

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO
ESTRUCTURAL DEL PASO
PROCESIONAL DE JESÚS DEL GRAN
PODER DE SEVILLA**

AICIA - Grupo Estructuras

19 de diciembre de 2014



E.T.S. Ingeniería
Camino de los Descubrimientos s/n
41092, Sevilla (Spain)

Índice

1. Introducción: Antecedentes y objetivos.	5
2. Metodología: montaje experimental, alcance y variables de interés	6
2.1. Distribución y montaje de sensores	6
2.2. Sistema de medida	12
2.3. Variables empleadas para el análisis de la señal	13
2.3.1. Densidad espectral (PSD)	13
2.3.2. RMS	13
2.3.3. MAC	13
3. Ensayos	15
3.1. Visitas previas y prueba de funcionamiento	15
3.2. Realización de los ensayos	16
4. Identificación del sistema	19
5. Procesado previo de datos	21
5.1. Separación de señales	21
5.2. Medidas defectuosas	28
6. Resultados	33
6.1. Análisis levantadas: Máxima aceleración en uso	33
6.2. Análisis llamador	36
6.3. Análisis de la respuesta temporal de los distintos pasos	38
6.3.1. Paso Normal	38
6.3.2. Paso lento	40
6.3.3. Paso Agachado	42
6.3.4. Giro	44
6.3.5. Tramos completos	46
6.4. Análisis contenido en frecuencia de la señal de las bandas	47
6.5. Análisis de diagramas de estabilización	51
6.6. Identificación de modos y frecuencias para cada tipo de paso	54
6.6.1. Modos y frecuencias: Paso Normal	54
6.6.2. Modos y frecuencias: Paso Lento	58
6.6.3. Modos y frecuencias: Paso agachado	62
6.6.4. Modos y frecuencias: Giro	65
6.6.5. Modos y frecuencias: Tramos Completos	68
6.7. Análisis global de modos y frecuencias encontrados	71
6.8. Comparación de resultados obtenidos por SSI y EFDD	73
7. Conclusiones	78

1. Introducción: Antecedentes y objetivos.

El presente trabajo se enmarca dentro del proyecto PASO, llevado a cabo por el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico y financiado por la Hermandad de Jesús del Gran poder y por la Junta de Andalucía. El grupo de estructuras de AICIA participa en el proyecto por encargo del IAPH con el objetivo de analizar el comportamiento estructural del Paso Jesús del Gran Poder de Sevilla.

Este informe abarca la justificación y descripción del ensayo experimental y de los algoritmos empleados para la obtención de resultados, así como la presentación e interpretación de dichos resultados.

El objetivo de este estudio es caracterizar el comportamiento dinámico de la canastilla del Paso en condiciones normales de uso. El interés en estudiar el comportamiento de dicho elemento se debe a que, por una parte, es el de mayor valor del conjunto, y por otra, ha sido objeto de una restauración reciente.

Estudiar la canastilla de un modo directo implicaría la fijación de sensores sobre ella, algo que se descarta para resguardar la integridad del elemento. Pero, dado que la canastilla se encuentra unida al resto de la estructura del Paso, es factible estudiar su comportamiento de manera indirecta a través de los elementos estructurales a los que se une.

La caracterización dinámica se dirige a conocer cómo, y bajo que condiciones, se va a deformar la canastilla. Las magnitudes fundamentales a conocer para dicha caracterización serán los modos de vibración del sistema, y las frecuencias a las que estos modos ocurren. Esta información sirve para ubicar las zonas más desfavorables y ver a que frecuencias se producen las máximas deformadas, de modo que pueda prevenirse la aparición de potenciales desperfectos o explicarse la existencia de algunas grietas ya conocidas en la canastilla.

Además, se estudiarán de un modo independiente los efectos de las levantadas y los golpes de llamador en el sistema. Las levantadas constituyen un evento muy diferenciado durante el uso, ya que es el momento en el que se somete al sistema a una aceleración máxima. Se contrastarán los valores de dicha aceleración, y se obtendrán datos de interés como la fuerza máxima aportada por cada costalero en una levantada. Por otra parte, se estudiarán las posibles consecuencias de los golpes del llamador sobre el sistema desde un punto de vista cualitativo. Se analizarán la afectación de zonas según la distancia al llamador, y se contrastará con las deformadas obtenidas con el fin de hallar posibles indicadores de que los impactos puedan estar debilitando algún elemento estructural.

El ensayo experimental consiste en una lectura de datos mediante sensores de aceleración y deformación en condiciones de uso del Paso. Al no ser posible realizar la toma de datos en tiempo real durante la celebración de la procesión debido a la incompatibilidad del ensayo con la ceremonia, la experiencia se realiza en el interior de la Basílica, con mismo número de costaleros y con la misma configuración ornamental que el paso lleva durante la procesión. Los distintos tramos recorridos en el interior de la basílica cubren los distintos registros de movimiento que el Paso realiza durante la procesión. De esta manera se puede considerar que la experiencia en el interior de la Basílica es representativa de las condiciones en uso durante la ceremonia.

El trabajo de procesado y cálculo de datos posterior se realiza dentro del marco del análisis modal operacional, empleando distinto software de cálculo y distintos algoritmos y contrastando los resultados.

En la primera parte del informe se realiza una descripción de objetivos y de la metodología empleada en los ensayos. A continuación se describen las distintas líneas de resolución empleadas para la obtención final de resultados. Y finalmente se presentan e interpretan dichos resultados.

2. Metodología: montaje experimental, alcance y variables de interés

Como se ha comentado, el objeto de estudio será la estructura auxiliar interna que complementa las funciones estructurales de la canastilla. Dicho estudio se realiza a través de la lectura de sensores colocados en dicha estructura. En lo que respecta a la colocación de dichos sensores se opta por emplear un método que se valga de los pernos ya existentes. Esto por una parte hace que el ensayo resulte inocuo para el Paso, pero reduce de manera drástica las posibilidades de distribución de sensores. Además, hay pernos existentes que no son de fácil acceso y no permiten colocación de sensores, por lo que las posibilidades son aún más reducidas. Con estas limitaciones se configura una distribución de sensores con el objetivo de caracterizar el comportamiento global del sistema, esto es, sensores distribuidos homogéneamente a lo largo del contorno, tanto en la parte superior de la mesa como en la parte inferior de la tarima.

Los resultados obtenidos van a ser de carácter global. En caso de querer realizar un estudio de carácter más local, bien para estudiar zonas de fallos o para profundizar en los resultados de un ensayo como éste, se tendrían que emplear un mayor número de sensores o una mayor densidad de estos en torno a una zona. En cualquier caso, un ensayo que dé una idea general de cómo el sistema completo responde en condiciones de uso es un buen punto de partida que podrá servir como referencia y base para futuros trabajos de investigación.

En lo que respecta al equipo empleado, los acelerómetros, las bandas piezoeléctricas y el equipo de adquisición de datos serán los elementos fundamentales. Como equipo auxiliar de fijación se emplean piezas prismáticas de acero que se fijarán a los pernos existentes antes mencionados.

2.1. Distribución y montaje de sensores

En total se designan 17 puntos de medida de aceleraciones y 2 puntos de medida de deformaciones. Cada uno de los puntos de medida de aceleraciones da soporte a 3 acelerómetros colocados en direcciones vertical, transversal y longitudinal al Paso.

En total se establecen 51 medidas de aceleraciones. En las Figuras 1 y 2 se observa la distribución de los puntos de medida. El punto 16 es una excepción, ya que está situado sobre el vástago metálico que hace de soporte para la imagen del Cristo, a 40cm por encima de la tarima. Las etiquetas *BI*, *BII*, *BIII* y *BIV* marcan el lugar de colocación de los sensores de deformación. Debido a la limitación en el número de canales de entrada del equipo de adquisición, el ensayo se divide 4 ciclos con distintas configuraciones en los que las posiciones de los acelerómetros irán rotando para cubrir todos los puntos de medida, dejando siempre 3 fijos de referencia en el punto de medida 1. Esta referencia es importante a la hora de acoplar los datos obtenidos en las distintas configuraciones. En la Figura 3 se puede observar la distribución. Hay 5 puntos de medida para cada configuración, que van desde la A a la E, mientras que el número asociado a S indica la configuración (setup) a la que pertenece el punto de medida. Esto hace un total de 15 medidas de aceleración por configuración. El punto A es el de referencia y es común para todas las configuraciones. Las etiquetas 1 y 2 hacen referencia a la orientación del sensor, siendo la orientación 3 siempre la vertical, excepto para el Ds4. En lo que respecta a las bandas piezoeléctricas, las bandas 1 y 2 se emplearán en las configuraciones 1 y 2, mientras que las bandas 3 y 4 lo harán respectivamente en las configuraciones 3 y 4.

De manera excepcional, los puntos Bs4 y Ds3 no se fijaron bajo la tarima sino sobre ésta con el fin de utilizar los pernos ya existentes accesibles y no tener que realizar taladros adicionales. Los acelerómetros se fijaron mediante piezas prismáticas de acero que se mecanizaron específicamente para la realización de estos ensayos. Dichas piezas disponían de 3 taladros roscados a

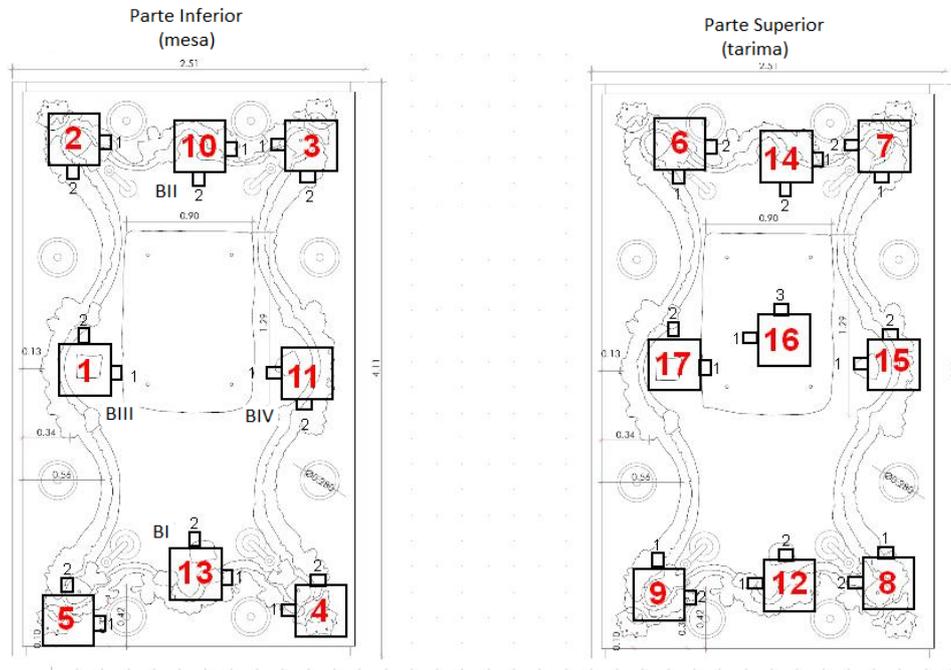


Figura 1: Puntos de medida en la parte superior de la mesa e inferior de la tarima

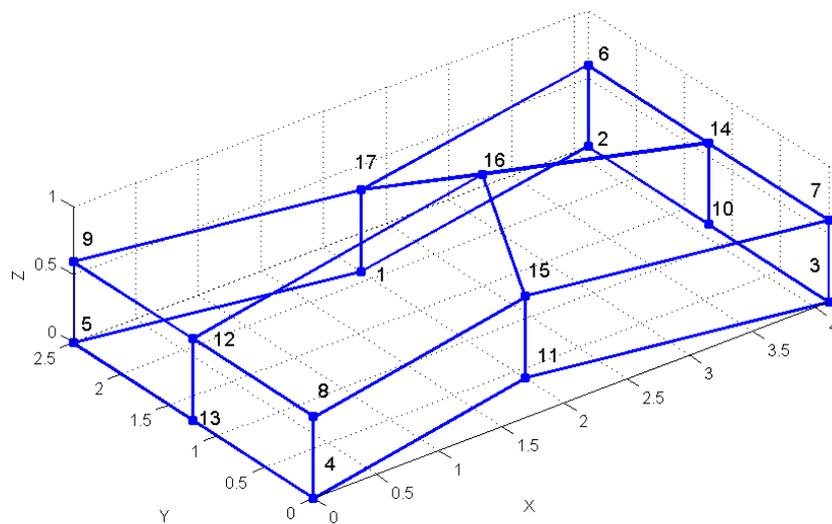


Figura 2: Nodos de Medida en Plano 3D

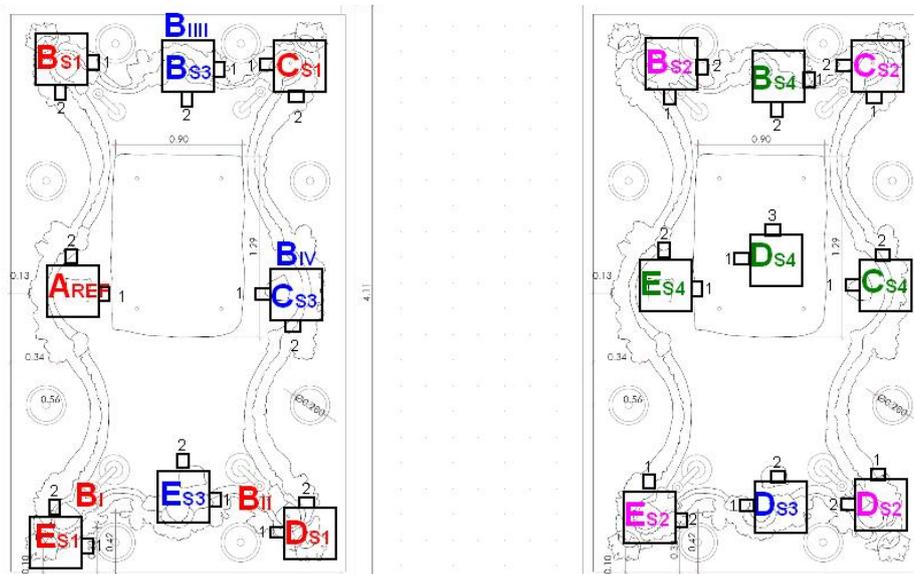


Figura 3: Plano de configuraciones empleadas en el ensayo

los cuales se unían mecánicamente los acelerómetros mediante sus machos roscados convencionales. La pieza prismática a su vez disponía de un taladro roscado adicional (M10) que se roscaba a los pernos existentes en el interior del paso. En la figura 4 se observan los útiles empleados para las fijaciones.?

En las figuras 5 y 6 se ilustra cómo fue el sistema de fijación en los distintos puntos de medida. En los casos de los puntos de medida ES4 y CS4 se tuvieron que utilizar los pernos de sujeción de los candelabros existentes en estos puntos, que resultaban ser de un paso de rosca distinto (M8). Para su sujeción se emplearon unas pequeñas pletinas de sección 20x10mm que se fijaban mediante un taladro pasante y una tuerca al perno de rosca M8 de los candelabros, mientras que en el otro extremo disponían de un taladro roscado M10 sobre el que se colocaba un macho roscado y al cual se fijaba la pieza prismática con los acelerómetros. En el caso de los puntos de medida BS4 y DS3 no se disponía de pernos sobre los que fijar los acelerómetros, por lo que se recurrió a desmontar unas pequeñas piezas de espuma del tipo utilizado para colocar las flores en la parte superior de la tarima ubicadas sobre esos puntos de medida. Se utilizó el mismo tipo de pletina que las descritas anteriormente para los puntos ES4 y CS4, pero en este caso la sujeción se realizó mediante el mismo tornillo rosca-madera que servía para fijar las piezas de espuma mencionadas. Estos puntos de medida quedarían por tanto sobre la parte superior de la tarima. Otro punto singular de medida es el DS4, que se fijó sobre el vástago metálico que sirve de refuerzo para la figura del Cristo y que se ubica entre sus dos piernas, anclándose en su parte inferior a la base de la escultura y en su parte superior a la cadera por medio de un cinturón metálico. Sobre este vástago se fijó la pieza prismática con los 3 acelerómetros mediante una abrazadera metálica constituida por dos pletinas metálicas mecanizadas específicamente para adaptarse a la sección en T del mencionado vástago. Este punto de medida DS4 es el único que aporta información sobre el movimiento de la escultura. Además de los acelerómetros, se colocaron 4 bandas piezoeléctricas para medir deformaciones axiales en las costillas señaladas en las posiciones BI, BII, BIII, BIV en la figura 1. Las bandas se ubicaron en la cara interior de



Figura 4: Útiles fabricados para la fijación de sensores a la estructura del paso

las costillas más próximas a la canastilla.



Punto de medida A (referencia)



Punto de medida B en distribución 1 de sensores (vista general y de detalle)

Figura 5: Sistema de fijación de sensores en distintos puntos de medida



Punto de medida C en distribución 1 de sensores (vista general y de detalle)



Punto de medida D en distribución 1 de sensores (vista general y de detalle)



Punto de medida E en distribución 1 de sensores (vista general y de detalle)

Figura 6: Sistema de fijación de sensores en distintos puntos de medida

2.2. Sistema de medida

Para el registro de las señales se utilizó un sistema de adquisición Pulse de Brüel and Kjaer con 17 canales de medida. El control del sistema se realizó mediante un ordenador portátil. Ambos equipos se conectaron a la red eléctrica durante los ensayos. En la tabla 1 se muestran los datos de los sensores utilizados durante las medidas.

Pto. medida	Canal	Sensor	Sensib. (n° serie))	Rango entrada
A1	1	Endevco 256-HX100	$10.15mV/m/s^2$ (11393)	7.0711V
A2	2	Endevco 256-HX100	$10.20mV/m/s^2$ (11496)	7.0711V
A3	3	Endevco 256-HX100	$9.926mV/m/s^2$ (11501)	7.0711V
B1	4	Endevco 256-HX100	$10.19mV/m/s^2$ (11506)	7.0711V
B2	5	Endevco 256-HX100	$10.12mV/m/s^2$ (11511)	7.0711V
B3	6	Endevco 256-HX100	$10.54mV/m/s^2$ (11512)	7.0711V
C1	7	Endevco 256-HX100	$10.34mV/m/s^2$ (11596)	7.0711V
C2	8	Endevco 256-HX100	$10.07mV/m/s^2$ (11597)	7.0711V
C3	9	Endevco 256-HX100	$9.764mV/m/s^2$ (11598)	7.0711V
D1	10	Endevco 256-HX100	$9.995mV/m/s^2$ (11654)	7.0711V
D2	11	Endevco 256-HX100	$10.74mV/m/s^2$ (11655)	7.0711V
D3	12	Endevco 256-HX100	$10.33mV/m/s^2$ (11656)	7.0711V
E1	13	B&K 4370 + Amplif. Nexus	$10.00mV/m/s^2$ (10276)	7.0711V
E2	14	B&K 4370 + Amplif. Nexus	$10.00mV/m/s^2$ (10277)	7.0711V
E3	15	B&K 4370 + Amplif. Nexus	$10.00mV/m/s^2$ (10789))	7.0711V
BI	16	PCB 740B02	$52mv/\mu\varepsilon$ (5453)	12V
BII	17	PCB 740B02	$52mv/\mu\varepsilon$ (5454)	12V
BIII	16	PCB 740B02	$53mv/\mu\varepsilon$ (5593)	12V
BIV	17	PCB 740B02	$51mv/\mu\varepsilon$ (5594)	12V

Tabla 1: Datos de los sensores empleados

2.3. Variables empleadas para el análisis de la señal

2.3.1. Densidad espectral (PSD)

La primera magnitud de interés que se emplea es la densidad espectral [1]. La densidad espectral de una señal es una función matemática que nos informa de cómo está distribuida la potencia de dicha señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada, es decir, sobre su espectro de frecuencias. Para este caso, el análisis frecuencial de los registros de los acelerómetros está incluido dentro de los algoritmos empleados, por lo que la densidad espectral solo se empleará para analizar la respuesta en frecuencia de las bandas piezoeléctricas.

La densidad espectral para un proceso estocástico estacionario $x(t)$ se define como:

$$G_x(f) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E |X_T(f)|^2 \quad (1)$$

Donde $X_T(f)$ es la transformada de Fourier del proceso truncado

$$x_T(t) = \begin{cases} x(t) & \text{si } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0 & \text{si } |t| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (2)$$

y

$$X_T(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_T(t) (e)^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\frac{1}{2}T}^{\frac{1}{2}T} x(t) (e)^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

2.3.2. RMS

La segunda variable empleada es el RMS [1]. Esta magnitud, conocida como RMS por su nombre inglés 'Root Mean Square', es un promedio cuadrático que se aplica a la señal empleando ventanas y aplicando o no solape entre ellas. La expresión del RMS viene dada por:

$$RMS_L = \sqrt{\sum_{t=0}^N \frac{A_t^2}{L}} \quad (4)$$

Donde L es el tamaño de la ventana de tiempo donde se realiza el promediado, siendo $L = N + 1$ y A_t es el valor de la magnitud tratada en el instante t . El tamaño de ventana establece el tamaño de los segmentos de tiempo donde se promediarán los resultados. Cuanto mayor sea su valor, más promediado resultará el valor del RMS. En algunos casos, cuando el registro de tiempo es limitado e interesa aumentar el promediado, es posible hacerlo haciendo que estos segmentos de tiempo se solapen entre sí. El solape está representado por valores entre 0, caso sin solape, y 1, caso con solape total entre los segmentos.

2.3.3. MAC

A la hora de comparar la semejanza entre modos obtenidos para distintos pasos, distintas configuraciones o distintos métodos, o bien para comprobar la ortogonalidad o independencia lineal de un conjunto de modos, se emplea al MAC [2]. El valor MAC viene definido en la ecuación (5).

$$MAC = \frac{\sum_{q=1}^N \alpha_q \beta_q^*}{\sum_{q=1}^N \alpha_q \alpha_q^* \sum_{q=1}^N \beta_q \beta_q^*} \quad (5)$$

Donde $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$ es el vector correspondiente al modo de referencia y $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N]$ es el vector del modo con el que se quiere comparar. En caso de comparar vectores el resultado será un escalar, y de comparar matrices, el resultado será una matriz cuadrada de dimensión igual al número de modos comparados. El valor de MAC oscila entre 0 y 1. Un valor de $MAC = 1$ indicaría que ambos modos son el mismo, mientras que para $MAC = 0$ los modos serían completamente independientes.

En ocasiones, los diagramas de estabilización pueden aportar 2 polos estables muy cercanos en torno a una misma frecuencia. Esto puede significar, o bien que son distintos modos que se excitan frecuencias cercanas, o bien que son el mismo modo y que el algoritmo lo ha duplicado. Esto puede compararse cualitativamente observando la forma de los modos. El MAC es un medio cuantitativo de realizar dicha comparación. En la sección de resultados lo emplearemos para comparar todos los modos dentro de un mismo tipo de paso, así como para comparar los distintos modos obtenidos en los distintos pasos.

