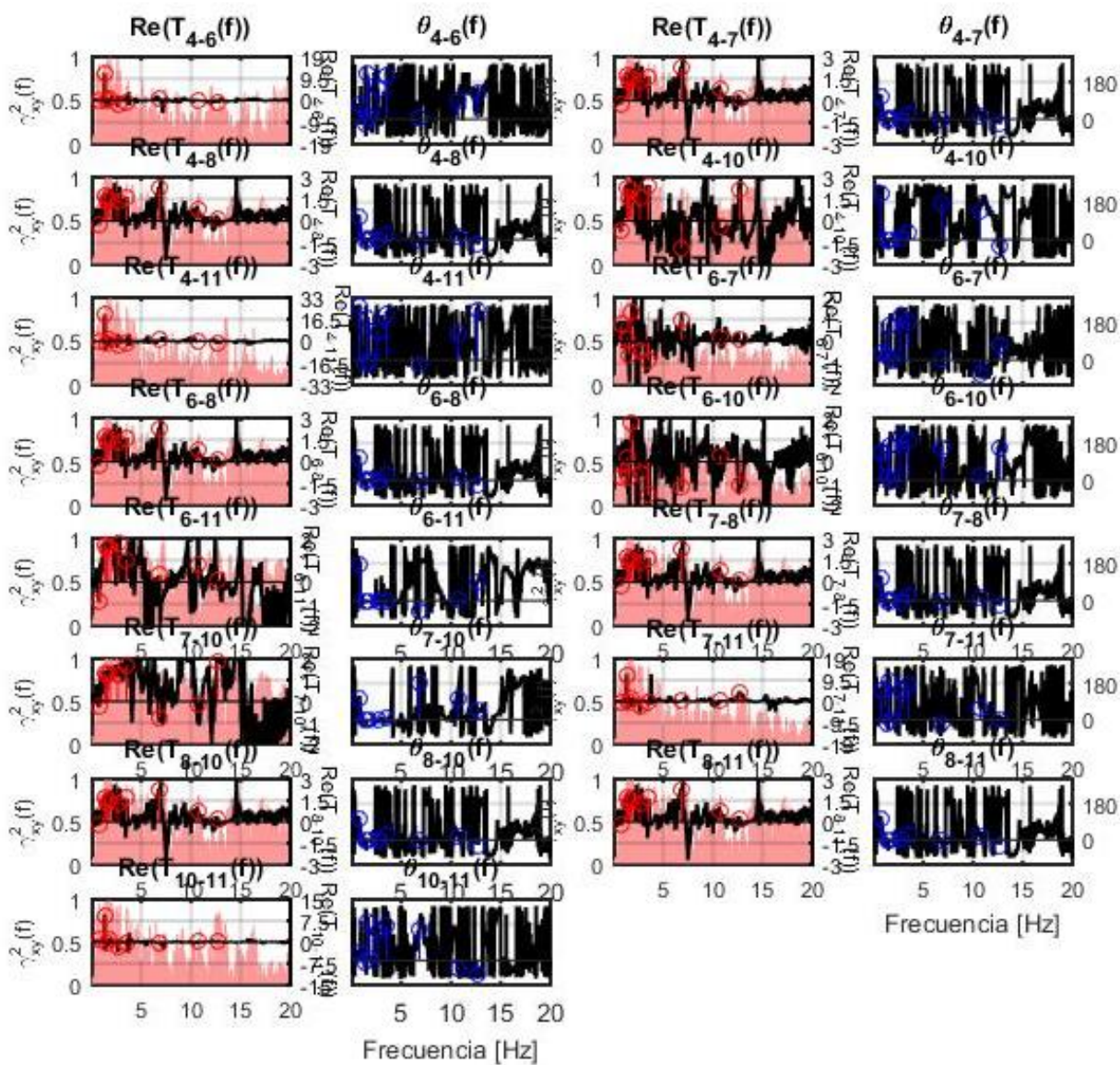


Figura B. 3. Función de transferencia, desfase y coherencia para sensores transversales, NES1