3. Ensayos

3.1. Visitas previas y prueba de funcionamiento

Dada la complejidad del montaje de los sensores y los requerimientos en cuanto a la organización de las medidas durante los ensayos (coordinación con cuadrilla de costaleros y cambios de posiciones de los sensores), se consideró necesario realizar una serie de visitas para planificar los ensayos y llevar a cabo pruebas de instalación de los sensores y toma de medidas. Durante estas visitas se tuvo acceso al paso en el estado en el que se encuentra fuera de las fechas de Semana Santa, es decir, almacenado en la Casa Hermandad y sin la escultura del Cristo, faroles, ni flores. En cada una de las visitas contamos con el acompañamiento y asistencia de José Luis Gómez (IAPH) así como personal de la hermandad.

El cronograma de las visitas previas fue como sigue

- 18 marzo 2014: visita de Mario Solís al paso y basílica. Planteamiento general de cómo podría ser la campaña experimental
- 25 marzo 2014: visita de Mario Solís y Emilio J. Gómez. Toma de imágenes y medidas para el diseño de piezas (prismas, pletinas, pernos, abrazaderas) para el anclaje de los sensores. A partir de esta visita se construyeron todos los útiles necesarios para la fijación de los sensores, se diseñó la ubicación de los mismos para cada ensayo y se elaboró una programación de actividades para el día de los ensayos. Dicho programa fue remitido al IAPH y a la Hermandad para contar con su aprobación previa.
- 9 abril 2014: prueba de instalación de todos los sensores en su ubicación definitiva y con los utillajes fabricados, a excepción de las bandas de medida de deformaciones (que necesitan un pegado sobre la madera y no se consideró oportuno dejarlas pegadas durante la procesión de Semana Santa) y los sensores que se colocarían sobre el vástago del Cristo (no se disponía de acceso al Cristo durante esos días para el montaje y tampoco se consideró indispensable).

3.2. Realización de los ensayos

Los ensayos finales se realizaron con los sensores ubicados e instalados según describió con anterioridad (sección 2.1). A continuación se realiza una breve descripción de las actividades realizadas durante las mediciones, detalles e incidencias de cada una de las medidas realizadas. La fecha de los ensayos fue el 21 de abril de 2014, lunes de pascua. Cada uno de los 4 ensayos (una por cada configuración de sensores), consistió en un recorrido por la basílica desde el pie del altar hasta la puerta de la basílica, con un giro a derechas y otro a izquierdas durante el recorrido. Además, durante el recorrido era necesario pasar bajo los dos dinteles que separan la nave principal de la basílica de la zona de la entrada, para lo cual el Paso debe pasar a menos altura, lo que implica cambiar paso de la marcha y mover el paso con los costaleros en posición flexionada.

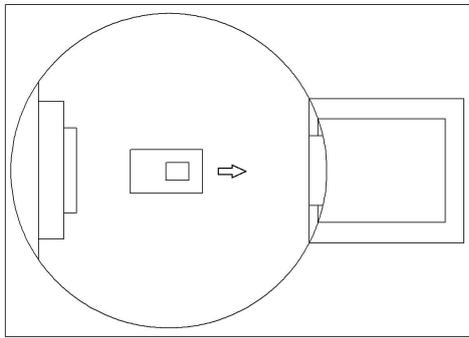
En resumen, cada uno de los ciclos de medida contará con:

- Dos tramos en los que el Paso avanza a velocidad normal.
- Cuatro tramos en los que avanza de forma lenta en aproximación hacia los dinteles.
- Dos tramos en los que pasa agachado bajo los dinteles
- Dos tramos en los que gira 180°.

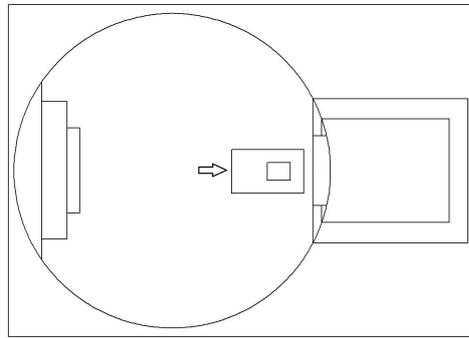
La estructura de este ciclo se observa en la figura 7.

A continuación se listan las actividades desarrolladas durante y entre los distintos ciclos de medida.

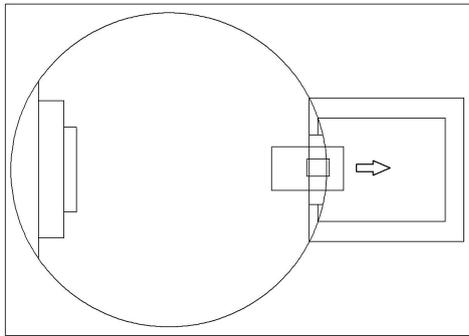
- Instalación y cableado de sensores de 13h a 18h (durante horario de cierre de la basílica)
- 21h a 22h (ya con basílica cerrada): Montaje de mesa con ordenador y equipo de adquisición, conexión a red eléctrica, conexión de sensores, revisión de configuración y conexión de cada canal de medida
- Hora comienzo medidas: 22:15h aproximadamente
- **Medida 1.** Configuración 1 de la posición de los sensores. Levantada del paso y bajada por rampa desde el altar al piso de la basílica. Ajuste de los rangos de entrada de cada canal una vez conocidos máximos valores de aceleraciones registrados durante la levantada. Medida registrada en archivo *Recording-2.pti*
- **Medida 2.** Configuración 1 de la posición de los sensores. Recorrido por la basílica, Duración aproximada 12'25" (hora fin 22:35h). Medida registrada en archivo *Recording-3.pti*
- Cambio de la posición de los sensores de la configuración 1 a la 2.
- **Medida 3.** Sensores distribuidos según configuración 2. Duración del recorrido y registro de 9 minutos aprox. (de 22:50h a 23:00h aprox.). Medida registrada en archivo *Recording-4.pti*. Se observa durante el ensayo que el canal 8 satura en algún momento.
- Cambio de la posición de los sensores de la configuración 2 a la 3.
- **Medida 4.** Sensores distribuidos según configuración 3. Duración del recorrido y registro de 8'39" (de 23:15h a 23:24h aprox.). Medida registrada en archivo *Recording-5.pti*. Se observa durante el ensayo que los canales 8 y 9 saturan en algún momento. En un momento intermedio del recorrido se realiza una levantada a pulso.



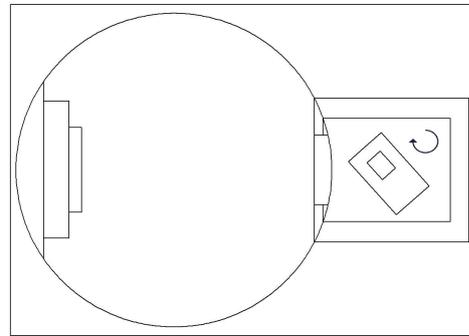
Tramo 1: Avance Paso normal



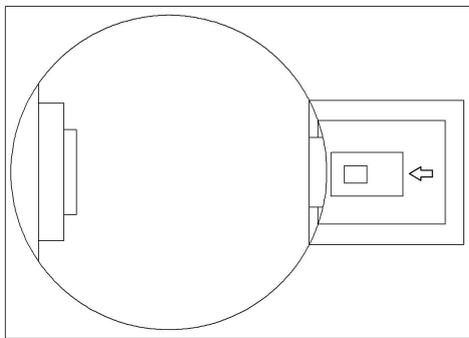
Tramo 2: Paso lento en acercamiento a los dinteles



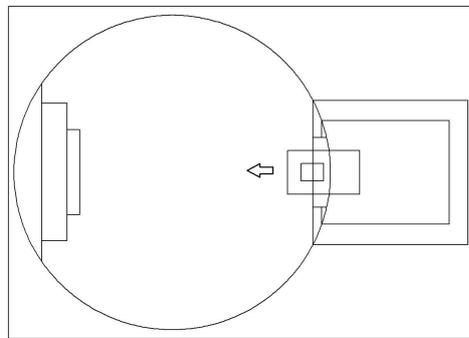
Tramo 3: Paso bajo los dinteles



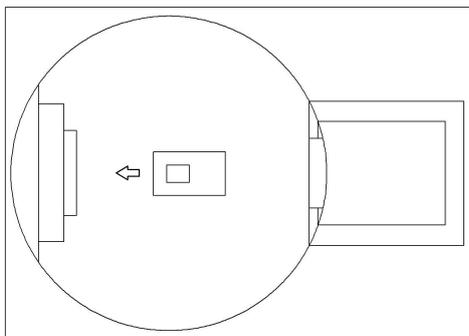
Tramo 4: Giro 180°



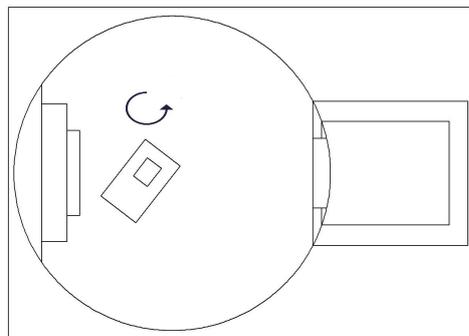
Tramo 5: Paso lento en acercamiento a los dinteles



Tramo 6: Paso bajo los dinteles



Tramo 7: Avance Paso normal



Tramo 8: Giro 180°

Figura 7: Ciclo de medida repetido para cada configuración de sensores

- Cambio de la posición de los sensores de la configuración 3 a la 4. Este cambio planteó el reto de la colocación del punto de medida D sobre el vástago del Cristo. Se estima que se colocaría aproximadamente a unos 40cm de la base de la escultura.
- **Medida 4.** Sensores distribuidos según configuración 4. Duración del recorrido y registro de 10min. aprox. (de 23:48h a 0:03h aprox.). Medida registrada en archivo *Recording-6.pti*.
- Durante todos los ensayos se comprobó que algunas de las bandas de deformación saturaron de manera intermitente y algún caso casi continua, debido bien a un error de conexión o a un excesivo rango de deformaciones en la pieza instrumentada (el rango de entrada del equipo de medida se configuró en su valor máximo)

4. Identificación del sistema

La caracterización de la estructura se lleva a cabo a partir de los registros obtenidos durante el movimiento del paso en condiciones similares a las de su recorrido procesional durante Semana Santa. Técnicamente, desde el punto de vista del análisis modal, se puede decir que la estructura está sometida a cargas de servicio durante el ensayo, y que las fuerzas de excitación (fuerzas ejercidas por los costaleros) son desconocidas, por lo que deberá realizarse un Análisis Modal Operacional (OMA por sus siglas en inglés de Operational Modal Analysis). Para la identificación de las propiedades dinámicas de una estructura bajo estas condiciones, existen métodos matemáticos bien establecidos tales como la identificación de subespacios estocásticos (método SSI por las siglas en inglés de Stochastic Subspace Identification) [3] o la descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD según las siglas en inglés de Enhanced Frequency Domain Decomposition) [4].

Estos métodos surgieron originalmente para el análisis de grandes estructuras en ingeniería civil, como edificios, puentes, mástiles, silos, etc. Sobre estas estructuras resulta complicado aplicar una fuerza controlada y conocida que permita obtener modos escalados a la matriz de masa y aplicar técnicas clásicas de análisis modal experimental (EMA por sus siglas en inglés). Por otro lado, sobre estas grandes estructuras es inevitable la eliminación de la acción de cargas de servicio desconocidas (viento, tráfico, oleaje, etc.) y su efecto estará inevitablemente presente en la respuesta medida.

Los métodos de identificación dinámica de la estructura basados en OMA no pueden por tanto obtener modos escalados a la matriz de masa del sistema, y por tanto los modos obtenidos están no escalados (normalmente se escalan todos de manera que el máximo desplazamiento modal sea la unidad). Para el escalado relativo dentro de cada modo es necesario que en las distintos ensayos con distintas distribuciones de los sensores haya sensores de referencia que permitan unir de manera coherente y escalar los desplazamientos modales en cada grado de libertad, dado en cada ensayo los niveles de excitación, y por tanto los niveles de respuesta, son distintos. Por este motivo en los ensayos del paso se mantuvo el punto de medida A fijo durante todos los ensayos, siendo éstos los grados de libertad de referencia.

Los modos, como se apuntó en la anterior sección, no representarán el movimiento del sistema en amplitud real, sino escalada. Esto es, no vamos a conocer cuantitativamente cual es la amplitud real de las deformaciones, pero sí conoceremos cuales son las zonas que sufren más deformaciones, y por tanto, sufren una mayor afectación estructural.

Los métodos de identificación basados en OMA parten para su aplicación de la hipótesis de que la estructura se encuentra excitada por un ruido ambiental que tiene una amplitud constante en frecuencia (ruido blanco). Esto obviamente nunca es cierto pero se puede ajustar en gran medida a la realidad en casos de excitación ambiental habitual en ingeniería civil. Para conseguir un mayor ajuste a esta situación se requieren además largos periodos de monitorización de la estructura de manera, de manera que sucedan varios miles de ciclos para cada modo y que estadísticamente se consiga un contenido en frecuencia de la excitación lo más plano posible, cancelándose efectos temporales transitorios en la excitación, tales como ráfagas de viento, paso de vehículos o personas, etc. En el caso de los ensayos realizados sobre el paso se presenta el inconveniente de que la excitación inducida por los costaleros es uniforme pero tendrá un contenido en frecuencia no uniforme, con armónicos claramente definidos por su paso rítmico. Esto hace que se viole una hipótesis fundamental de los métodos de identificación a emplear. Las consecuencias de este hecho puede ser por un lado que la identificación de algunos modos no pueda realizarse con claridad debido a que sus frecuencias no se encuentren suficientemente excitadas, y por otro lado que puedan obtenerse como modos lo que realmente puedan ser

deformadas operacionales (ODS por las siglas en inglés de Operational Deflection Shapes). Por otro lado, una ventaja de disponer de la respuesta de la estructura bajo cargas de servicio reales es que se tendrá una estimación precisa de los niveles de aceleración y carga real que sufre el paso durante su procesión en Semana Santa. Esta problemática será abordada en la sección dedicada al análisis de los resultados de los ensayos.

Para la identificación de modos y frecuencias de la estructura se emplea software especializado como MACEC [5] (herramienta en entorno MATLAB) [6] y Artemis [7].

En un principio la línea de trabajo se estableció para resolver el problema empleando el algoritmo SSI con el software Macec. Este método, una vez procesados los datos de las aceleraciones proporciona una serie de diagramas de estabilización donde se encuentran ajustados los polos matemáticos estables en torno a unas frecuencias concretas. En función de la densidad de polos encontrados en torno a una frecuencia podemos diferenciar los polos que representan los modos de vibración del sistema. Al procesar los registros de este ensayo nos encontramos con diagramas de estabilización dispersos. Esto genera cierta incertidumbre a la hora de seleccionar los polos, ya que podrían tratarse de modos o podrían tan solo ser polos matemáticos sin ninguna relación con el sistema. Además, analizando los modos obtenidos observamos que estos reflejan un comportamiento diferente al esperado. Antes estas circunstancias se decide realizar una resolución del problema paralela empleando otras herramientas. Por lo tanto, adicionalmente se emplea el software Artemis, utilizando el algoritmo EFDD para la obtención de resultados, con el fin de contrastar con los obtenidos empleando el algoritmo SSI.

Finalmente los resultados obtenidos con ambos algoritmos son equivalentes. Si bien existen ciertas diferencias, las deformadas del sistema y las frecuencias a las que ocurren son equivalentes, con algunos casos de completa coincidencia. Las diferencias encontradas se atribuyen a inexactitudes de resolución provocadas por la escasa duración de la mayoría de registros temporales recogidos.

Los resultados de los diagramas de estabilización, así como la justificación de equivalencia entre las soluciones aportadas por los dos algoritmos serán puntos cubiertos en la sección de Resultados. La mayor parte de los resultados presentados en este estudio son los obtenidos con la herramienta Macec, ya que dicha herramienta permite obtener gráficos más claros para exponer en un informe escrito.

5. Procesado previo de datos

En esta sección se describe todo el proceso al que se someten los datos con el fin de obtener los resultados. Inicialmente los datos recogidos son 4 bloques de lecturas de aceleración y deformación, uno de cada configuración. Dichos bloques contienen la información de todo el ciclo, donde encontramos tanto zonas de movimiento como de reposo, así como distintos registros de lectura que corresponden a los distintos tipos de pasos y maniobras que el sistema realiza en el ciclo. Dado que la intención de este análisis es estudiar de forma aislada los distintos tipos de movimiento que el paso desarrolla en condiciones de uso, la primera parte del procesado, descrita en la sección 5.1, se centrará en dividir la señal, tomando los tramos que se consideren de interés y desechando los que no. A continuación, en la sección 5.2, se justifica la eliminación de los datos recogidos por 2 sensores, uno de aceleración y otro de deformación, que presentan medidas erróneas recurrentes. Una vez realizado esto, los datos están listos para aplicarles los algoritmos que resuelven el problema dinámico. En la sección 4 se describen cualitativamente los algoritmos y el software empleados para la resolución. Finalmente, en la sección 2.3, se da una descripción cualitativa y cuantitativa de las variables de interés y de su significado en el comportamiento dinámico del sistema.

5.1. Separación de señales

Para cada configuración, se obtiene un registro temporal de la señal recogida por cada uno de los sensores. En la figura 8 se puede observar el registro temporal de el acelerómetro de referencia 1, posición transversal, durante el ensayo correspondiente a la configuración 2. En dicha gráfica se observan tramos muy diferenciados. A pesar de que es complejo observar a esta escala las características propias de cada tramo, es sencillo localizar los golpes de llamador. El patrón empleado para la señal del llamador es de 3 golpes previos a la levantada del paso y comienzo del movimiento, y un golpe para indicar que se pasa de situación de movimiento a reposo. Este patrón se identifica perfectamente en la figura 8, y es lo que se emplea como referencia inicial para dividir la señal.

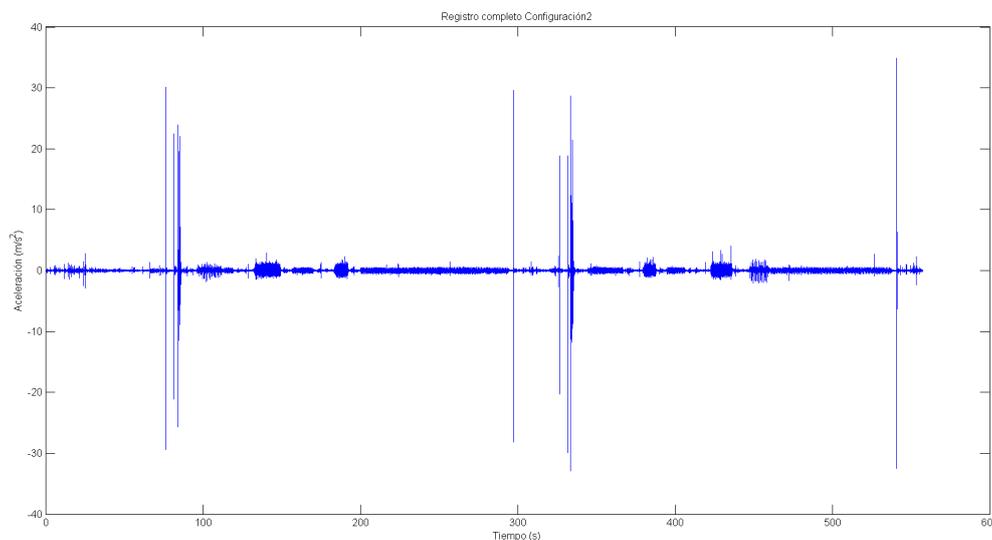


Figura 8: Registro completo. Punto de medida 1, sensor transversal, configuración 2.

La primera división que se realiza establece 3 estadios distintos dentro del ciclo:

- Tramos de levantada: Comprenden desde instantes previos al primer impacto del llamador, hasta que la respuesta a la levantada se estabiliza (Figura 9).
- Tramos de movimiento: Tramos que van desde que se estabiliza la respuesta del sistema a la levantada inicial hasta instantes previos al impacto que indica el comienzo de reposo (Figura 11).
- Tramos de reposo: tramos que el sistema está en reposo (Figura 12).

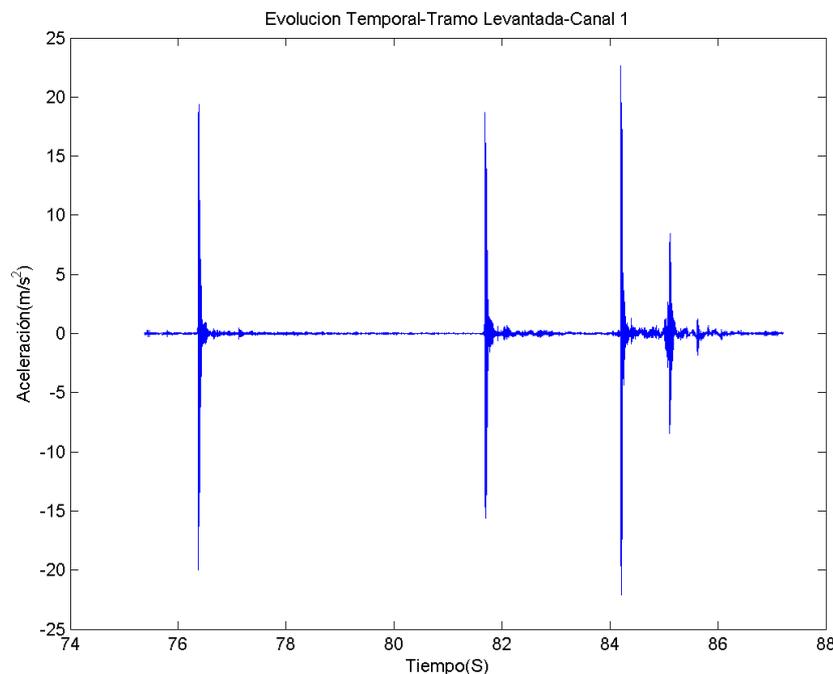


Figura 9: Registro tramo levantada. Punto de medida 1, sensor transversal, configuración 2.

Los tramos de levantadas serán útiles para el estudio de cómo dicha maniobra afecta al sistema. En los tramos de reposo encontramos lectura de ruido. En principio desechamos esta información ya que no nos es útil para el tipo de análisis que estamos realizando. Finalmente, los tramos de movimiento son los que contienen la mayor parte de información útil. Se pueden observar en la figura 11, ya con más claridad, patrones de movimiento distintos que tienen su origen en los distintos tipos de movimientos que el paso desarrolla en el ciclo del ensayo (paso normal, paso lento, paso agachado y giro). Lo siguiente será dividir esta señal en los distintos patrones observados y asociarlos a los correspondientes movimientos que los generan. Dado que se carece de un registro temporal donde se pueda visualizar en qué instantes exactos el sistema pasa de un movimiento a otro, y sin tener referencias claras para la división como en el caso del llamador, la metodología seguida para la división pasa por un estudio estadístico de la señal de manera que las transiciones entre los distintos tramos se puedan observar con claridad. Para esto, se realiza un análisis de la evolución del valor de la magnitud RMS, definida en la sección 2.3. La elección del solape entre ventanas depende de las características de la señal a tratar. Este puede oscilar

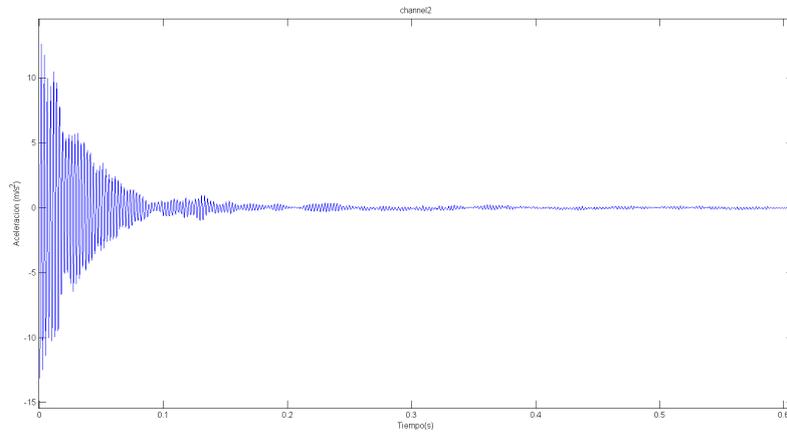


Figura 10: Registro Llamador.Punto de medida 1, sensor transversal, configuración 2.