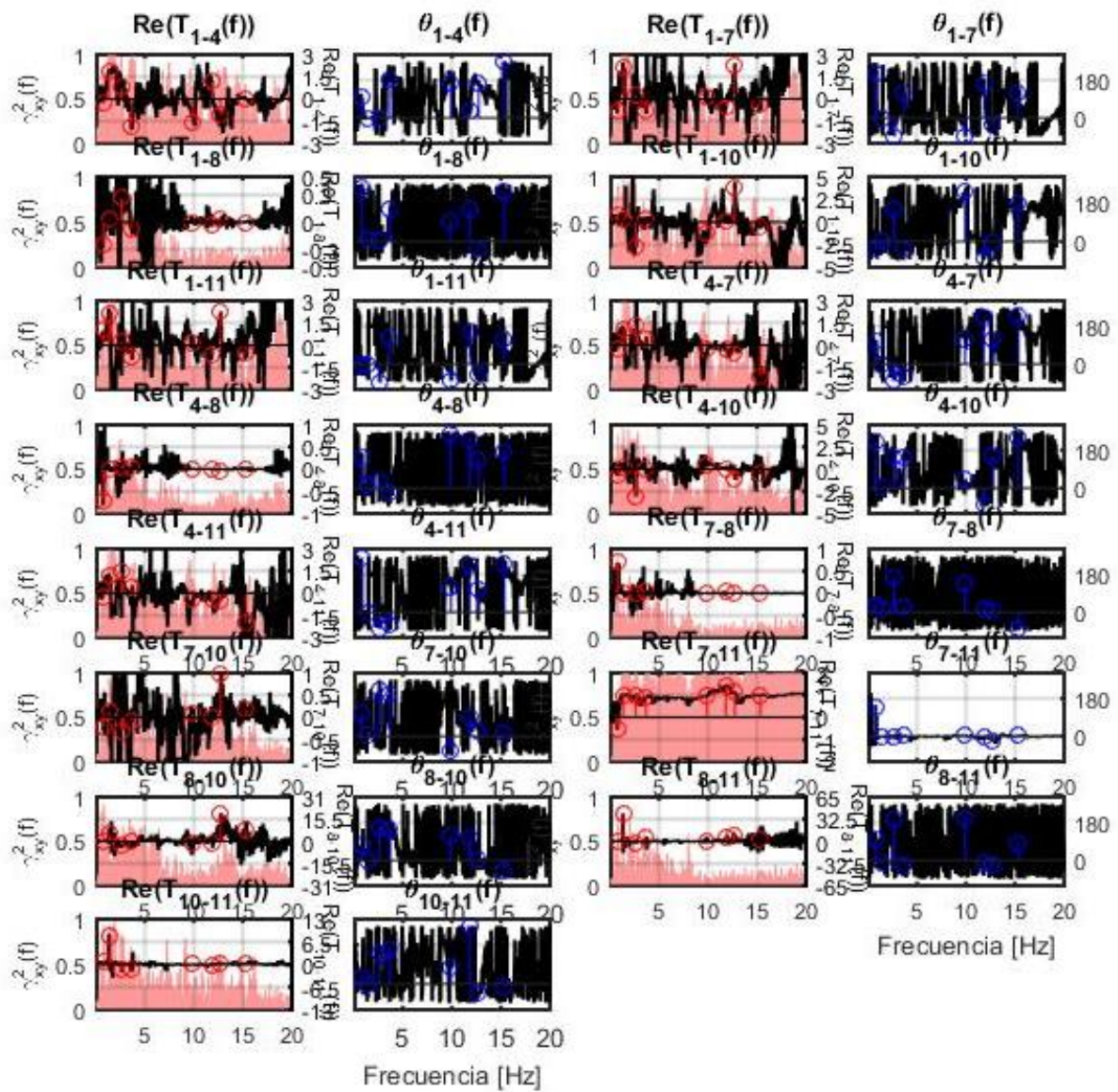


Figura B. 4. Función de transferencia, desfase y coherencia para sensores transversales, NES2

Anexo C

C.1 Formas modales normalizadas, método PSD

Tabla C. 1. Formas modales normalizadas según método PSD, sensores longitudinales NES1

Sensor	ϕ_1 f=0.76 Hz	ϕ_2 f=0.92 Hz	ϕ_3 f=1.34 Hz	ϕ_4 f=2.64 Hz	ϕ_5 f=8.59 Hz	ϕ_6 f=12.95 Hz
2	0.12556748	0.99333016	1.00000000	1.00000000	1.00000000	0.15624970
1	1.00000000	0.77802740	0.69064394	-0.28699990	-0.171105392	0.06429933
3	0.09808485	0.43980245	0.35148626	-0.79110452	0.07982482	0.07432482
5	-0.03339743	1.00000000	0.92601148	0.99324500	0.78010953	1.00000000
9	-0.02172450	0.01730437	0.00665451	0.00447144	-0.03879755	0.00464990