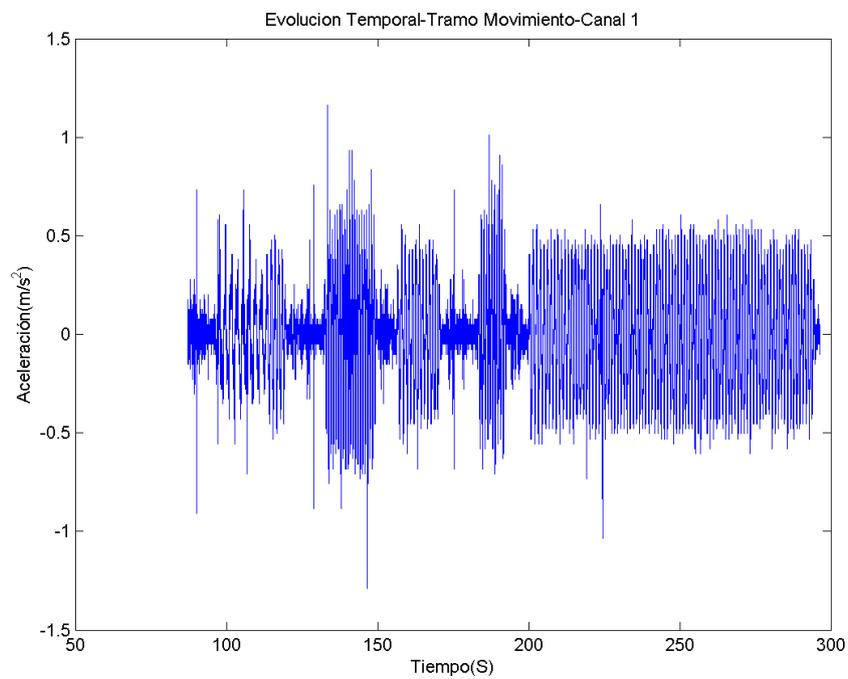


Figura 11: Registro completo.Punto de medida 1, sensor transversal, configuración 2.

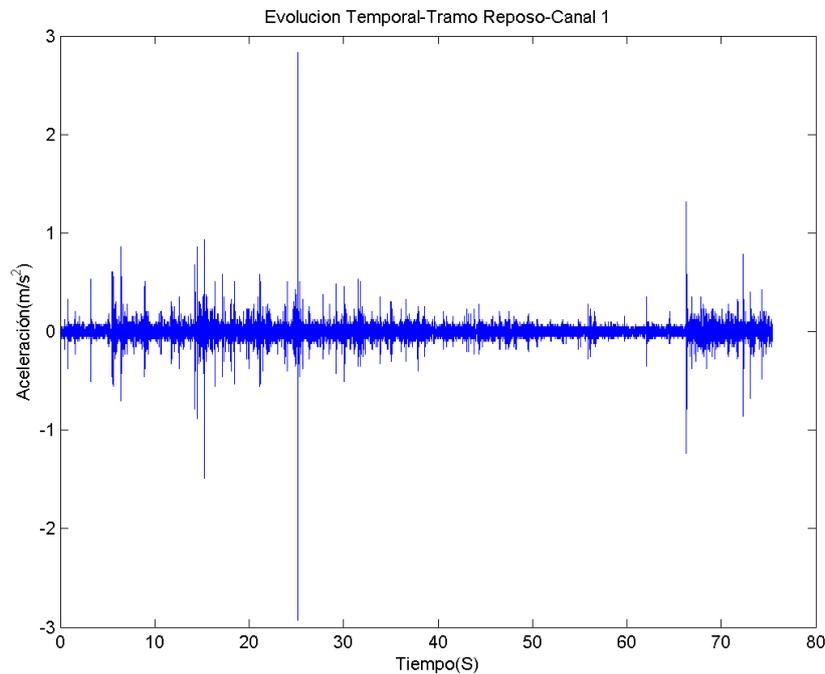


Figura 12: Registro completo. Punto de medida 1, sensor transversal, configuración 2.

entre 0 y 1. Para nuestro caso hemos seleccionado un tamaño de ventana de 1 segundo, que equivale a 4096 ya que esa es la frecuencia de muestreo empleada en los ensayos. El solape entre ventanas es de 0.5. Los resultados de aplicar el RMS con estos valores han sido buenos y esto se tendrá en cuenta más adelante, ya que en la aplicación del algoritmo SSI se requerirá realizar un estudio por ventanas semejante, y será necesario volver a elegir los valores de tamaño de ventana y solape. En caso de seleccionar una ventana demasiado grande, se perderá información de la señal ya que se promediarán y confundirán comportamientos diferentes. Por otra parte, emplear solape entre ventanas es útil a la hora de aumentar el promediado realizado y diferenciar mejor los distintos tramos, pero de emplear tamaños inadecuados puede provocar redundancia de información, con el correspondiente aumento de carga de computación. O, de elegir solapes muy pequeños, se podría obtener un promediado pobre. En la figura 13 se observa el resultado RMS obtenido de la evolución temporal registrada por el sensor transversal del punto de medida 1 (1), en la configuración 2. Como se observa en dicha figura, el resultado obtenido, en valor absoluto, refleja de manera más explícita los distintos patrones de aceleración registrados por el sensor.

El proceso consiste en aplicar el valor RMS al acelerómetro de referencia en todas las configuraciones. En las gráficas obtenidas resulta mucho más sencillo establecer los límites entre los distintos tipos de pasos, de este modo se dividen los tramos completos de movimiento en sub-tramos de movimientos específicos que a posteriormente serán objeto de estudio independiente. En la figura 14 se observa cómo se realiza dicha división para el primer tramo de movimiento correspondiente a la configuración 2. El comienzo de los intervalos viene indicado por la línea discontinua verde, y el final por la línea discontinua roja.

Las divisiones se realizan atendiendo a los 4 tipos de maniobras realizadas por el Paso durante los ensayos. Tendremos por tanto para analizar:

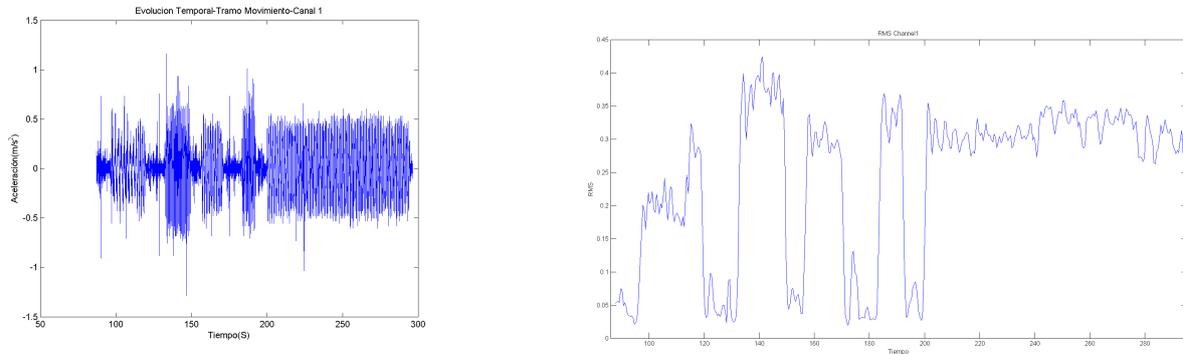


Figura 13: Aplicación de RMS a tramo de movimiento registrado por el sensor transversal del punto de medida 1 en configuración 2

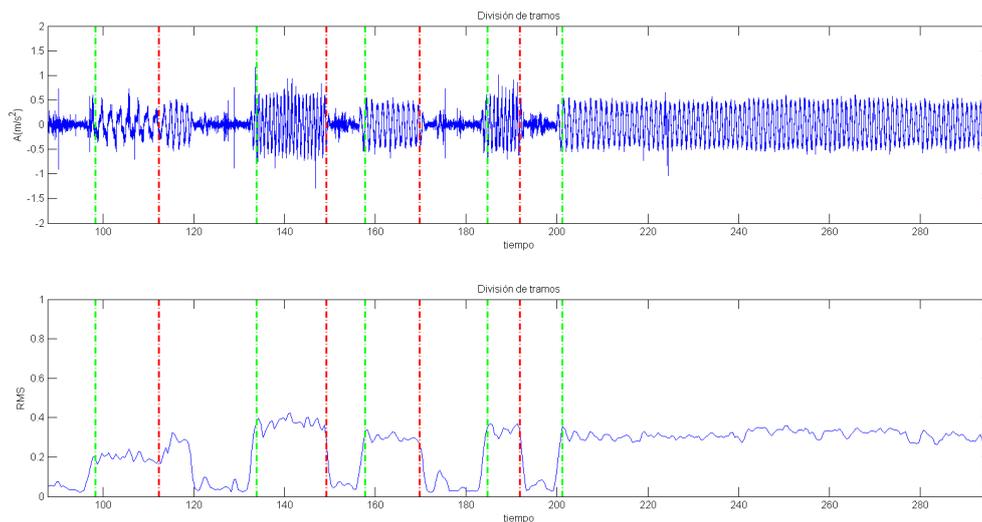


Figura 14: División de registro temporal empleando promediado RMS. Sensor de referencia 1. Dirección transversal. Configuración 2. Intervalos (de izquierda a derecha): paso normal, paso agachado, paso lento, paso agachado y giro.

- Paso normal: paso estándar realizado por el sistema en uso.
- Paso Lento: paso a menor velocidad empleado en maniobras de aproximación delicadas.
- Paso agachado: maniobra realizada cuando el Paso tiene que pasar bajo algún obstáculo.
- Giro: rotación del Paso para cambio de orientación.

En las figuras 15, 16, 17 y 18 se observan las evoluciones temporales de los distintos tramos para los 3 acelerómetros de referencia en la configuración 2. Se puede ver cómo la orientación del sensor influye claramente en la lectura que realiza del movimiento. Los 3 acelerómetros de referencia tienen orientaciones transversales en todas las configuraciones. Hay tipos de movimiento que apenas registran amplitud de aceleración en un eje mientras que en los demás ejes registran amplitudes elevadas. Como se muestra en la figura 3, el sensor 1 tiene una orientación transversal al paso, el 2 es longitudinal y el 3 es vertical. De cara al análisis de señales en el dominio del tiempo este factor se ha de tener en cuenta a la hora de elegir el sensor a observar.

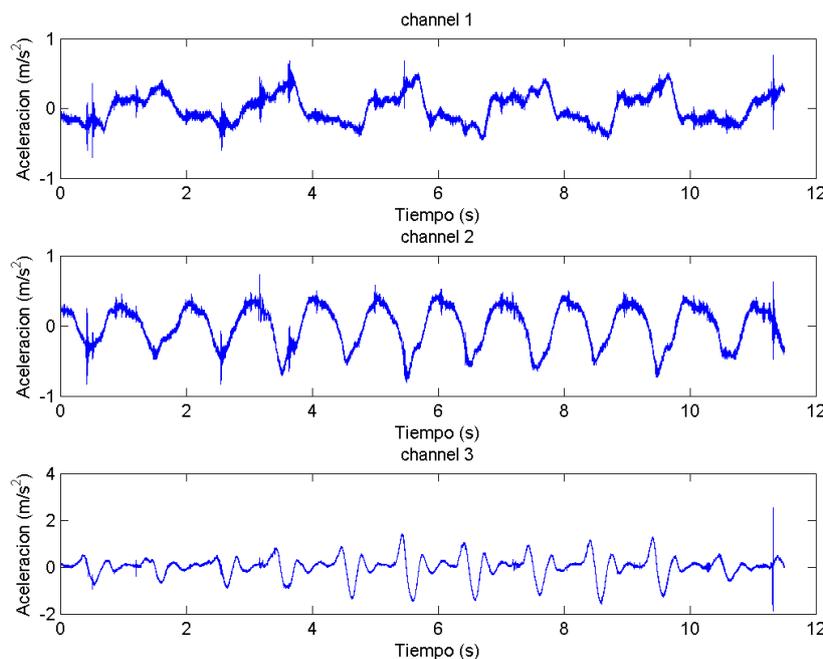


Figura 15: Evolución Temporal paso normal para los 3 canales de referencia en configuración 2. De arriba a abajo: direcciones transversal, longitudinal y vertical.

Por otra parte, llama la atención la diferencia en la longitud de las medidas de los distintos pasos. Mientras que para la maniobra de giro vamos a tener registros del orden de 80 segundos, para los casos de paso lento, agachado y, especialmente, paso normal, esta duración disminuye a valores entre 10 y 20 segundos. Estos últimos valores son pequeños, y debido al tipo de ensayo y a los algoritmos que vamos a emplear para resolver el problema, puede que los resultados se vean afectados. En cualquier caso, esto será objeto de estudio en secciones posteriores.

En principio estos serán los intervalos a estudiar. De un modo adicional también se estudiará el problema completo, es decir, los tramos completos de movimiento sin dividir, como se muestran

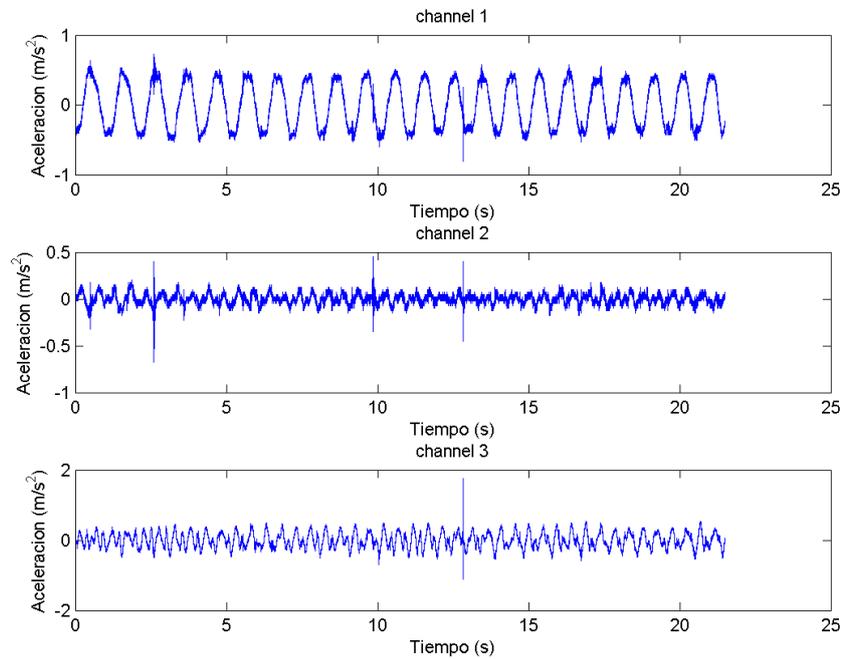


Figura 16: Evolución Temporal paso lento para los 3 canales de referencia en configuración 2. De arriba a abajo: direcciones transversal, longitudinal y vertical.

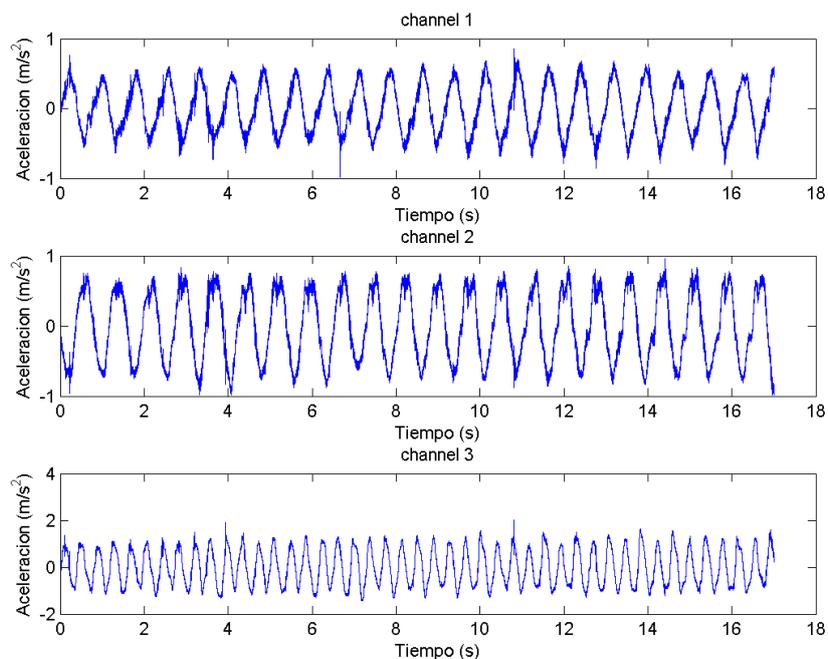


Figura 17: Evolución Temporal paso agachado para los 3 canales de referencia en configuración 2. De arriba a abajo: direcciones transversal, longitudinal y vertical.

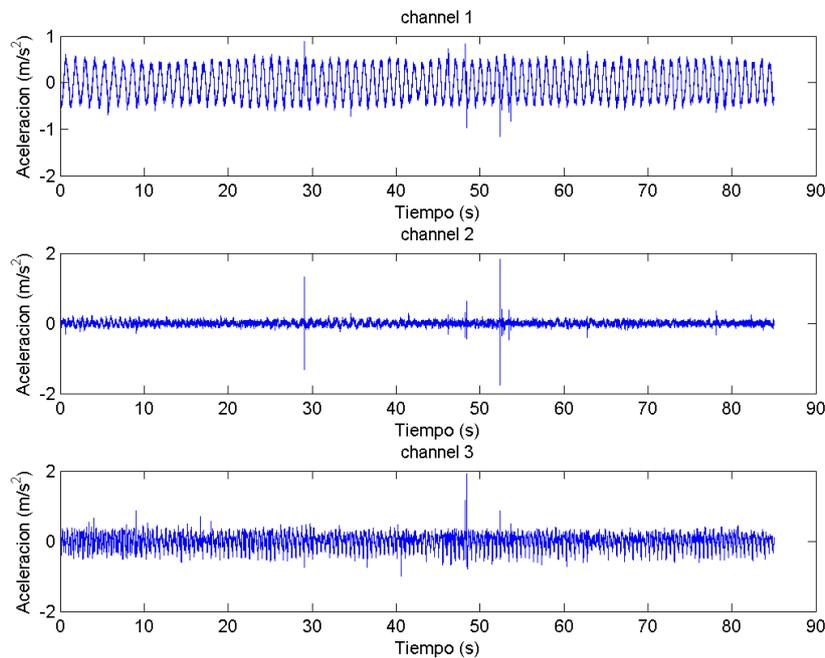


Figura 18: Evolución Temporal giro para los 3 canales de referencia en configuración 2. De arriba a abajo: direcciones transversal, longitudinal y vertical.

en la figura 11. Esto se realizará con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos analizando los tramos divididos.

También serán objeto de estudio tanto las maniobras de levantadas, como los golpes producidos por el llamador. La información para ambos estudios se obtendrá de los tramos de levantadas, como el representado en la figura 9, y de los registros del llamador, como el representado en la figura 10.

En lo que respecta a los acelerómetros. Para los sensores de deformación, bandas piezoeléctricas, se aplican las mismas divisiones que a los tramos de aceleración, de modo que se obtienen las respuestas temporales a las bandas en los mismos tramos que para los acelerómetros. En las figuras 19, 20, 21 y 22 se representan las evoluciones temporales de la banda 1 en la configuración 2 en los tramos seleccionados para el estudio.

5.2. Medidas defectuosas

Al realizar los primeros análisis de las respuestas de los acelerómetros se encuentra un error en la toma de datos recurrente asociado al canal 8. El canal satura, y lo hace repetidamente durante los ensayos de las configuraciones 2, 3 y 4. En la figura 23 se puede observar que, mientras en la configuración 1 el canal 8 obtiene un registro correcto, en las otras 3 los datos del registro temporal son completamente erróneos. De introducir estos datos en el algoritmo de identificación del sistema, los resultados van a verse afectados negativamente, por lo que los registros aportados por el canal 8 no van a ser tenidos en cuenta. A efectos finales será como si en todas las configuraciones hubiese un punto de medida menos, esto es, 47 medidas de acelerómetros finales en lugar de 51.

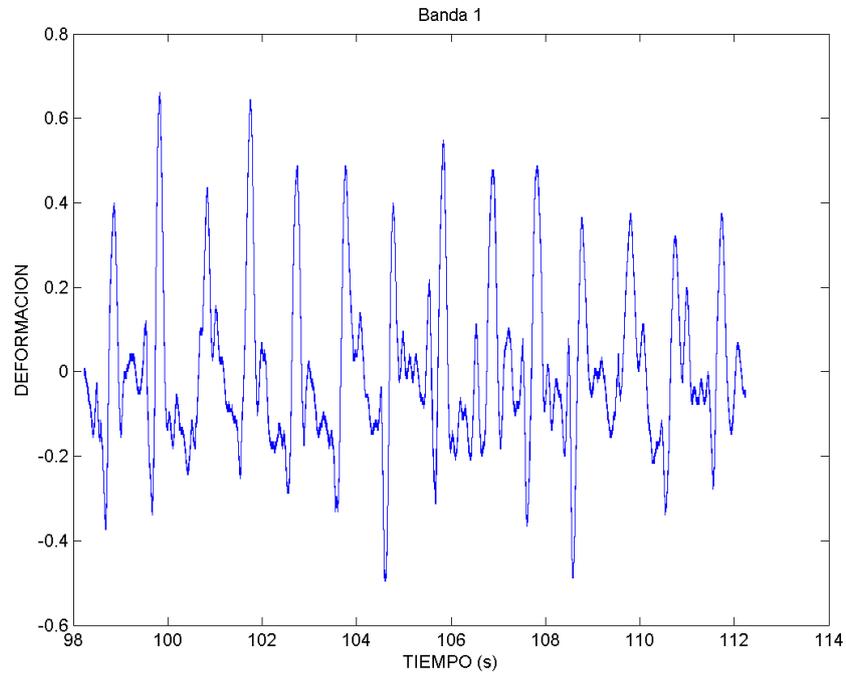


Figura 19: Evolución Temporal Banda 1 en Paso Normal. Configuración 2

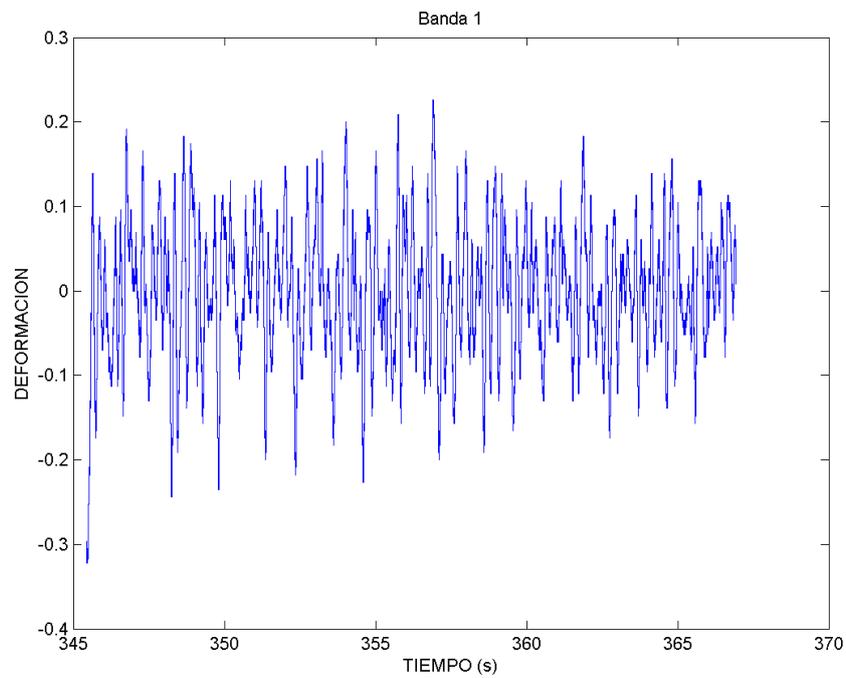


Figura 20: Evolución Temporal Banda 1 en Paso Lento. Configuración 2

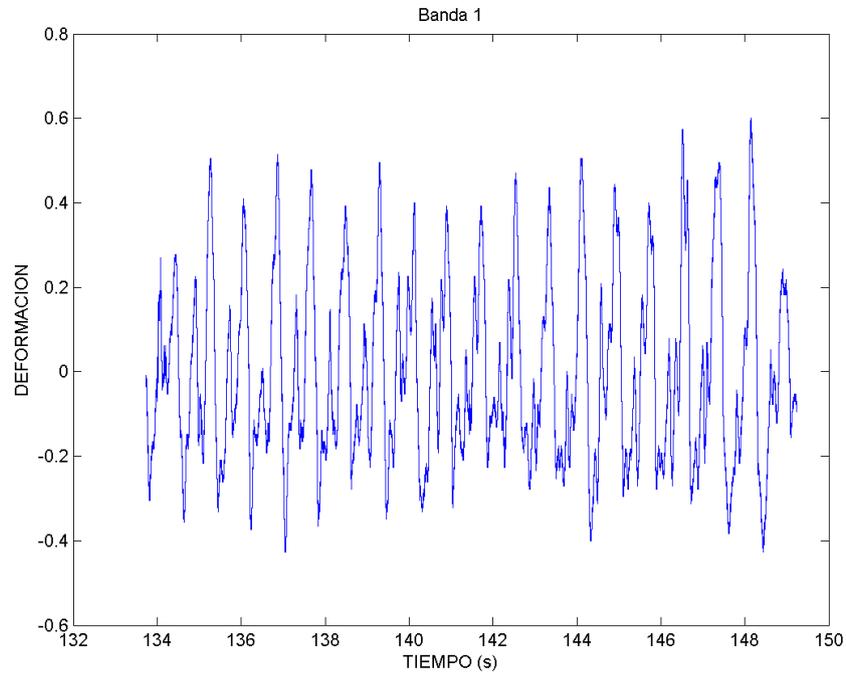


Figura 21: Evolución Temporal Banda 1 en Paso Agachado. Configuración 2

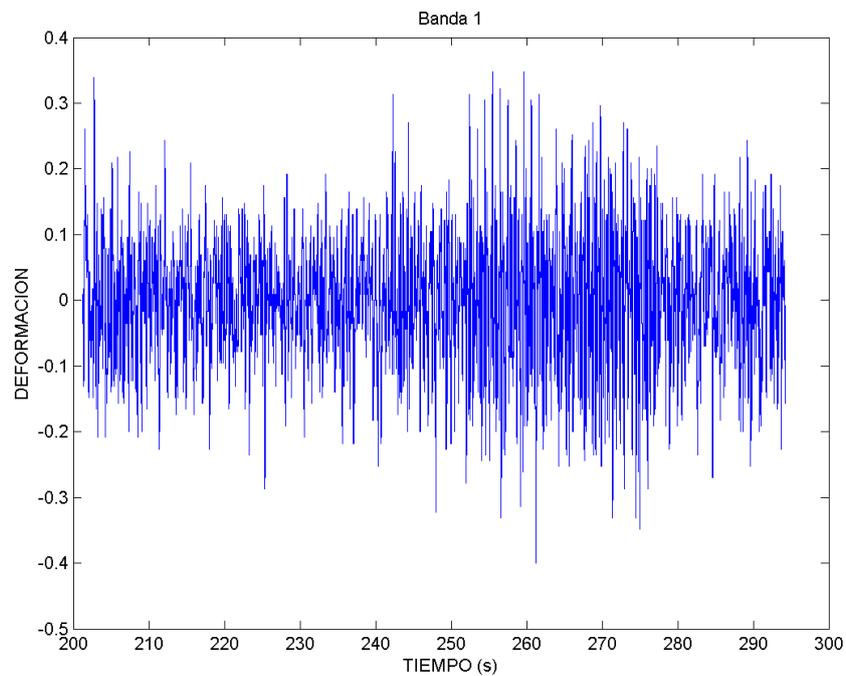
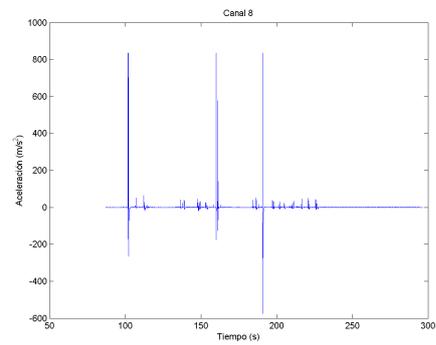
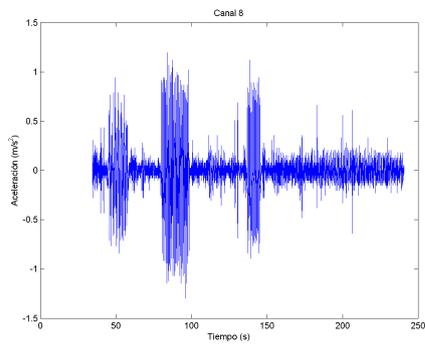
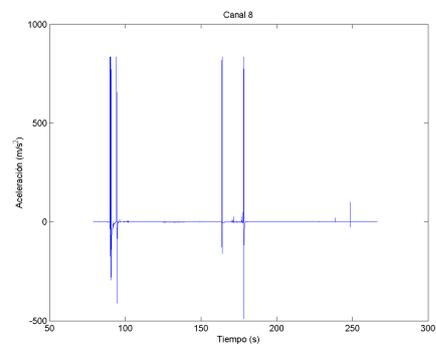
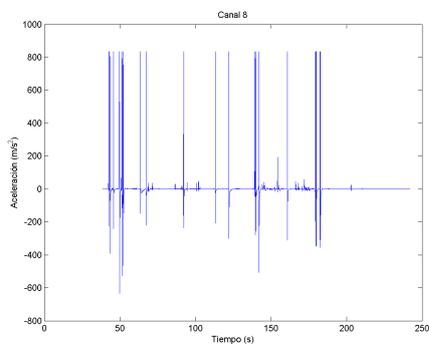


Figura 22: Evolución Temporal Banda 1 en Giro. Configuración 2



Configuraciones 1 y 2

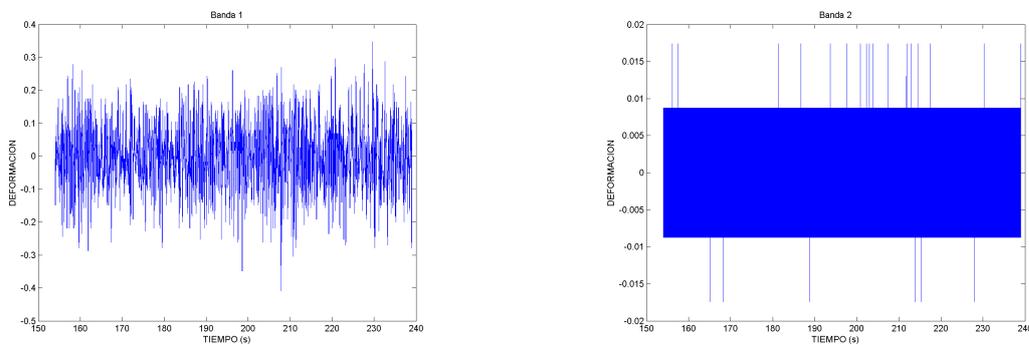


Configuraciones 3 y 4

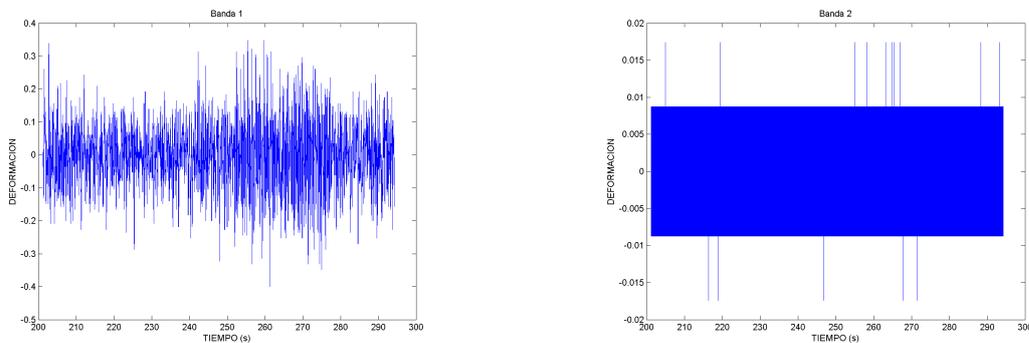
Figura 23: Registros temporales en tramo completo de movimiento del canal 8 en las 4 configuraciones

Dado que el error se repite en el canal para distintas configuraciones, el error puede ser debido a que en una de las operaciones de cambio de sensores entre configuraciones se dañara algún cable, o el acelerómetro. En cualquier caso, el error está asociado, o bien al sensor, o bien al sistema de conexión y fijación del mismo. Ya que en el primero de los casos la lectura fue correcta, se descarta un mal funcionamiento del canal del equipo de medida.

En lo que respecta a las bandas, encontramos que una de ellas, la banda 2, también presenta registros erróneos. En la figura 24 se puede observar cómo la banda 2, empleada en la configuración 1 y en la 2, presenta lectura saturada en ambas configuraciones, mientras que la banda 1 presenta unos registros correctos. Los registros de la banda 2 tampoco serán tenidos en cuenta en el análisis.



Bandas 1 y 2 para configuración 1



Bandas 1 y 2 para configuración 2

Figura 24: Registros temporales para las configuraciones 1 y 2 en giro de las bandas piezoeléctricas 1 y 2

6. Resultados

En esta sección se presentan e interpretan los resultados obtenidos. En la sección 6.1 se realiza un análisis del registro temporal de la maniobra de la levantada empleando los registros temporales obtenidos en la sección anterior. A continuación, en la sección 6.2 se realiza un análisis semejante del golpe del llamador. En la sección 6.3 se presentan los resultados de los registros temporales por tipos de paso, y se analizan cualitativamente con atención a las direcciones de máxima afectación según el tipo de movimiento y a los armónicos identificables en los registros. En la siguiente sección, la 6.4 se presentan los resultados del análisis de la respuesta de las bandas piezoeléctricas en el dominio de la frecuencia, donde se podrán observar algunas características adicionales del comportamiento dinámico del sistema. A continuación, en la sección 6.5, se presentan varios diagramas de estabilización que serán muy útiles a la hora de entender tanto la condición de los datos registrados, como los resultados obtenidos a partir de ellos. En las secciones 6.6 y 6.7 se presentan los resultados de modos de vibración y frecuencias asociadas del sistema. De un modo particular para cada tipo de paso, y de un modo general a continuación. Finalmente, en la sección 6.8 se justifica la equivalencia de resultados obtenidos con los algoritmos EFDD y SSI realizando una comparación entre ellos.

6.1. Análisis levantadas: Máxima aceleración en uso

La levantada es, de entre todas las maniobras realizadas por el Paso, la más característica. Es la que más fuerza y coordinación requiere, y la que mayores aceleraciones globales provoca sobre la estructura. Si bien los golpes con el llamador llegan a generar lecturas de mayor aceleración, estas aceleraciones son de naturaleza local, y no tendrán la capacidad de desplazar y deformar la estructura que sí presenta la maniobra de la levantada. En la figura 25 se observa un proceso de levantada al completo, incluyendo los golpes previos del llamador.

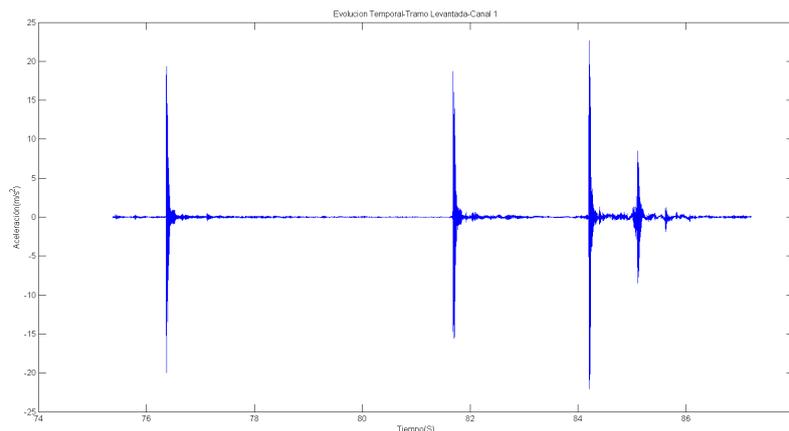


Figura 25: Levantada. Canal de referencia 1. Dirección transversal. Configuración 2

Como se comentó con anterioridad, antes de realizar las levantadas se producen 3 golpes con el llamador con la finalidad de preparar a los costaleros para la maniobra. Esta se lleva a cabo de modo casi instantáneo con el tercero de los impactos, de modo que resulta complejo diferenciar el efecto del impacto y el de la levantada en un registro temporal. En la figura 26 se observa una imagen ampliada de dicho registro que abarca desde que se produce el 3º impacto hasta que el

sistema cae sobre los costaleros después de ser lanzado y se amortigua. El tiempo transcurrido es de aproximadamente 0.8 segundos.

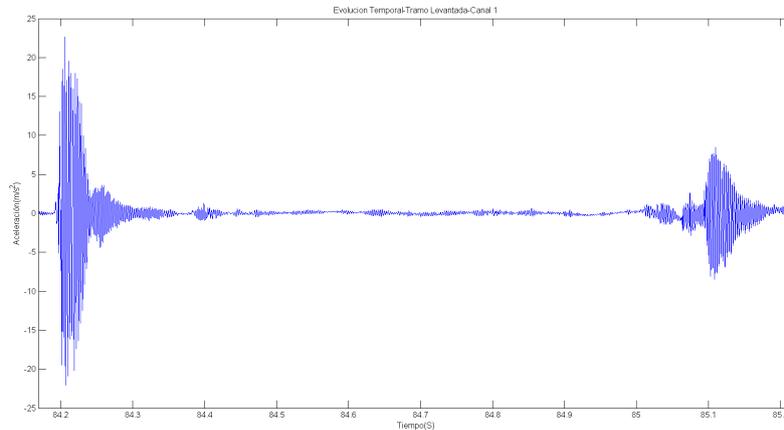


Figura 26: Impacto de llamador, levantada y caída/amortiguamiento sobre costaleros. Canal de referencia 1. Configuración 2

Ampliando y separando la figura en 2, observamos el lanzamiento y la caída de forma separada en la figura 27.

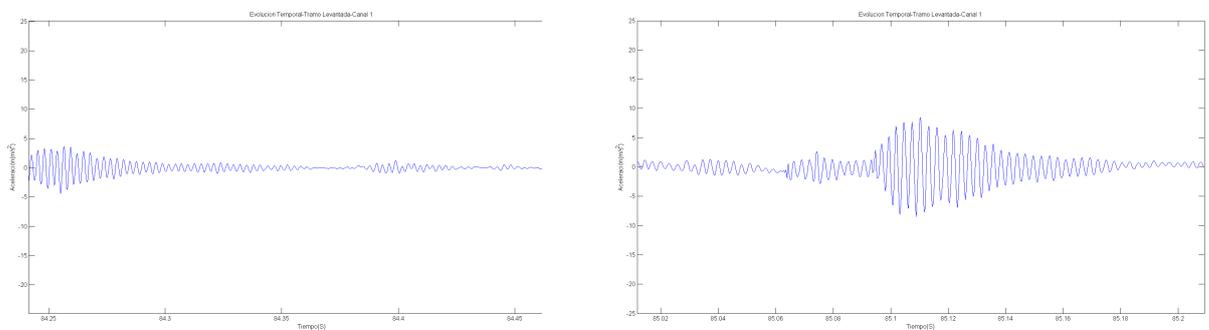


Figura 27: Tramos de Levantada y caída respectivamente. Canal de referencia 1. Configuración 2.

Según el registro, la aceleración máxima alcanzada en el proceso está en torno a los $20m/s^2$, lo que asumiendo un peso del sistema de $1200Kg$, y contando con un número de 35 costaleros, se estima que cada la fuerza ejercida por cada uno en esta maniobra es del orden de 60 Kg.

Atendiendo a estos datos se puede observar cómo esta maniobra supone un evento de gran intensidad. Un elemento de más de una tonelada de peso se acelera en menos de medio segundo por encima de la aceleración de la gravedad para ser frenado abruptamente apenas medio segundo después. Si bien no puede definirse estrictamente como un impacto, es un evento con características de aceleración parecidas. Es de esperar que la mayor parte de la amortiguación de

este evento la realicen los costaleros, pero hay una parte que es absorbida por la amortiguación interna del sistema. Sería interesante con vistas a hacer una valoración completa de la levantada conocer el comportamiento interno de la estructura ante las aceleraciones a las que se somete. Este estudio queda fuera del marco de este informe, ya que para realizar esto se tendrían que desarrollar otros tipos de estudios y conocer en detalle propiedades de la estructura (Materiales, geometría, definición de uniones...).

6.2. Análisis llamador

El llamador es un elemento fundamental en la utilización del Paso. Su uso es frecuente dentro de la ceremonia. En una procesión es normal que el paso se detenga una vez cada 4 o 5 minutos, siendo 4 los impactos recibidos por cada vez que se detiene. En la figura 28 se observa la respuesta temporal del impacto del llamador de el sensor más cercano al elemento, con orientación vertical.

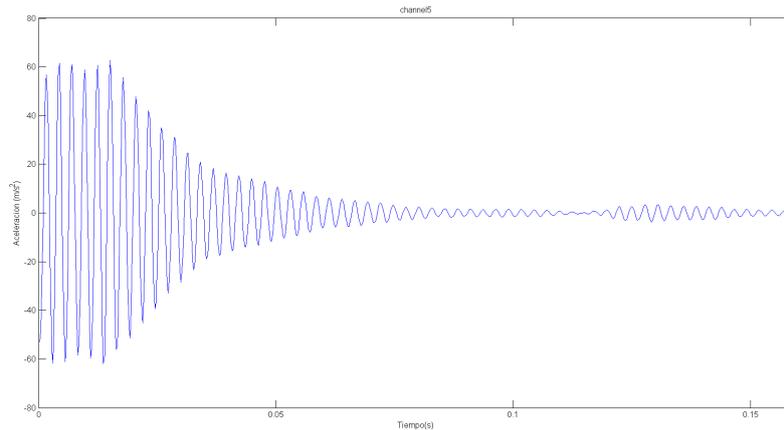


Figura 28: Llamador. Sensor más cercano a llamador. Orientación vertical. Configuración 3

Como es de esperar, éste es el sensor que registra una mayor aceleración, del orden de $60m/s^2$. Esto es un valor muy elevado de la aceleración, lo que indica una gran potencia de impacto. Presenta una amortiguación limpia y rápida. Esto es debido a que el sensor está cerca del llamador. En otros sensores más alejados, la máxima aceleración medida es menor, y la amortiguación presenta una forma más inestable. En la figura 29 se representa la respuesta para el mismo golpe de llamador recogida por el un sensor colocado en el punto de medida 13, el más alejado del elemento, en dirección horizontal.

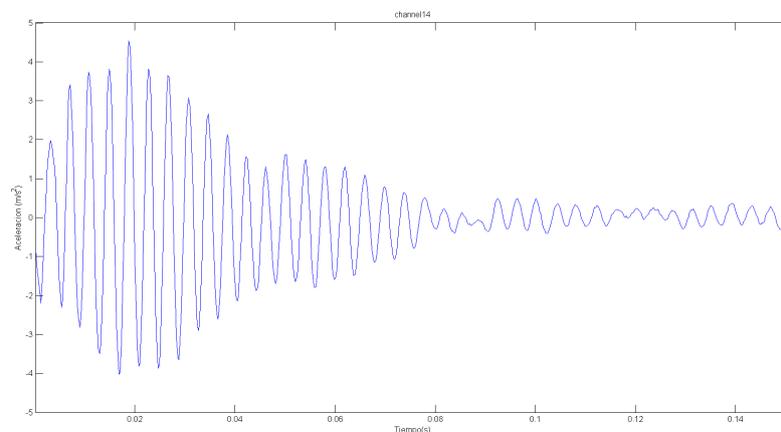


Figura 29: Llamador. Sensor más lejano a llamador. Orientación vertical. Configuración 3

En este caso, la máxima aceleración registrada es del orden de $5m/s^2$. Esto es un gran contraste

con el caso anterior. Se puede afirmar según estos datos que, de haber una afectación provocada por los impactos del llamador, esta será local en torno a la zona del mismo, lo que puede generar comportamientos diferenciales de la estructura. Estos posibles comportamientos pueden reflejarse en la forma de deformarse de la estructura bajo cargas dinámicas, y es algo que se valorará posteriormente, cuando se analicen las deformadas obtenidas. De manera similar a como ocurría en el caso de las levantadas, cuantificar los efectos del llamador sobre los componentes estructurales es algo que se escapa del alcance de este estudio. No es posible hacerlo con los datos obtenidos en un ensayo dinámico. Para profundizar en ello serían necesarios estudios como los antes mencionados para el caso de la levantada, así como el desarrollo de modelos de elementos finitos.