Tabla C. 2. Formas modales normalizadas según método PSD, sensores longitudinales NES2

Sensor	ϕ_1 f=0.92 Hz	ϕ_2 f=1.33 Hz	ϕ_3 f=2.63 Hz	ϕ_4 f=7.6 Hz	ϕ_5 f=12.94 Hz
2	0.98037699	1.00000000	0.97177506	1.00000000	0.16429390
3	0.98234387	0.88749298	0.95298392	0.50916612	0.43485842
5	0.98948275	0.94294888	0.96559414	0.36906262	1.00000000
6	1.00000000	0.97136819	1.00000000	0.24353353	0.94690281
9	0.01715302	0.01070608	-0.00429384	0.04409762	-0.00454436

Tabla C. 3. Formas modales normalizadas según método PSD, sensores transversales NES1

Sensor	ϕ_1 f=0.76 Hz	ϕ_2 f=1.34 Hz	ϕ_3 f=1.56 Hz	ϕ_4 f=1.85 Hz	ϕ_5 f=2.64 Hz	ϕ_6 f=3.52 Hz	ϕ_7 f=10.71 Hz	ϕ_8 f=12.67 Hz
4	1.00000	0.04830	0.62291	0.47215	0.28539	0.41925	1.00000	0.46112
6	0.33649	0.58147	0.16700	0.55131	-0.58973	-0.31180	-0.00366	-0.37095
7	0.24585	0.08558	0.81688	0.75269	0.38420	0.69690	0.76896	0.08184
10	0.71885	0.11007	1.00000	1.00000	0.44883	1.00000	-0.44836	1.00000
11	0.25656	1.00000	0.52644	0.90471	-1.00000	-0.40176	-0.22233	-0.57506

Tabla C. 4. Formas modales normalizadas según método PSD, sensores transversales NES2

Sensor	ϕ_1 f=0.76 Hz	ϕ_2 f=1.33 Hz	ϕ_3 f=2.63 Hz	ϕ_4 f=3.69 Hz	ϕ_5 f=12.73 Hz	ϕ_6 f=15.35 Hz
1	0.998162	0.458970	0.358058	0.537404	0.269510	1.000000
4	-0.217350	0.880233	0.269259	-1.000000	-0.288568	-0.046983
7	-0.784947	0.993345	0.086496	-0.427599	0.622152	-0.465132
8	-0.251678	0.010323	0.095638	-0.039081	0.009685	-0.003457
10	0.817871	0.116470	-1.000000	0.119456	1.000000	-0.496801
11	1.000000	1.000000	0.080356	-0.418560	0.614989	-0.520449

C.2. Formas modales normalizadas, método SSI

Tabla C. 5. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores longitudinales, NES1 (parte 1)

Sensor	ϕ_1 f=0.92 Hz	ϕ_2 f=1.33 Hz	ϕ_3 f=2.53 Hz	ϕ_4 f=2.64 Hz	ϕ_5 f=5.50 Hz
2	0.99312656	1.00000000	1.00000000	1.00000000	0.84028871
1	0.77689836	0.69762288	-0.01493137	-0.35442131	-0.38421358
3	0.43791401	0.35324652	-0.48268321	-0.90971761	0.06296606
5	1.00000000	0.95770981	0.99933937	0.99944019	1.00000000

Tabla C. 6. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores longitudinales, NES1 (parte 2)

Sensor	ϕ_6 f=7.20 Hz	ϕ_7 f=8.59 Hz	ϕ_8 f=10.77 Hz	ϕ_9 f=12.92 Hz	ϕ_{10} f=15.24 Hz
2	0.86534623	1.00000000	1.00000000	0.18510099	1.00000000
1	-1.00000000	-0.32687252	0.75508847	0.00845086	-0.47987650
3	0.50976306	0.16798637	-0.20521814	0.01461975	-0.17396883
5	0.76708370	0.95650032	-0.48872100	1.00000000	0.35601276

Tabla C. 7. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores longitudinales, NES2