6.3. Análisis de la respuesta temporal de los distintos pasos

En esta sección se realiza una presentación y un análisis cualitativo de los registros temporales correspondientes a cada uno de los tipos de paso, así como del registro correspondiente al tramo de movimiento completo. Las magnitudes de interés a observar son varias. Por una parte, en función del tipo de movimiento, los registros de aceleraciones se verán afectados por la orientación que tenga el sensor. Esto quiere decir que, dependiendo del tipo de paso existirá un tipo de movimiento dominante, transversal, longitudinal o vertical. Esta información puede observarse fácilmente contrastando las lecturas simultáneas de 3 acelerómetros colocados en un punto de medida. Esto nos va a ayudar a comprender el comportamiento del Paso según que movimiento esté realizando.

Por otra parte, como se apuntaba en 4, el número de ciclos aportados al algoritmo de resolución para ensayos de este tipo es importante. Es conveniente que los registros tengan una duración elevada. La duración de los registros obtenidos será también objeto de análisis en este apartado.

Finalmente, se pondrá atención a los armónicos que se puedan identificar en las evoluciones temporales. Como se comentó en 4, es posible para este tipo de ensayos obtener respuestas que se deban, no a modos de vibración propios de la estructura, sino a los armónicos presentes en las cargas aplicadas. Este tipo de deformadas se conoce como deformadas operacionales, y en este caso estarán relacionadas con el ritmo del paso que llevan los costaleros al moverse. Es de esperar encontrar distintos armónicos en los distintos tipos de pasos registrados. En principio, para un sistema estructural convencional sometido a cargas aleatorias, la aparición de armónicos en ensayos modales operacionales puede resultar indeseable, ya que pueden confundirse con modos de deformación de la estructura, y por tanto, atribuirse propiedades a ésta que no posee. La deformación operacional no es una propiedad de la estructura sino del tipo de carga aplicada. Para solventar dicho inconveniente existen métodos de detección de armónicos.

Para el caso de estudio no es tan relevante poder diferenciar entre modos operacionales y deformadas operacionales. Esto se debe a que el sistema solo va a trabajar bajo una carga muy definida, las que ejercen los costaleros. Si bien estas cargas son desconocidas, van a estar siempre vinculadas al funcionamiento del sistema, por lo que las deformadas operacionales van a estar presentes siempre, y pueden tener más peso que los modos propios del sistema en cuanto a la definición de la respuesta ante las cargas aplicadas. Aun así, será interesante para profundizar en el comportamiento del sistema conocer la naturaleza de las deformadas obtenidas. En esta sección se pone atención a los armónicos observables en las evoluciones temporales, y a cómo éstos varían entre los distintos tipos de pasos. El análisis de armónicos y deformadas operacionales se retoma en la sección 6.6.

6.3.1. Paso Normal

Los mayores valores registrados de aceleración aparecen en el sensor vertical. Como se vio en la sección 5.1 el tramo de paso normal presenta los registros más cortos. En concreto, éste no llega a 12 segundos, lo que, unido al tipo de respuesta obtenido con un armónico marcado de aproximadamente 1Hz , proporciona unos 10 ciclos completos para el análisis. Como se justificará posteriormente, este número de ciclos resulta crítico en un ensayo de estas características. En la figura 31 se pudo observar un zoom del registro del sensor de referencia 2, que esté orientado longitudinalmente. Se ve claramente el periodo aproximado de 1 segundo que contiene la señal. La frecuencia del paso humano es de ese orden, por lo que es probable que se trate de una respuesta a un armónico.

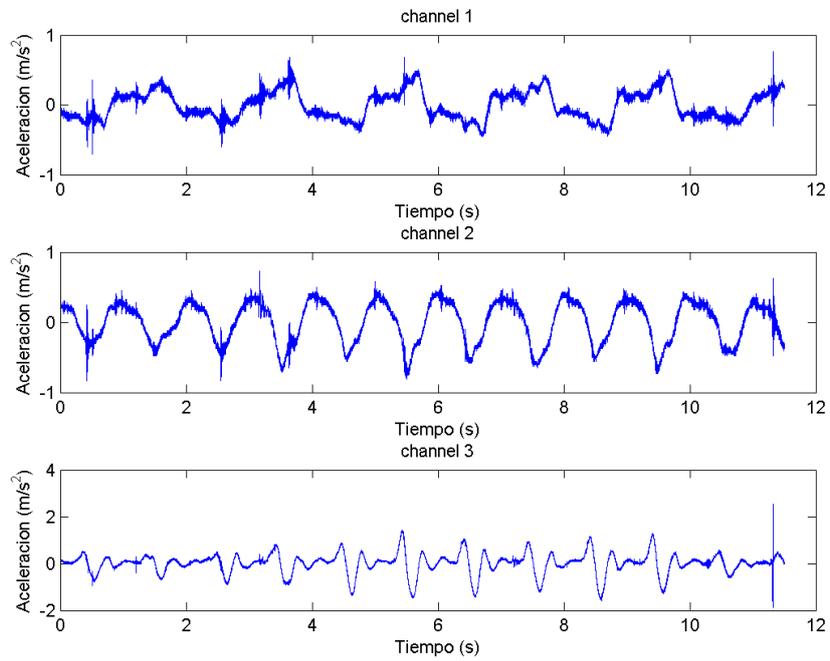


Figura 30: Paso normal. Canales de referencia. De arriba a abajo, orientación transversal, longitudinal y vertical. Configuración 1.

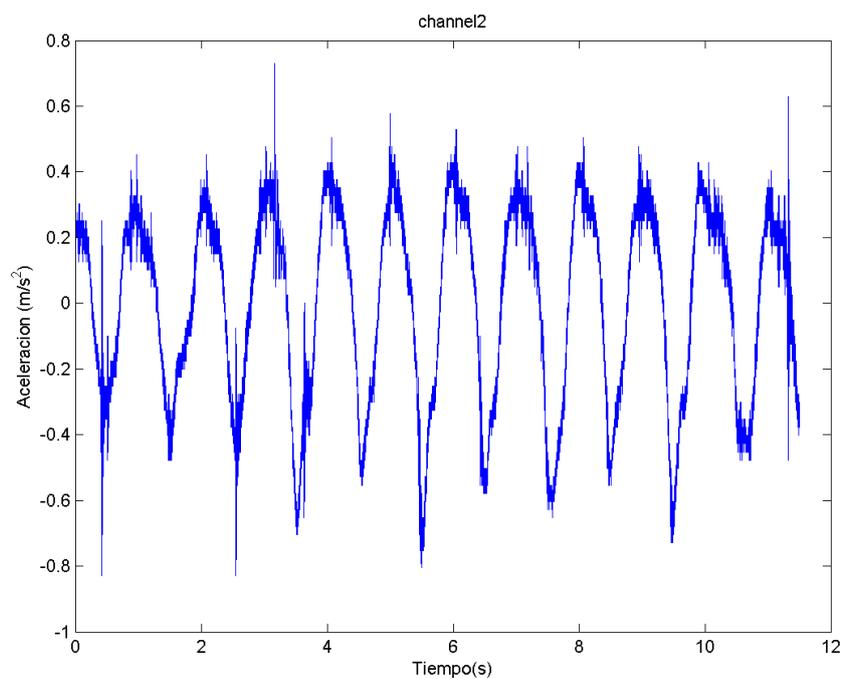


Figura 31: Paso normal. Canal de referencia 2. Orientación longitudinal. Configuración 1.

6.3.2. Paso lento

En este tipo de paso el sensor colocado en dirección transversal realiza una lectura más limpia, y registra las máximas aceleraciones (Figura 32). La duración de este registro es del orden de 22 segundos, casi el doble que en el caso del paso normal. Los armónicos que se pueden identificar a simple vista vuelven a ser del orden de 1 Hz. En la figura 33 se observa una imagen ampliada del primero de los sensores donde se puede ver con claridad dicho armónico.

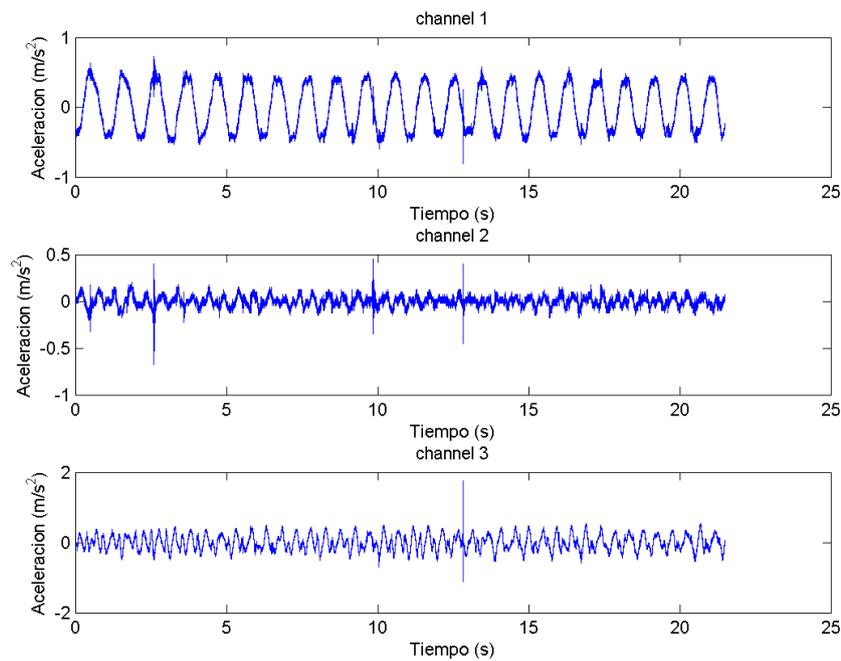


Figura 32: Paso lento. Canales de referencia. De arriba a abajo, orientación transversal, longitudinal y vertical. Configuración 1.

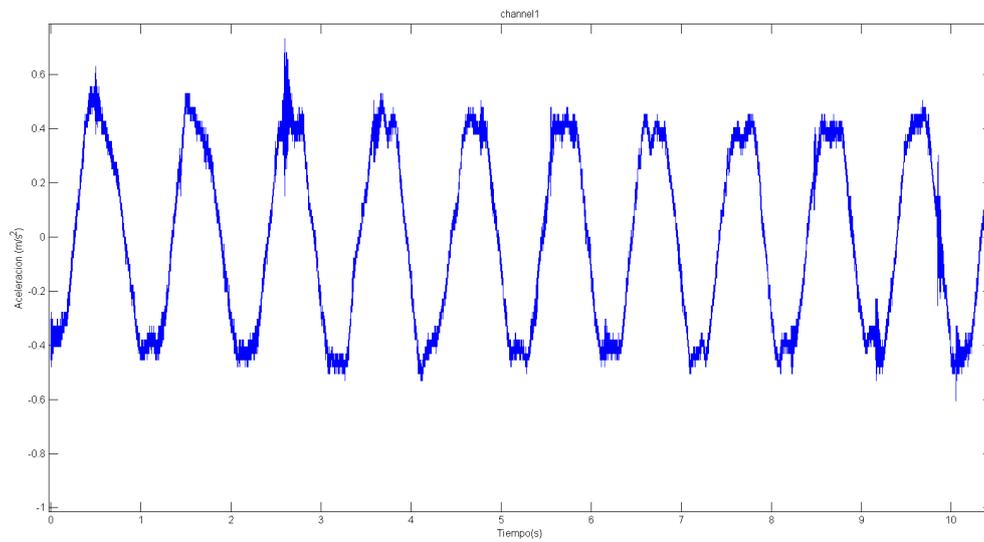


Figura 33: Paso lento. Canal de referencia 1. Orientación transversal. Configuración 1.

6.3.3. Paso Agachado

En este caso, el registro temporal es más homogéneo entre las distintas orientaciones. Los 3 sensores ofrecen una respuesta bien definida y del mismo orden de magnitud. La duración de este registro es de 17 segundos. Los sensores con orientaciones transversal y longitudinal presentan armónicos con frecuencias de 3/2 y 1 Hz respectivamente. En el caso del sensor vertical se observa una frecuencia de mayor valor, del orden de 5/2 Hz. Pueden tratarse del mismo, aunque esto no es posible saberlo con solo observar las gráficas. Los registros pueden observarse en las figuras 34, 35, y 36. Es comprensible que para este tipo de paso, que es en el que el sistema se desplaza más lentamente, los ritmos de pasos de los costaleros disminuyan sensiblemente y el valor de los armónicos registrados haga lo propio.

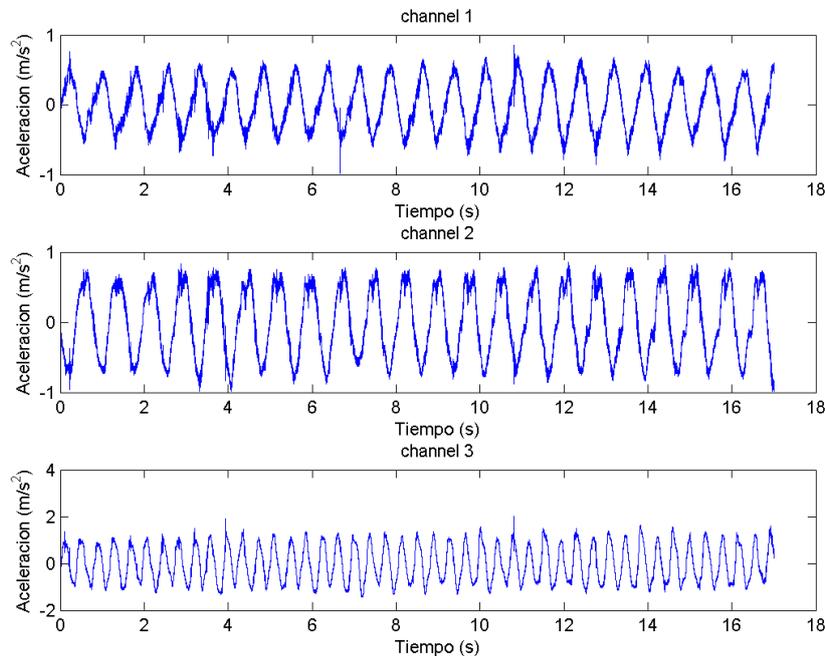


Figura 34: Paso Agachado. Canales de referencia. De arriba a abajo, orientación transversal, longitudinal y vertical. Configuración 1.

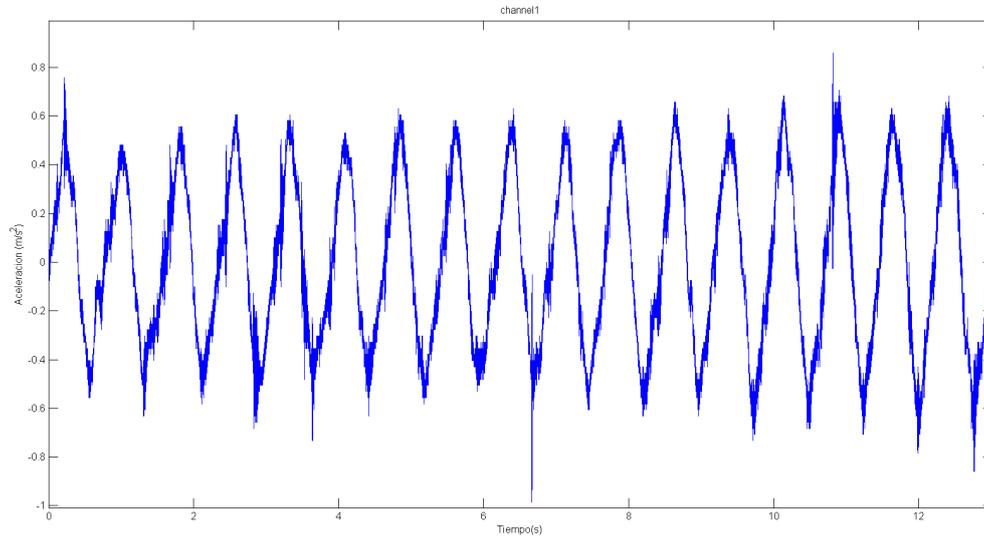


Figura 35: Paso agachado. Canal de referencia 2. Orientación Transversal. Configuración 1.

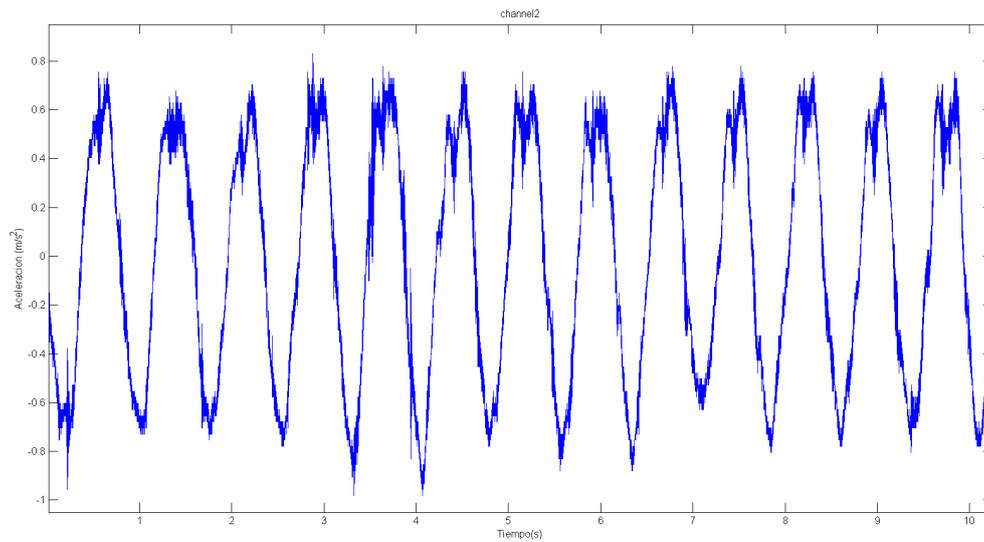


Figura 36: Paso agachado. Canal de referencia 2. Orientación longitudinal. Configuración 1.

6.3.4. Giro

Observando la figura 37 se ve que, en los tramos de giro, las lecturas de los sensores transversales son las que aportan una información más clara. Esto tiene sentido si lo comparamos con la experiencia visual de ver al paso girando, donde el movimiento más notable es un balanceo lateral. En lo que respecta al tiempo de medida, los giros son los tramos que más longitud de registro, y por tanto, de ciclos recogidos presentan. Esto repercutirá positivamente en el análisis como se verá posteriormente en las secciones 6.5 y 6.6. En concreto este registro supera los 85 segundos de duración. En la figura 38 se puede observar que el armónico dominante en el registro del sensor dispuesto transversalmente es aproximadamente 1.3 Hz.

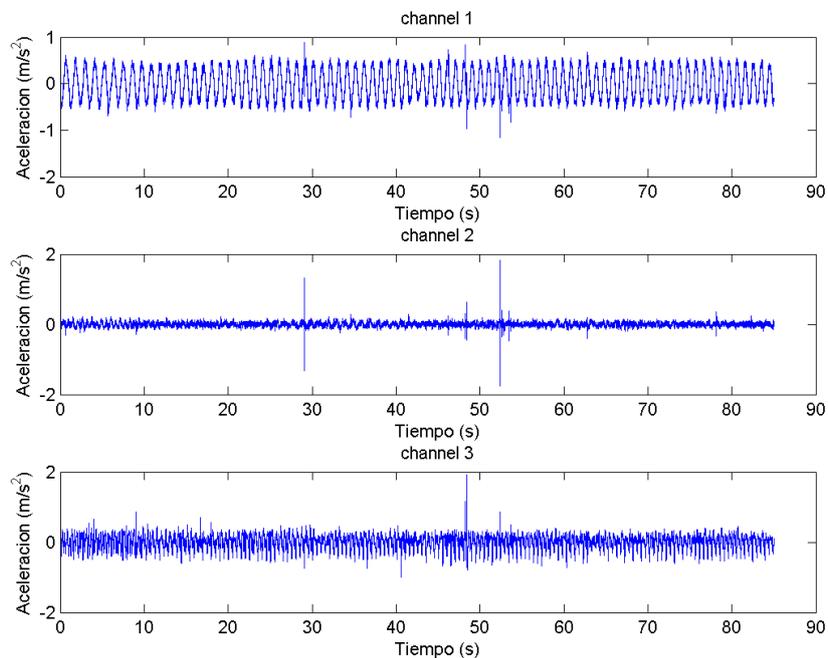


Figura 37: Giro. Canales de referencia. De arriba a abajo, orientación transversal, longitudinal y vertical. Configuración 1.

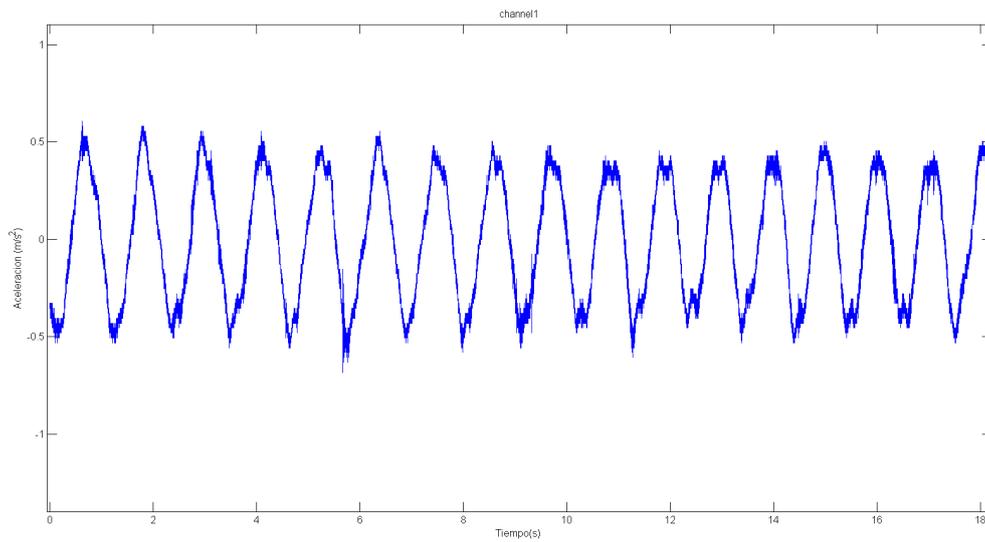


Figura 38: Giro. Canal de referencia 2. Orientación Transversal. Configuración 1.

6.3.5. Tramos completos

En la figura 39 se representa el registro temporal de los 3 acelerómetros de referencia de un tramo de movimiento al completo en la configuración 1. En estos tramos están incluidos todos los tipos de pasos analizados previamente. En la sección 6.6 se analizarán los resultados de considerar estos tramos al completo para el análisis dinámico, y se compararán con los obtenidos al analizar los tipos de paso concretos.

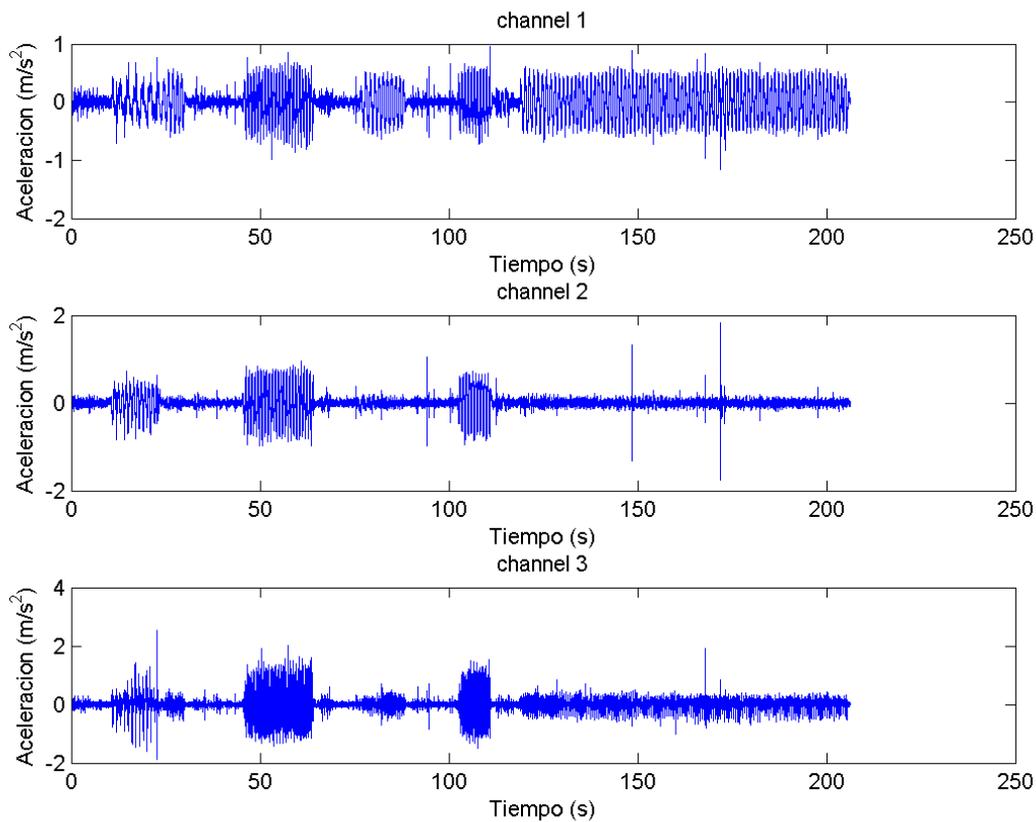


Figura 39: Tramos completos. Canales de referencia. De arriba a abajo, orientación transversal, longitudinal y vertical. Configuración 1.

6.4. Análisis contenido en frecuencia de la señal de las bandas

En esta sección se realiza un análisis de la respuesta de las bandas en el dominio de la frecuencia. En concreto se presentan los resultados de la banda 1, colocada en la costilla cercana al punto de medida 13, como se observa en la figura 1. En las figuras 40, 41, 42 y 43 se presentan los resultados de las densidades espectrales para los registros de la banda 1 en la configuración 2. Estas gráficas dan una idea de las frecuencias más relevantes. Como se puede observar, el rango donde aparecen estas frecuencias va de 0 a 15 Hz. En los casos de Paso normal y paso agachado las frecuencias relevantes aparecen en serie, con intensidades decrecientes y equidistantes. Esto indica que posiblemente se traten de armónicos. Si bien la información que aportan las bandas es limitada, es una buena referencia con vista a los resultados obtenidos con los algoritmos de resolución. Es de esperar por tanto la obtención de frecuencias dominantes en torno a ese rango de frecuencias, y también la aparición de armónicos en la respuesta del sistema. En la sección 6.6 se confirmarán estos resultados.

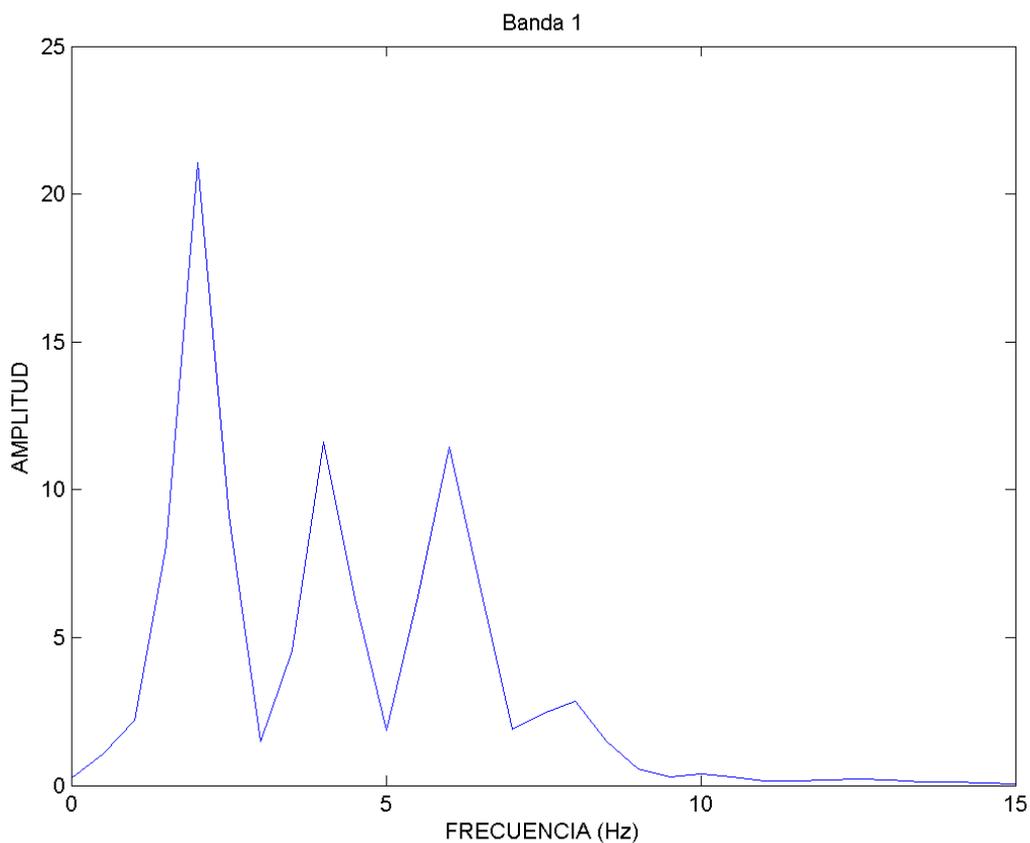


Figura 40: Paso normal. Respuesta en frecuencia de la Banda 1. Configuración 2

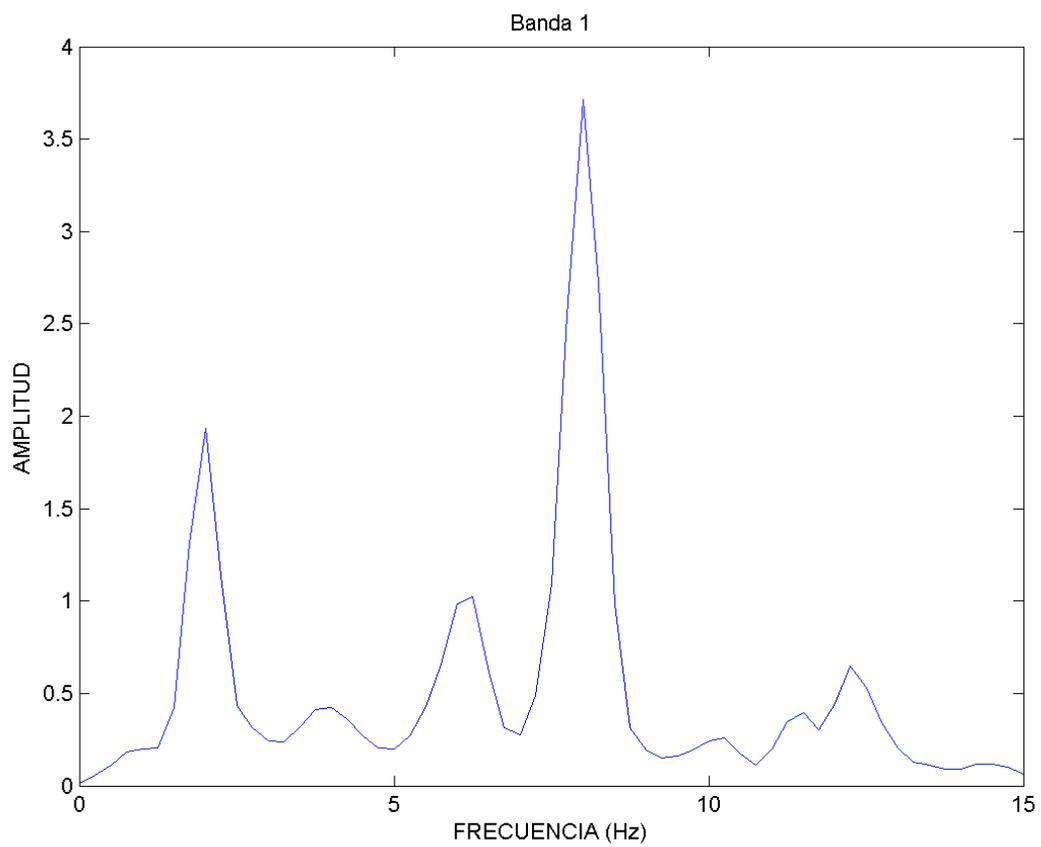


Figura 41: Paso lento. Respuesta en frecuencia de la Banda 1. Configuración 2

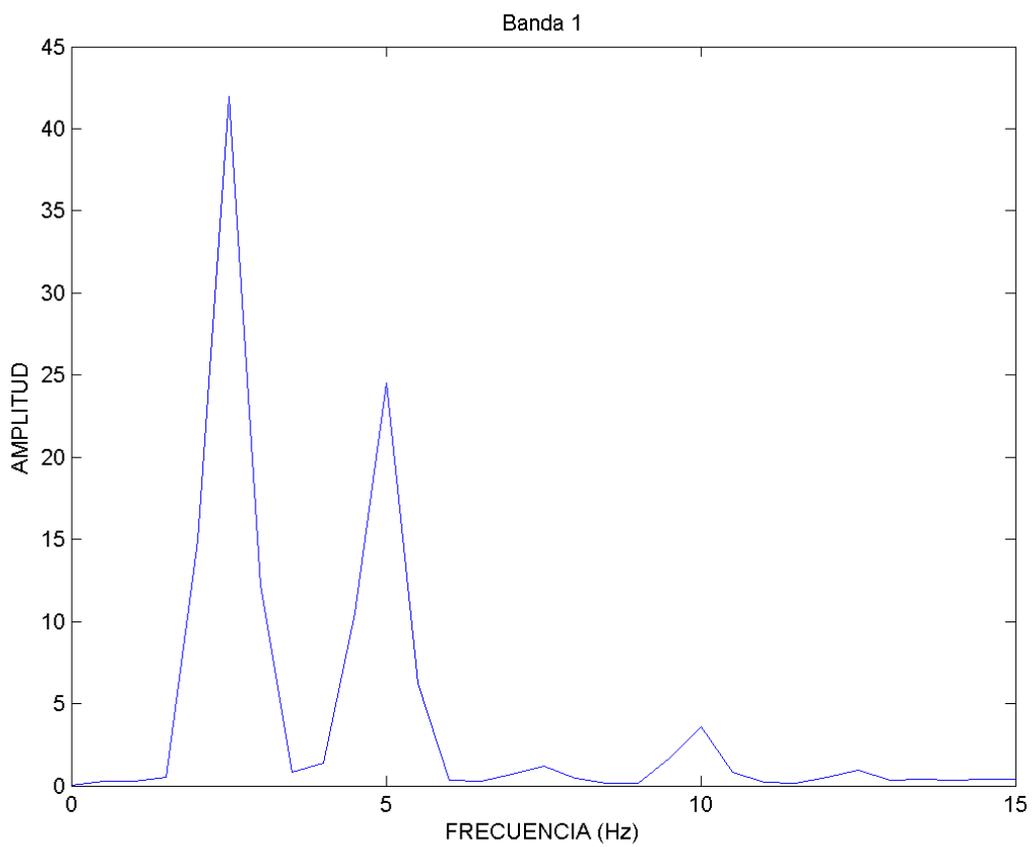


Figura 42: Paso agachado. Respuesta en frecuencia de la Banda 1. Configuración 2

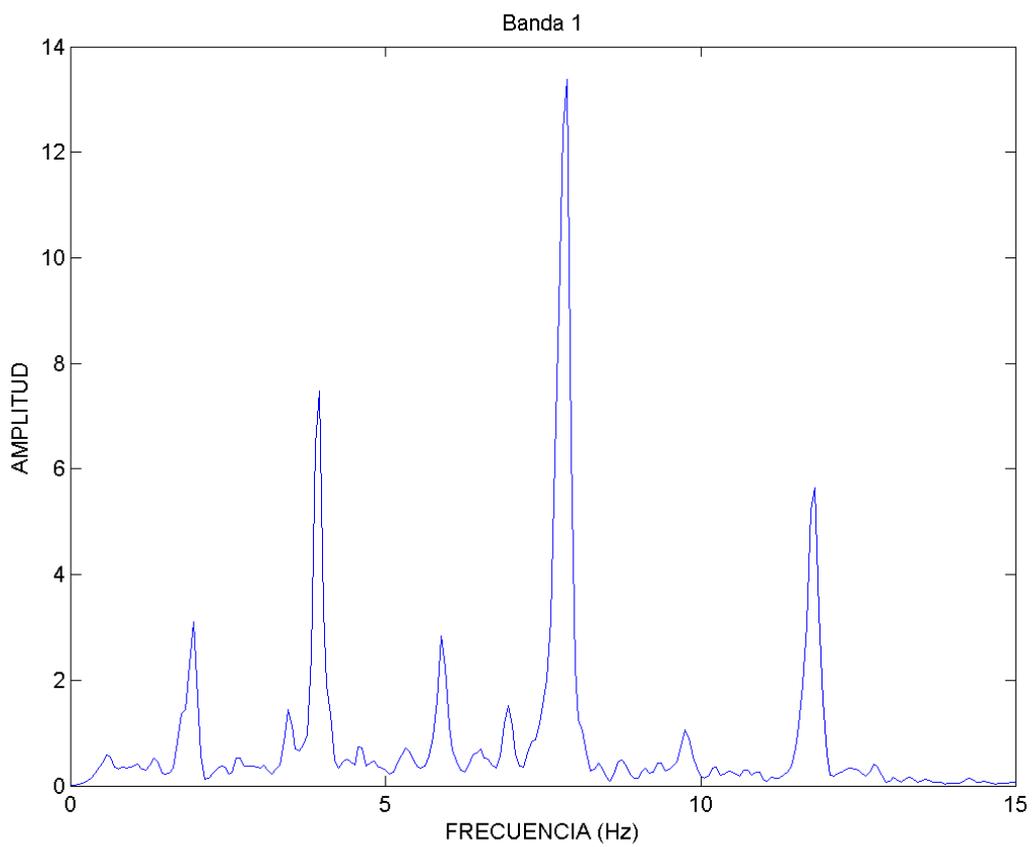


Figura 43: Giro. Respuesta en frecuencia de la Banda 1. Configuración 2

6.5. Análisis de diagramas de estabilización

En la resolución aplicando el algoritmo SSI se generan diagramas de estabilización donde se ajustan los polos matemáticos en torno a unos valores de frecuencia. En función de la distribución y densidad de los polos se pueden identificar las frecuencias naturales del sistema estudiado, y de este modo, encontrar las deformadas asociadas a dichas frecuencias. De la adecuación del algoritmo para el sistema bajo estudio, así como de la cantidad y calidad de los datos registrados depende la definición de los diagramas de estabilización. Un diagrama bien definido es aquel cuyos polos están alineados para un gran número de ordenes de resolución sobre las frecuencias naturales, formando líneas continuas. En el caso de tener diagramas dispersos, los polos se reparten de manera más homogénea a lo largo del espectro, habiendo más incertidumbre de esta manera para señalar las frecuencias naturales. Resulta ilustrativo analizar los diagramas obtenidos para los distintos tipos de paso.

En las figuras 44, 45, 46 y 47 se muestran los diagramas para los pasos de giro, paso normal, paso lento y paso agachado respectivamente. También se representan en dichas figuras los valores de las densidades espectrales, que da información del contenido en frecuencia de cada configuración. El diagrama correspondiente al giro es el que presenta una menor dispersión, observándose líneas de polos claramente definidas en torno a las frecuencias de 2, 6 y 8 Hz. Es notorio como, para los tres casos restantes, los diagramas contienen mucha más dispersión, dificultando la identificación de frecuencias. El caso más desfavorable es el que corresponde al paso normal. Esta circunstancia está relacionada con los tiempos de registros obtenidos de cada paso. Como se vio en la sección 6.3, los registros obtenidos para los casos de giro eran los más largos, del orden de 80 segundos, mientras que los asociados al paso normal eran los más cortos, del orden de 12 segundos. Como se comentó anteriormente, los algoritmos empleados para la resolución de este tipo de sistemas demandan una gran cantidad de ciclos de registros. Este es un ejemplo de cómo unos registros insuficientes afectan a la hora de ajustar resultados. Para el caso tratado, resulta difícil obtener registros largos para pasos de avance ya que el área de ensayo, el interior de la Basílica, tiene una longitud limitada. En lo que respecta a los pasos lento y agachado, sería posible haberlos reproducido por más tiempo, siempre y cuando la maniobra fuese asumible por los costaleros por periodos más largos. En el caso del paso normal, para haber obtenido registros de mayor longitud el ensayo debería haberse realizado en un lugar con mayor distancia en línea recta disponible. Esto no es algo trivial para el tipo de sistema que estamos analizando, pero se ha de tener en cuenta para futuras experiencias.

En lo que respecta a las frecuencias identificadas para estos ejemplos, vuelven a aparecer armónicos, que se identifican con facilidad al ver que las frecuencias halladas resultan múltiplos de otras halladas con anterioridad. Esto se confirmará en la siguiente sección comprobando los modos asociados a las distintas frecuencias, ya que si se tratan deformadas operacionales tendrán la misma forma aunque estén asociadas a distintas frecuencias.

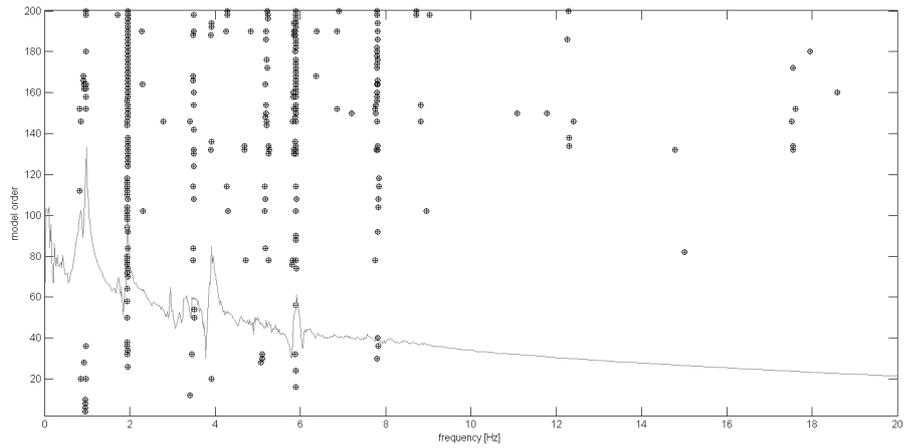


Figura 44: Diagrama estabilización giro Configuración 2.

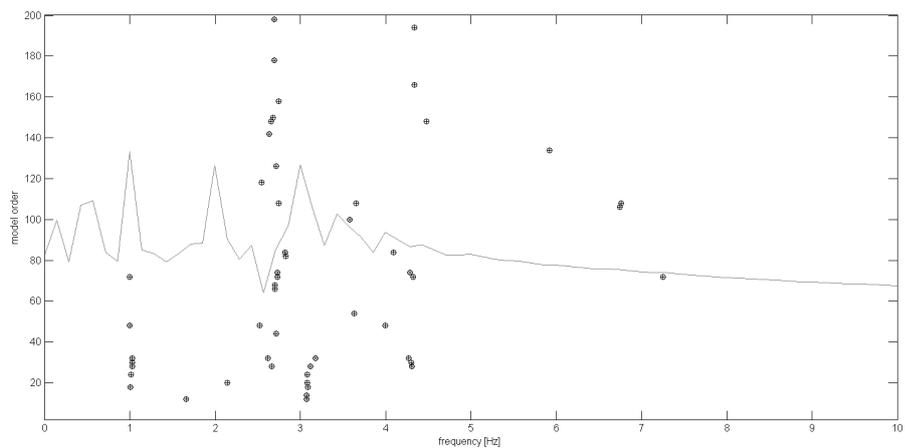


Figura 45: Diagrama estabilización paso normal. Configuración 2.

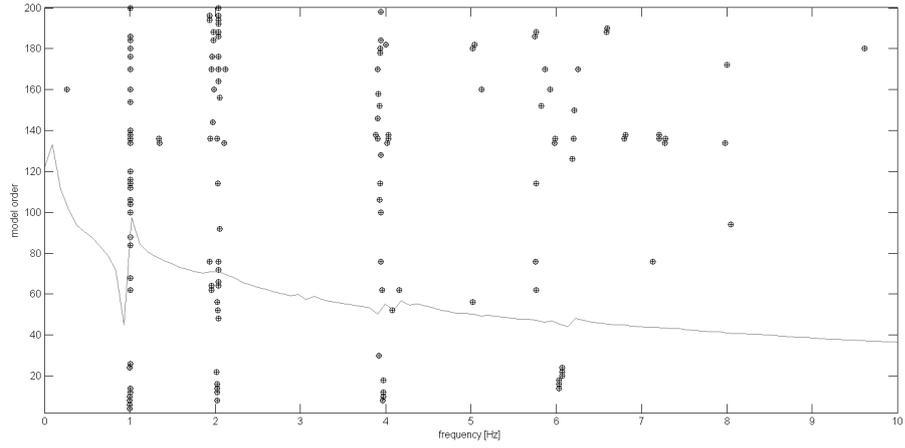


Figura 46: Diagrama estabilización paso lento. Configuración 2.

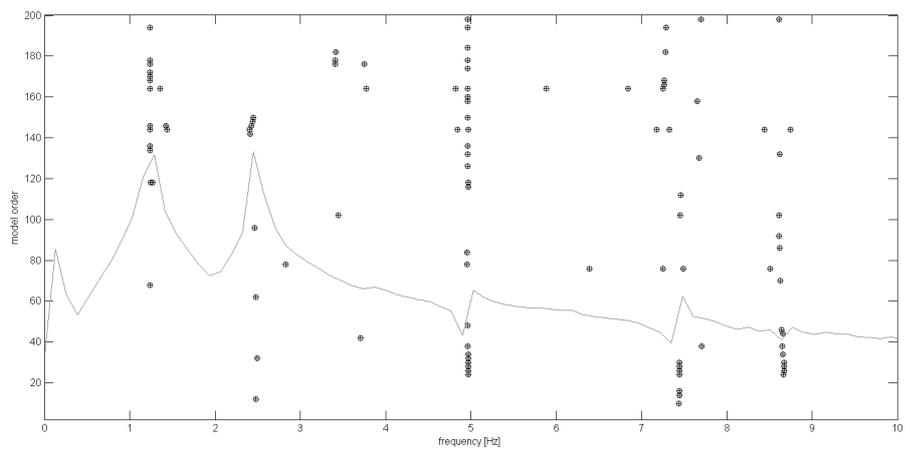


Figura 47: Diagrama estabilización paso agachado Configuración 2.