Sensor	ϕ_1 f=0.93 Hz	ϕ_2 f=1.34 Hz	ϕ_3 f=2.55 Hz	ϕ_4 f=2.67 Hz	ϕ_5 f=5.44 Hz	ϕ_6 f=12.93 Hz
2	0.97844144	1.00000000	0.99128838	0.96800911	0.78842484	0.15136216
3	0.97863682	0.93273192	0.97950572	0.94011992	0.86791855	0.33642618
6	1.00000000	0.98334082	1.00000000	1.00000000	1.00000000	0.82855665
5	0.99156334	0.97245966	0.99290707	0.96359257	0.96102758	1.00000000

Tabla C. 8. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores transversales, NES1 (parte 1)

Sensor	ϕ_1 f=1.59 Hz	ϕ_2 f=1.91 Hz	ϕ_3 f=2.56 Hz	ϕ_4 f=2.64 Hz	ϕ_5 f=3.75 Hz
10	1.00000000	1.00000000	1.00000000	1.00000000	0.06506946
7	0.71299188	0.70913632	0.74865846	0.74865846	0.02635453
4	0.38105224	0.26551316	0.45785841	0.45785841	-0.02332634
11	-0.92093819	0.30059788	-0.02225194	-0.02225194	1.00000000
6	-0.52859201	0.34687460	-0.08741242	-0.08741242	0.67568430

Tabla C. 9. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores transversales, NES1 (parte 2)

Sensor	ϕ_6 f=5.61 Hz	ϕ_7 f=7.23 Hz	ϕ_8 f=10.74 Hz	ϕ_9 f=12.75 Hz	ϕ_{10} f=15.24 Hz
10	0.17151866	0.10844206	0.47662298	0.03409831	1.00000000
7	0.00627257	-0.12623045	0.13892327	-0.16735629	-0.01217945
4	-0.03058983	-0.16327591	0.08313682	-0.00325542	0.23865925
11	-1.00000000	-0.80919629	1.00000000	1.00000000	-0.84501970
6	-0.03100356	1.00000000	-0.07440532	-0.69602237	-0.20810453

Tabla C. 10. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores transversales, NES2 (parte 1)

Sensor	ϕ_1 f=1.34 Hz	ϕ_2 f=1.65 Hz	ϕ_3 f=2.56 Hz	ϕ_4 f=2.64 Hz	ϕ_5 f=3.74 Hz
10	0.09267941	0.51482686	1.00000000	1.00000000	0.14901279
4	0.87796259	0.66870138	-0.64470991	-0.64470991	-0.76079673
11	1.00000000	-1.00000000	0.15057985	0.15057985	-1.00000000
7	0.98997135	-0.98143089	0.15850350	0.15850350	-0.99598570
1	0.45612596	0.33748949	-0.59168446	-0.59168446	-0.02541351

Tabla C. 11. Formas modales normalizadas según método SSI para sensores transversales, NES2 (parte 2)

Sensor	ϕ_6 f=5.78 Hz	ϕ_7 f=7.24 Hz	ϕ_8 f=10.79 Hz	ϕ_9 f=12.69 Hz	ϕ_{10} f=15.32 Hz
10	0.01765571	0.05087188	1.00000000	1.00000000	1.00000000
4	0.03683287	-0.01421691	-0.17255966	0.12928363	0.04260333
11	-0.91629777	-0.90057090	0.73333782	0.22884591	0.72198295
7	-1.00000000	-1.00000000	0.62440312	0.39975640	0.71042242
1	-0.01317901	-0.09193627	0.38867443	0.02638102	-0.13325662

C.3. Formas modales normalizadas, método DSI

Tabla C. 12. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores longitudinales, NES1 (parte 1)

Sensor	ϕ_1 f=0.92 Hz	ϕ_2 f=1.33 Hz	ϕ_3 f=2.53 Hz	ϕ_4 f=2.64 Hz	ϕ_5 f=3.78 Hz	ϕ_6 f=5.50 Hz
2	0.98850699	1.00000000	0.99285506	0.99685012	0.09865905	0.89224551
1	0.76552811	0.68969565	-0.00070339	-0.31527973	-0.39787506	-0.39152159
3	0.43343122	0.34833060	-0.44119143	-0.83263010	0.12897390	0.07438982
5	1.00000000	0.95702206	1.00000000	1.00000000	-1.00000000	1.00000000

Tabla C. 13. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores longitudinales, NES1 (parte 2)

Sensor	ϕ_7 f=6.20 Hz	ϕ_8 f=7.70 Hz	ϕ_9 f=8.59 Hz	ϕ_{10} f=10.77 Hz	ϕ_{11} f=12.92 Hz	ϕ_{12} f=15.24 Hz
2	0.99129084	1.00000000	1.00000000	1.00000000	0.13431419	1.00000000
1	-0.31831937	-0.07617367	-0.34988189	-0.12972363	0.09689695	-0.72083705
3	0.39401654	-0.03243694	0.35552362	-0.03007023	0.08459914	-0.32573174
5	1.00000000	0.81088537	0.99445550	0.51763011	1.00000000	0.19367250

Tabla C. 14. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores longitudinales, NES2

Sensor	ϕ_1 f=0.92 Hz	ϕ_2 f=1.33 Hz	ϕ_3 f=2.64 Hz	ϕ_4 f=5.42 Hz	ϕ_5 f=12.91 Hz	ϕ_6 f=15.25 Hz
2	0.98075201	0.81312119	0.79326472	1.00000000	0.14791301	1.00000000
3	0.95227848	0.91420056	0.59474897	0.57021414	0.53314517	0.13097463
5	0.98608931	1.12407288	0.90273109	0.58977998	1.00000000	-0.14768700
6	1.00000000	1.51215987	1.00000000	0.48211571	0.96604067	-0.88699027

Tabla C. 15. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores transversales, NES1 (parte 1)

Sensor	ϕ_1 f=1.33 Hz	ϕ_2 f=1.89 Hz	ϕ_3 f=2.50 Hz	ϕ_4 f=2.64 Hz	ϕ_5 f=3.70 Hz	ϕ_6 f=5.59 Hz
4	0.03241458	0.39797591	0.41857938	0.41857938	0.02572122	0.01254353
6	0.57503116	0.41865687	0.02903388	0.02903388	0.59797033	-0.02568583
7	0.06599466	0.74123440	0.72529260	0.72529260	-0.00172982	-0.01858451
10	0.08210499	1.00000000	1.00000000	1.00000000	-0.03421467	-0.11234789
11	1.00000000	0.80228671	0.10350252	0.10350252	1.00000000	1.00000000

Tabla C. 16. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores transversales, NES1 (parte 2)

Sensor	ϕ_7 f=6.34 Hz	ϕ_8 f=7.21 Hz	ϕ_9 f=10.74 Hz	ϕ_{10} f=12.77 Hz	ϕ_{11} f=15.24 Hz
4	0.06594545	0.26303430	1.00000000	0.20942584	0.31860518
6	0.09935834	1.00000000	0.09325557	0.74602693	-0.13533513
7	-0.22334168	-0.51433683	0.81345723	0.22166825	-0.06184911
10	-1.00000000	-0.44642150	-0.65344262	-0.13013630	1.00000000
11	-0.03722430	-0.45109391	0.92880138	1.00000000	-0.65101432

Tabla C. 17. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores transversales, NES2 (parte 1)

Sensor	ϕ_1 f=1.33 Hz	ϕ_2 f=2.54 Hz	ϕ_3 f=2.64 Hz	ϕ_4 f=3.78 Hz	ϕ_5 f=5.57 Hz
4	0.89994731	0.69629390	0.69629390	0.97350782	0.09122006
7	0.98971688	-0.22923734	-0.22923734	1.00000000	1.00000000
10	0.10247471	-1.00000000	-1.00000000	0.02275133	0.03889950
11	1.00000000	-0.20904255	-0.20904255	0.96405028	0.89876933
1	0.45829801	0.66561099	0.66561099	-0.27579430	0.00327992

Tabla C. 18. Formas modales normalizadas según método DSI para sensores transversales, NES2 (parte 2)

Sensor	ϕ_6 f=7.20 Hz	ϕ_7 f=10.73 Hz	ϕ_8 f=12.65 Hz	ϕ_9 f=15.14 Hz
4	0.17510153	0.75629564	0.13780801	0.14785803
7	-0.98464771	-0.79646880	-0.32049334	0.72089746
10	-0.45707195	0.31479515	1.00000000	1.00000000
11	-1.00000000	-1.00000000	-0.43407879	0.72975087
1	-0.11400289	0.32790243	0.07106895	0.29428599