6.6. Identificación de modos y frecuencias para cada tipo de paso

En esta sección se presentan las frecuencias seleccionadas en los diagramas de estabilización, así como las deformadas asociadas a dichas frecuencias. Todo se hace de manera individual para cada tipo de paso, y finalmente de manera global para un tramo de movimiento completo. También se estudia, para cada uno de los casos, los valores del MAC, lo que va a dar una idea de cómo de relacionados están entre sí los modos hallados en cada uno de los distintos tipos de paso. Esto será determinante para concluir si realmente se tratan de modos de deformación asociados al sistema, o si se tratan de deformadas operacionales debidas a armónicos. La estructura de cada sección será presentar primero deformadas y frecuencias asociadas y a continuación el valor del MAC que relaciona dichas deformadas. En la sección 6.7 se realizará una síntesis de los resultados encontrados y se analizan las deformadas encontradas desde una perspectiva global.

6.6.1. Modos y frecuencias: Paso Normal

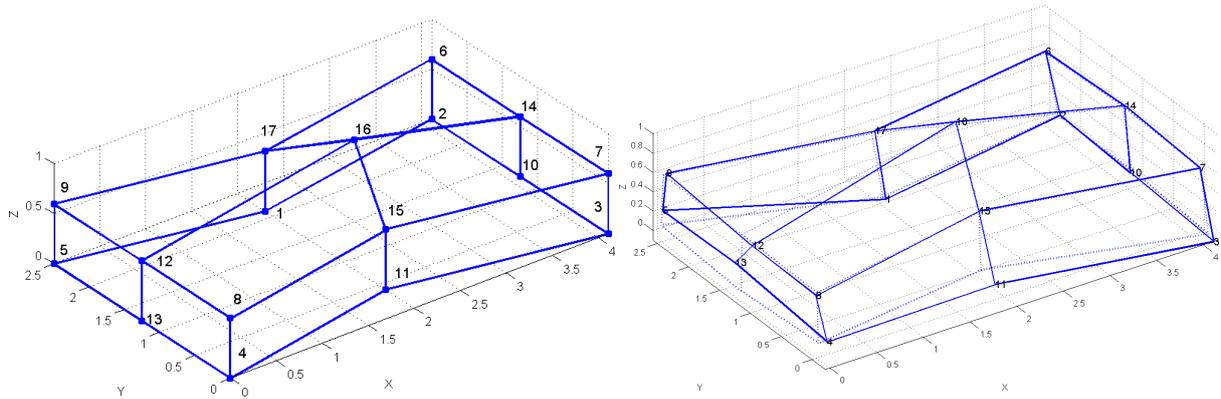


Figura 48: Paso Normal. Deformada asociada a la frecuencia de 1.2 Hz.

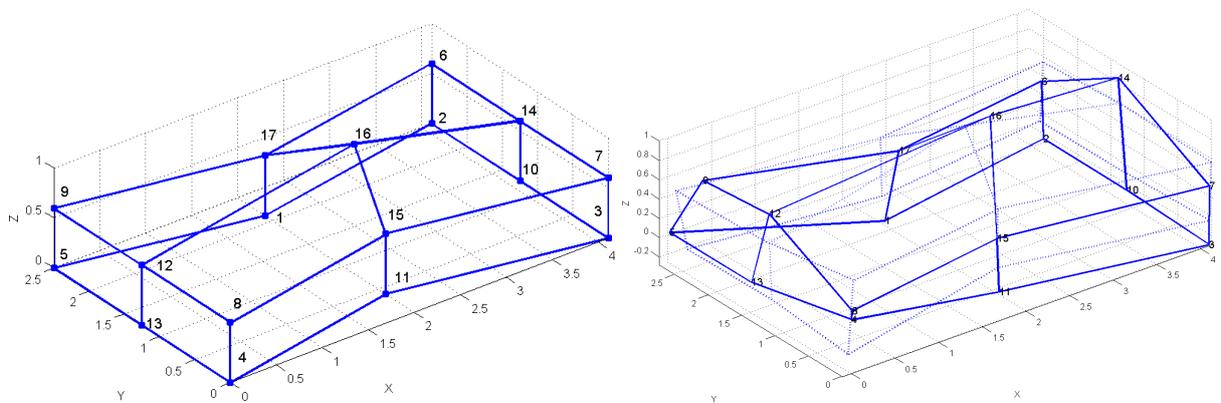


Figura 49: Paso normal. Deformada asociada a la frecuencia de 2,8 Hz.

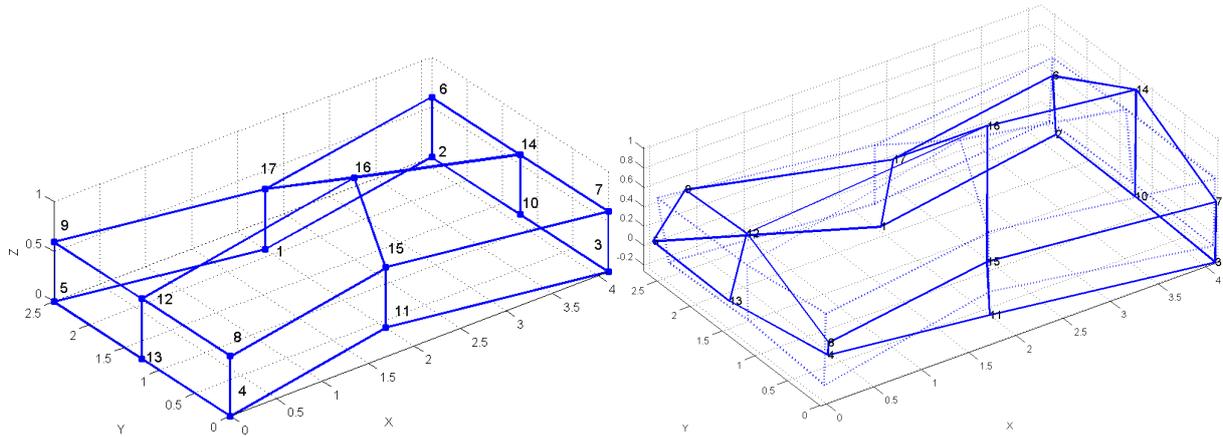


Figura 50: Paso normal. Deformada asociada a la frecuencias de 3.01 Hz.

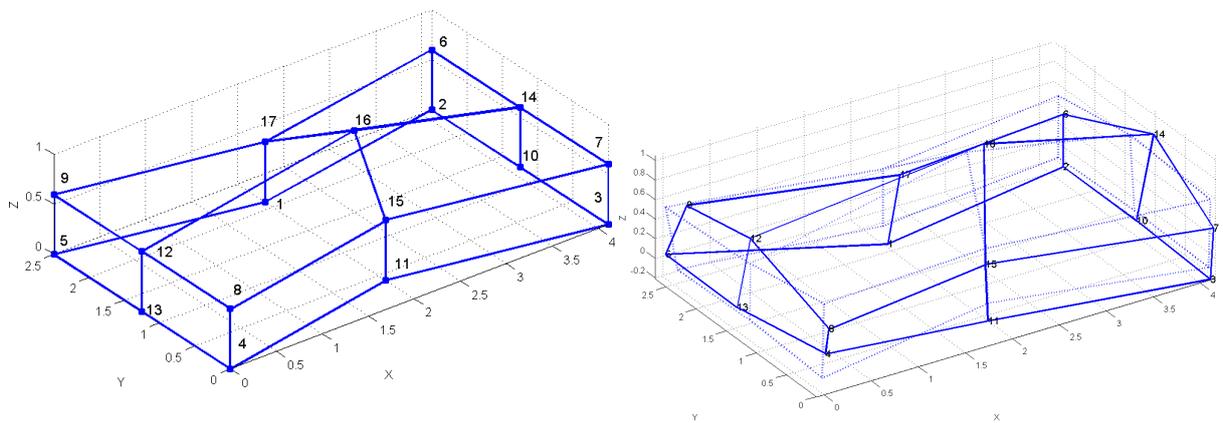


Figura 51: Paso normal. Deformada asociada a la frecuencia de 3,34 Hz.

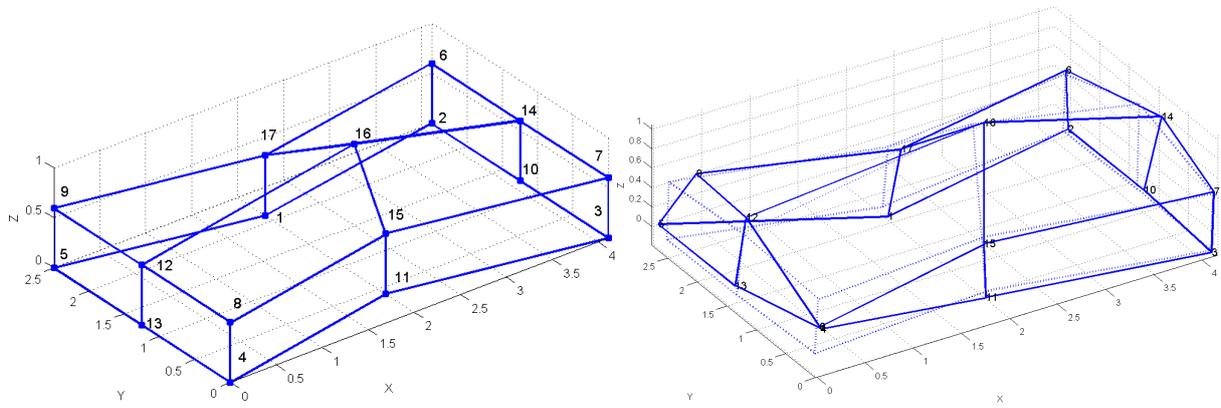


Figura 52: Paso normal. Deformada asociada a la frecuencia de 4,02 Hz.

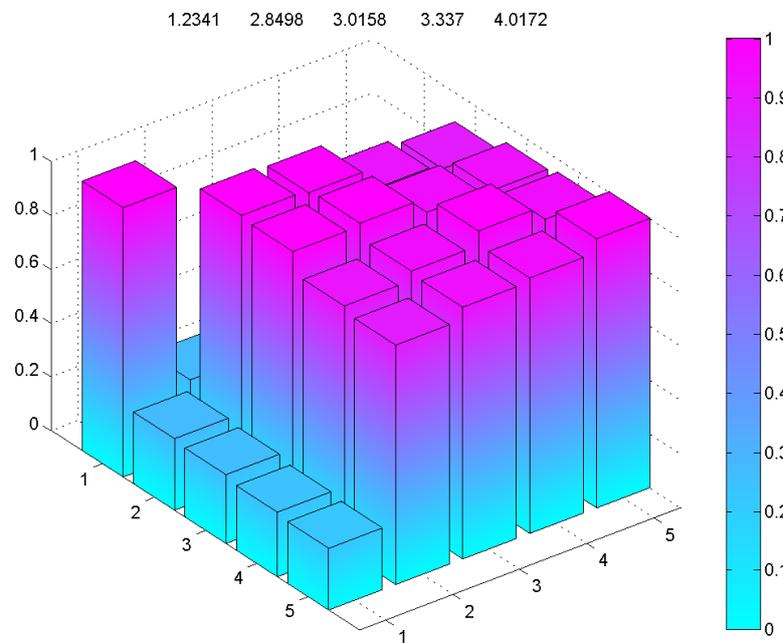


Figura 53: Paso normal. MAC para deformadas seleccionadas

Las frecuencias seleccionadas se encuentran, como indicaban las densidades espectrales de las bandas piezoeléctricas, dentro del intervalo de 0 a 10 Hz. Al observar el MAC se puede ver cómo realmente, a pesar de haber seleccionado 5 frecuencias diferentes, realmente están apareciendo solo 2 deformadas diferentes. Distintas frecuencias tienen asociada la misma deformación del sistema y, debido a la diferencia existente entre los valores de las frecuencias, se concluye que se tratan de modos operacionales, y por tanto, que estamos obteniendo deformadas operacionales.

6.6.2. Modos y frecuencias: Paso Lento

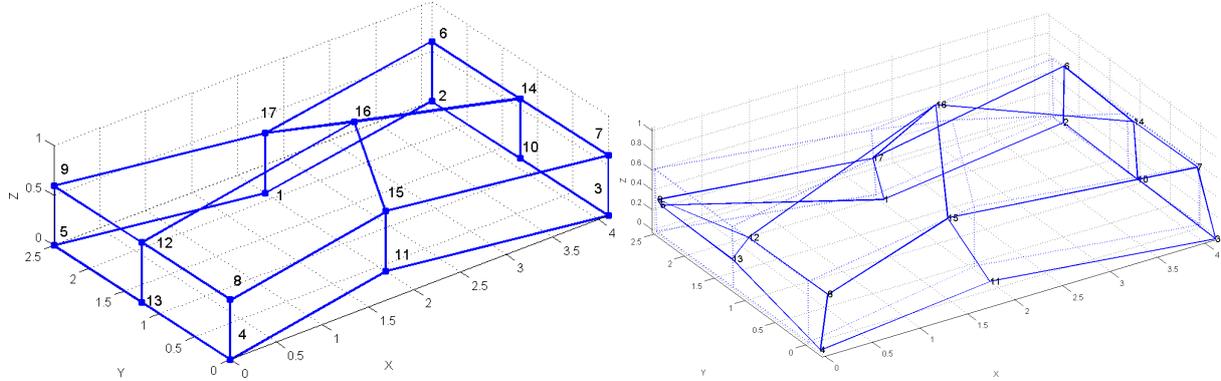


Figura 54: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 1 Hz.

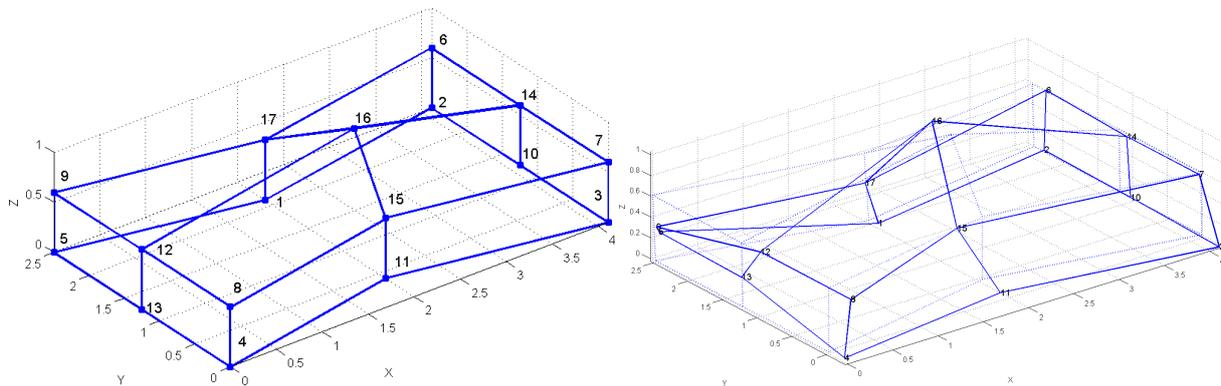


Figura 55: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 1.1 Hz.

Para el caso de los tramos de paso lento se encuentra un mayor número de polos estables, por lo que se obtienen más frecuencias. El valor de estas vuelve a estar entre 0 y 10 Hz aproximadamente. En lo que respecta a las relaciones entre las deformadas, encontramos una situación donde existe más independencia entre las mismas. Si se observa el MAC de la figura 62 se ve cómo los modos asociados a las frecuencias 1.013 y 1.016 son muy parecidos, y esto es de esperar debido al parecido valor entre las frecuencias. Se trata del mismo modo. En el caso de las frecuencias 2.042 y 4.060 vemos que poseen deformadas completamente equivalentes, ya que el valor cruzado de MAC es casi 1. Sin embargo, las frecuencias tienen valores muy distantes, y además, proporcionales. Esto indica que se trata de un modo operacional y de deformadas operacionales. La frecuencia asociada a 9.24 Hz también tiene asociada la misma deformada operacional, como lo indica los valores cruzados del MAC.

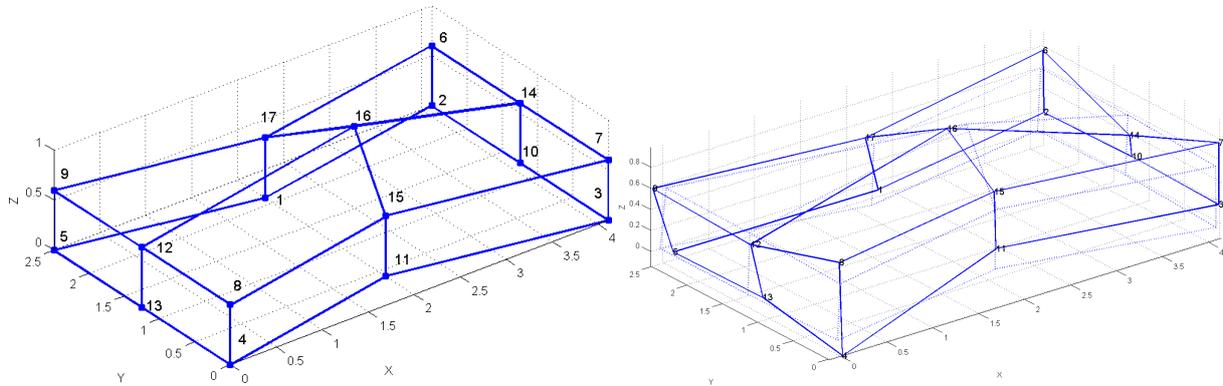


Figura 56: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 2.04 Hz.

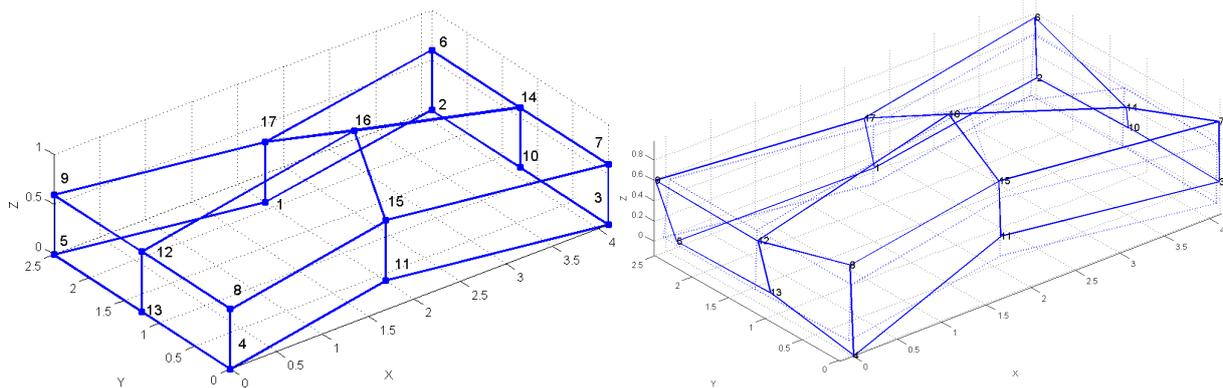


Figura 57: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 2.05 Hz.

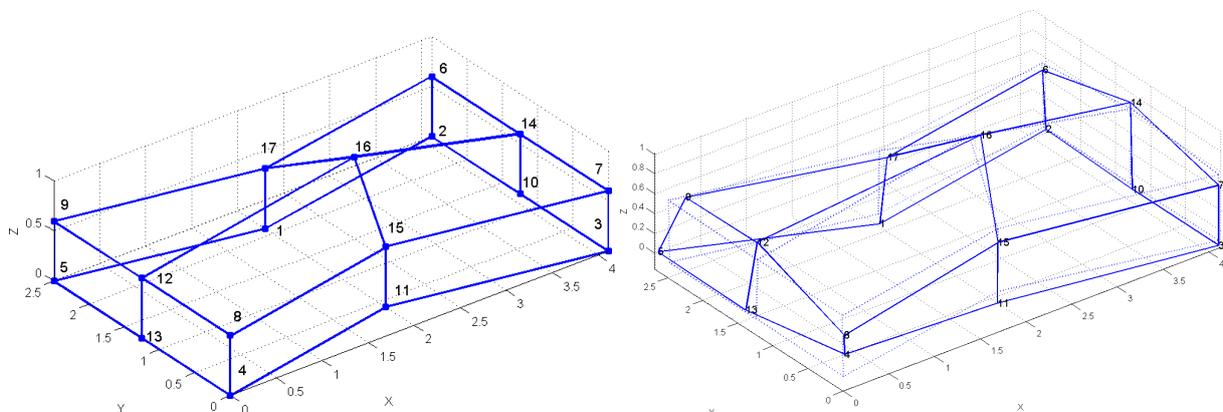


Figura 58: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 4.06 Hz.

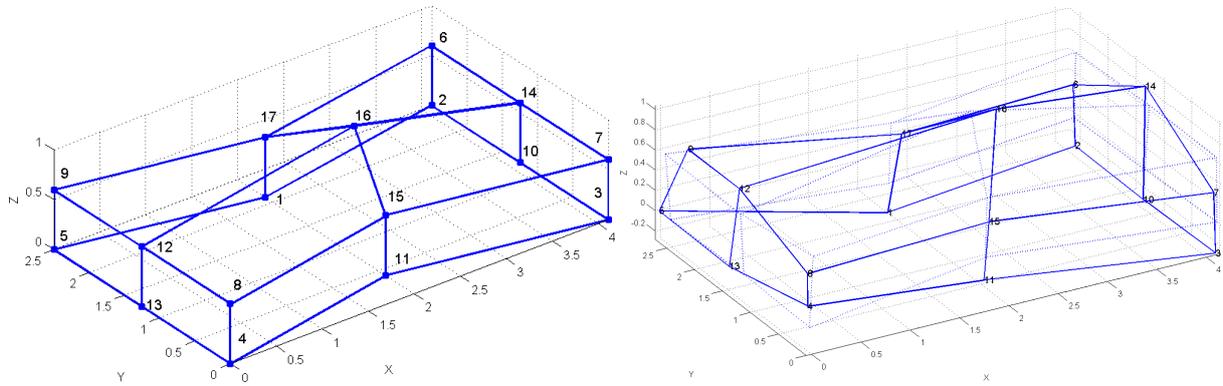


Figura 59: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 6.12 Hz.