Anexo D
Cargas aplicadas en vigas del modelo estructural

Tabla D. 1. Cargas aplicadas en modelo estructural

Nicho	Nivel	Pallet Izquierdo	Pallet derecho
		Kgf/cm	Kgf/cm
1	1	1.09	1.30
	2	2.83	2.42
	3	0.92	1.18
	4	0.17	2.33
	5	1.05	1.21
	6	2.88	1.43
	7	2.80	2.80
2	1	1.31	0.55
	2	8.44	2.42
	3	1.46	0.40
	4	2.42	0.40
	5	1.70	0.00
	6	0.00	1.59
	7	1.40	2.80
3	1	2.70	1.43
	2	2.42	1.17
	3	0.71	1.86
	4	1.58	3.60
	5	2.23	0.94
	6	1.85	1.05
	7	2.24	1.56
4	1	8.44	1.66
	2	6.21	1.66
	3	2.74	2.42
	4	2.42	1.65
	5	2.33	1.85
	6	0.87	0.34
	7	1.13	2.45
5	1	0.40	0.58
	2	2.63	1.72
	3	2.23	1.92
	4	0.05	2.99
	5	0.84	0.40
	6	1.22	0.68
	7	2.24	0.57
6	1	1.05	0.83

	2	8.44	1.66
	3	1.46	2.42
	4	1.58	2.42
	5	1.32	2.42
	6	0.00	2.94
	7	0.57	1.13
	7	1	0.61
2		2.42	0.83
3		2.58	0.49
4		0.56	0.83
5		0.94	1.46
6		1.05	0.00
7		1.13	0.00
8	1	2.37	4.21
	2	3.31	2.42
	3	8.44	1.46
	4	3.60	1.50
	5	0.46	1.04
	6	3.31	1.59
	7	1.22	0.00
9	1	1.66	0.71
	2	3.36	1.66
	3	1.05	2.33
	4	0.84	0.83
	5	1.58	0.00
	6	1.66	2.23
	7	0.00	0.00
10	1	1.46	2.62
	2	8.43	0.71
	3	2.94	1.72
	4	0.83	1.85
	5	1.05	1.76
	6	1.58	2.94
	7	0.00	0.00
11	1	2.99	6.21
	2	8.43	0.30
	3	1.83	0.83
	4	0.98	2.98
	5	0.23	0.80
	6	0.83	0.44
	7	0.00	0.00
12	1	2.33	6.13
	2	1.46	1.54

	3	2.98	1.46
	4	2.99	8.44
	5	1.58	1.58
	6	0.87	2.33
	7	0.00	0.00
13	1	2.63	2.99
	2	2.42	0.87
	3	2.98	1.22
	4	0.83	2.33
	5	1.22	1.22
	6	2.88	1.05
	7	0.00	0.00
14	1	3.31	8.44
	2	0.97	2.98
	3	1.43	1.55
	4	0.87	2.99
	5	2.94	1.05
	6	0.42	2.58
	7	1.31	0.00
15	1	3.57	6.13
	2	0.12	0.61
	3	1.17	1.05
	4	2.99	2.99
	5	1.58	0.00
	6	1.05	1.58
	7	0.00	0.00
16	1	0.46	1.05
	2	0.00	1.58
	3	1.66	0.92
	4	8.43	0.87
	5	1.17	1.07
	6	2.58	1.80
	7	8.94	1.61
17	1	2.33	0.79
	2	0.92	2.98
	3	2.42	0.87
	4	2.99	3.25
	5	2.33	1.92
	6	0.83	1.18
	7	1.61	3.19
18	1	2.33	8.43
	2	0.61	1.95
	3	2.07	2.33

	4	2.99	1.66
	5	1.46	1.22
	6	1.29	2.33
	7	1.60	1.61
19	1	0.71	0.61
	2	0.71	2.23
	3	1.16	1.16
	4	0.98	3.31
	5	1.22	1.16
	6	0.83	1.70
	7	2.24	2.80
20	1	0.53	0.71
	2	0.61	0.61
	3	2.58	0.61
	4	1.43	0.61
	5	1.17	1.63
	6	1.70	2.62
	7	2.80	0.00