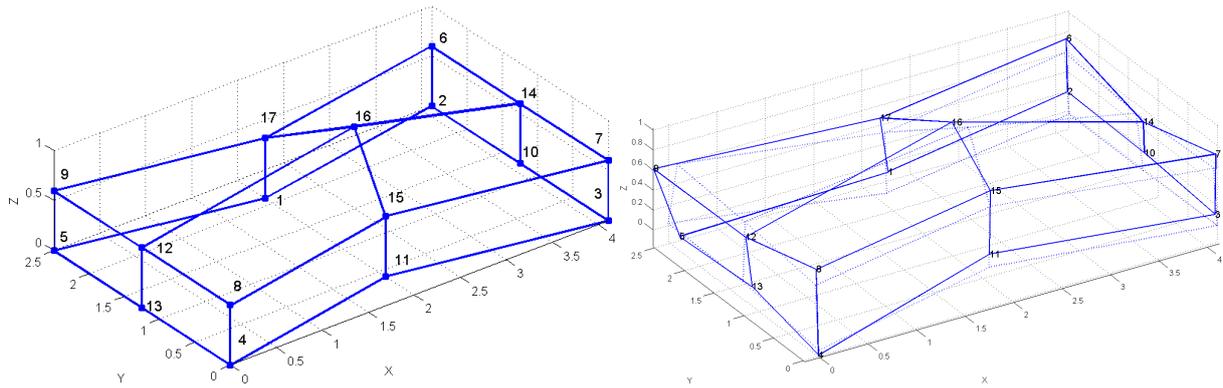


Figura 60: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 9.24 Hz.

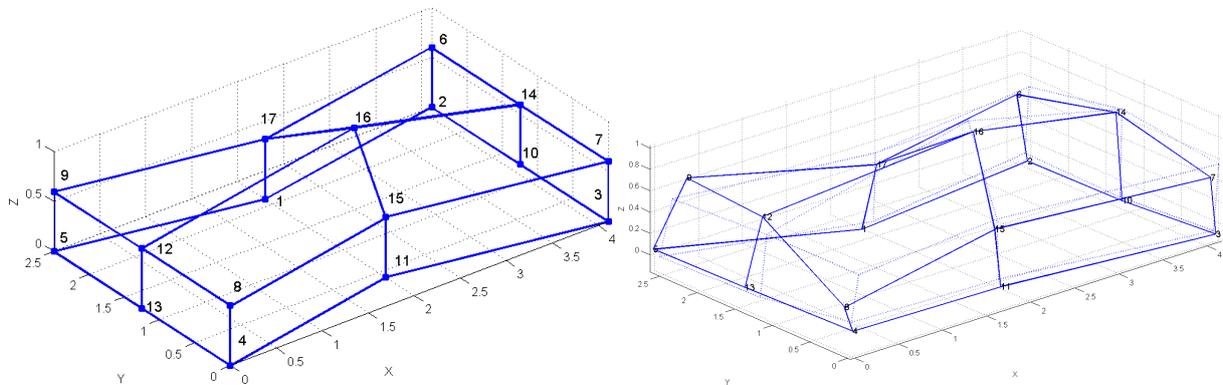
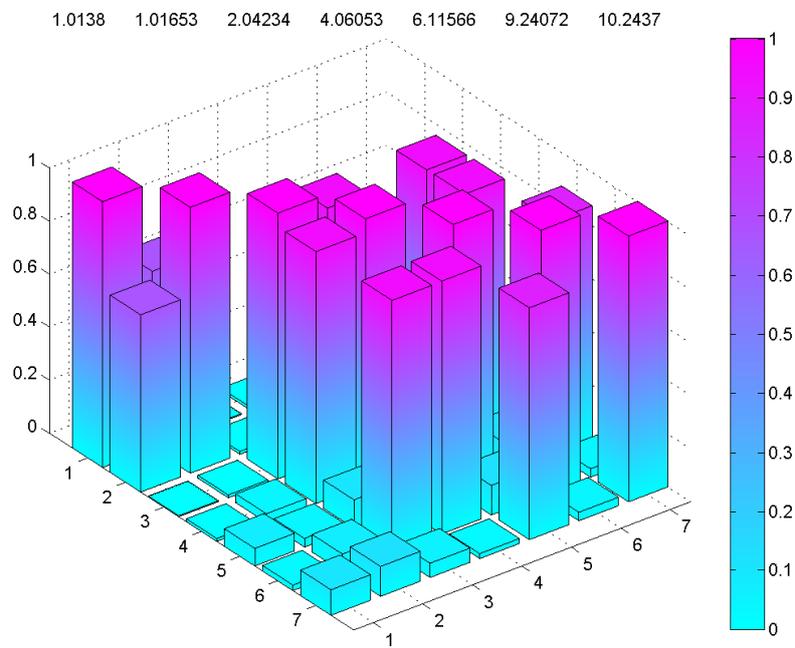


Figura 61: Paso lento. Deformada asociada a la frecuencia de 10.24 Hz.



Paso lento. MACModos seleccionados

Figura 62: Paso lento. MAC para deformadas seleccionadas

6.6.3. Modos y frecuencias: Paso agachado

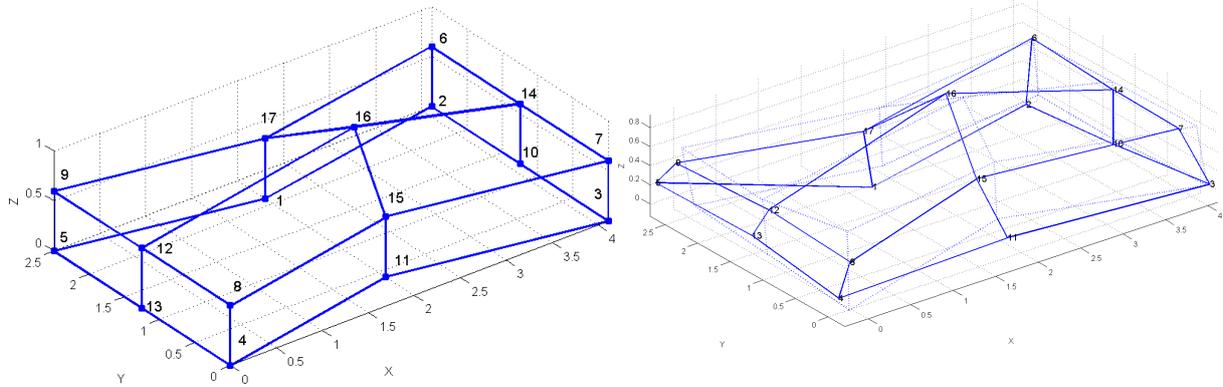


Figura 63: Paso agachado. Deformada asociada a la frecuencia de 1.2 Hz.

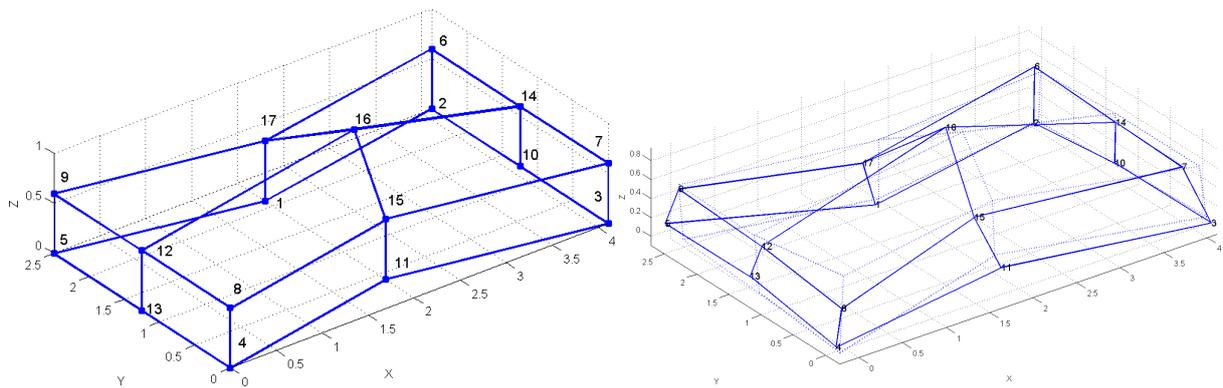


Figura 64: Paso agachado. Deformada asociada a la frecuencia de 1.3 Hz.

Analizando la figura 69 se observan 2 tipos de deformadas predominantes en este paso. Por un lado, la asociada a las frecuencias de 1.23 y 1.26, que tienen casi idéntica deformada. Y por otra parte, la asociada a las demás frecuencias, que son modos operacionales también con semejante deformada operacional.

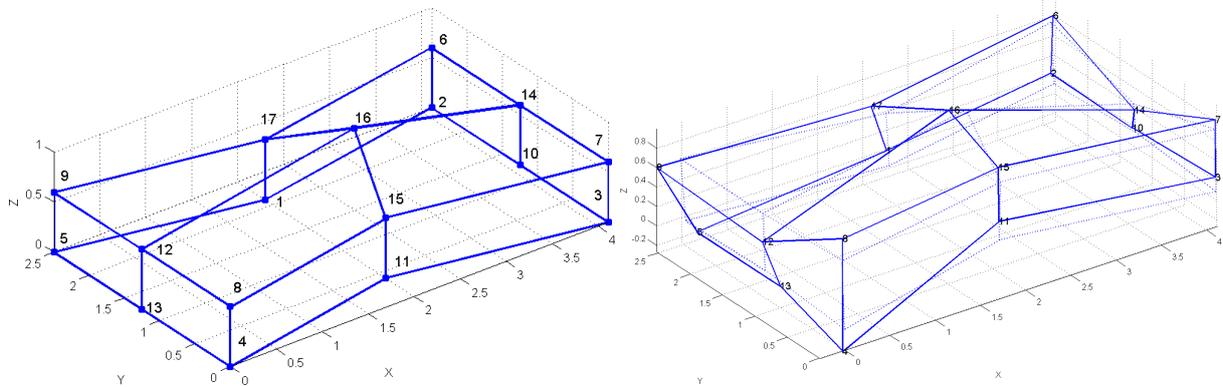


Figura 65: Paso agachado. Deformada asociada a la frecuencia de 2.45 Hz.

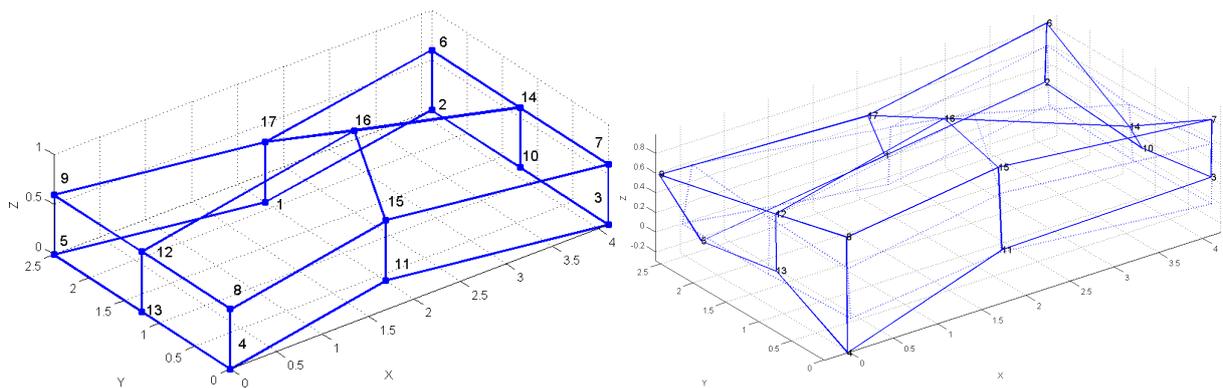


Figura 66: Paso agachado. Deformada asociada a la frecuencia de 3.1 Hz.

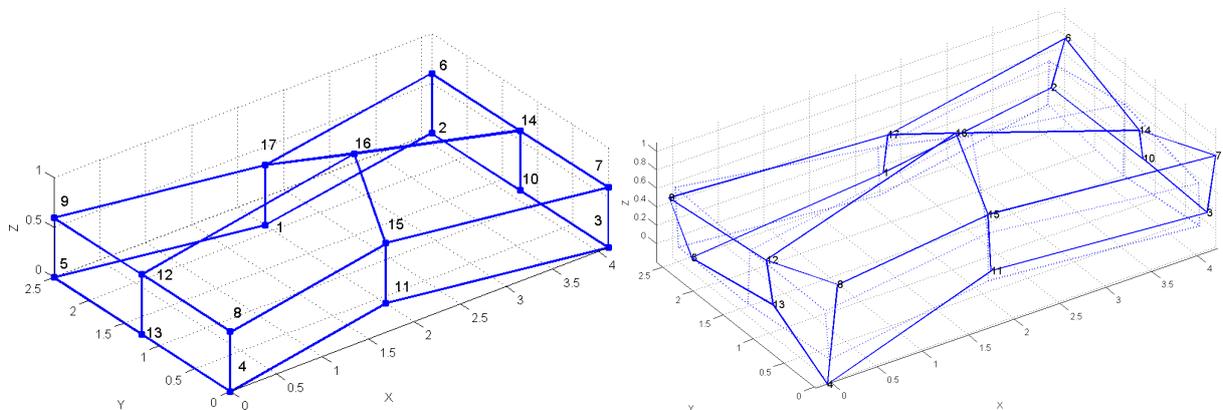


Figura 67: Paso agachado. Deformada asociada a la frecuencia de 4.59 Hz.

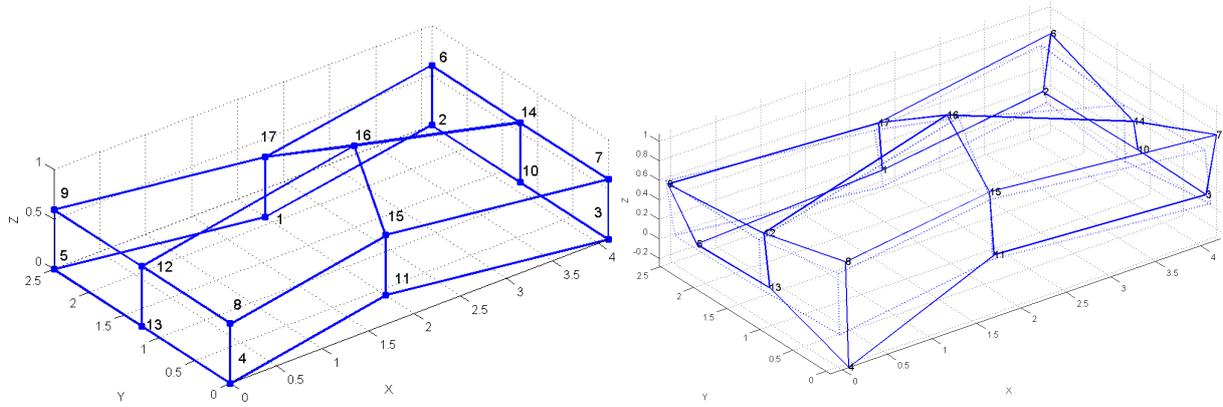


Figura 68: Paso agachado. Deformada asociada a la frecuencias de 4.92 Hz.

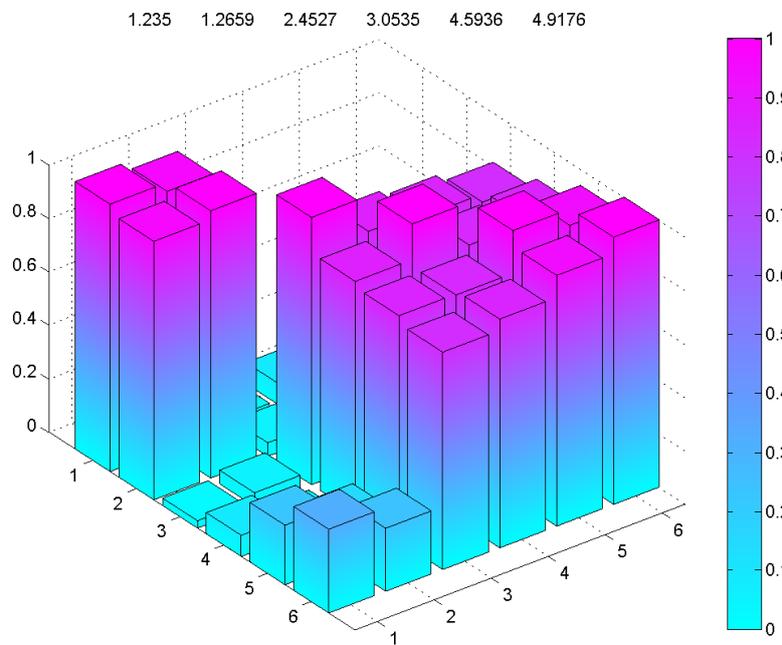


Figura 69: Paso agachado. MAC Deformadas seleccionadas

6.6.4. Modos y frecuencias: Giro

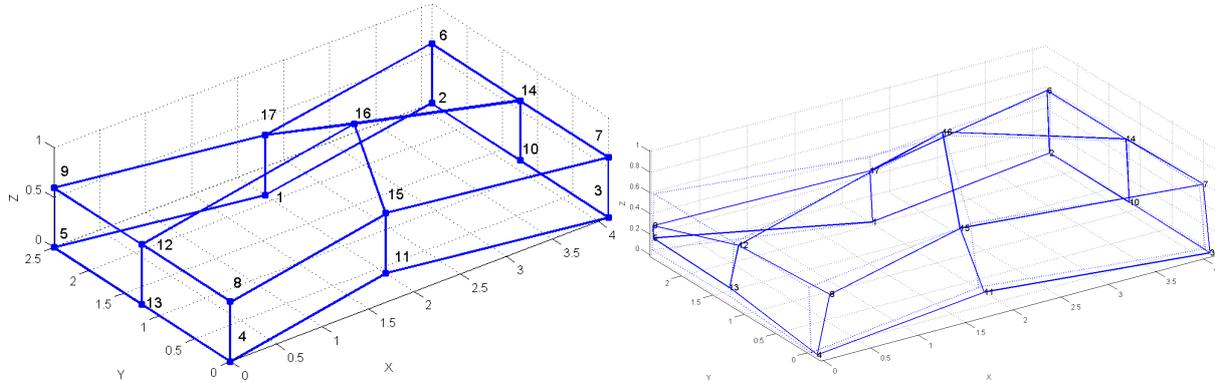


Figura 70: Giro. Deformada asociada a la frecuencia de 0.9 Hz.

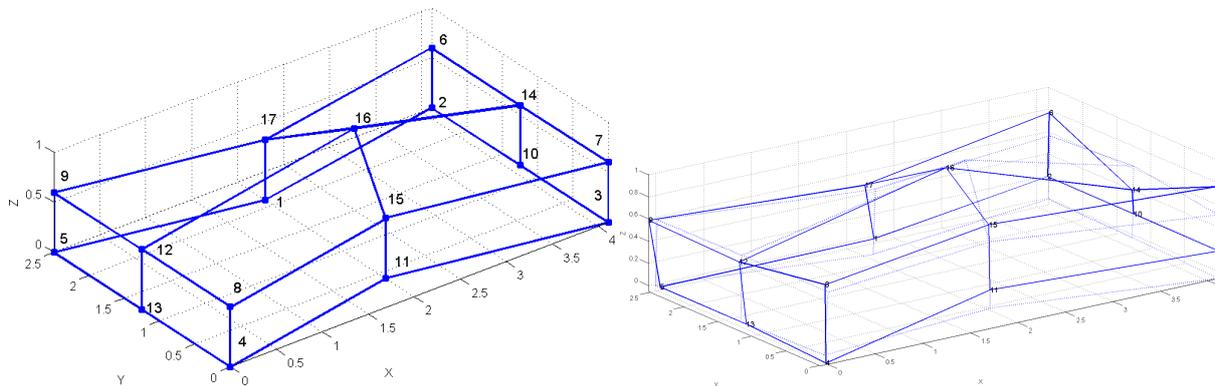


Figura 71: Giro. Deformada asociada a la frecuencia de 1.94 Hz.

En lo que respecta al giro, si se observa la figura 76 vemos que la primera frecuencia encontrada, a 0.907 Hz, resulta independiente a todas las demás, al igual que la deformada encontrada a 3.54 Hz. El resto de frecuencias presentan deformadas muy parecidas según los valores del MAC. Los valores de 1.94, 3.9, 5.8 y 5.9 Hz son claramente modos operacionales con deformadas operacionales similares.

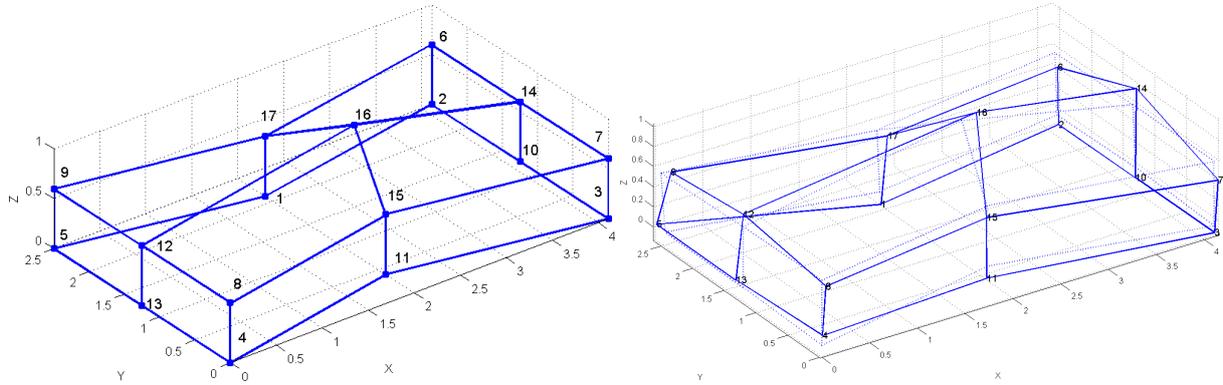


Figura 72: Giro. Deformada asociada a la frecuencia de 3.5 Hz.

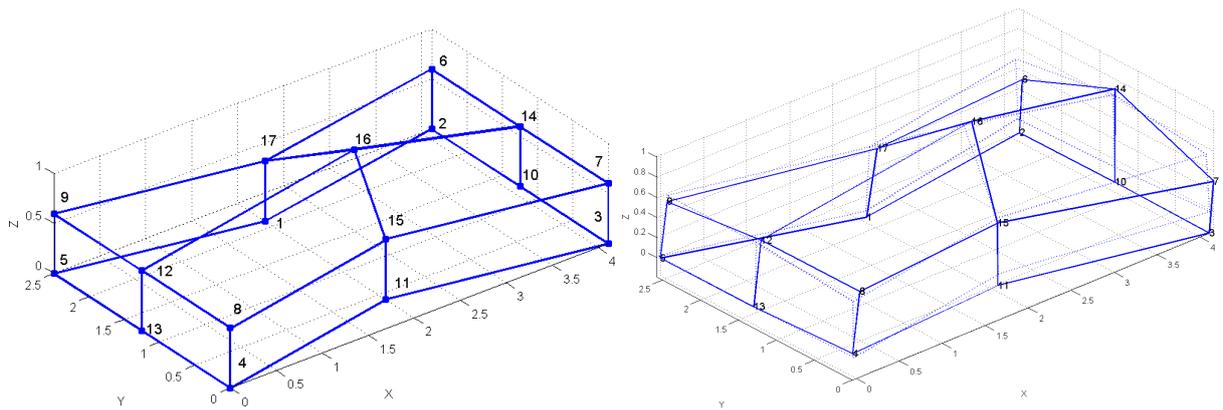


Figura 73: Giro. Deformada asociada a la frecuencia de 3.9 Hz.

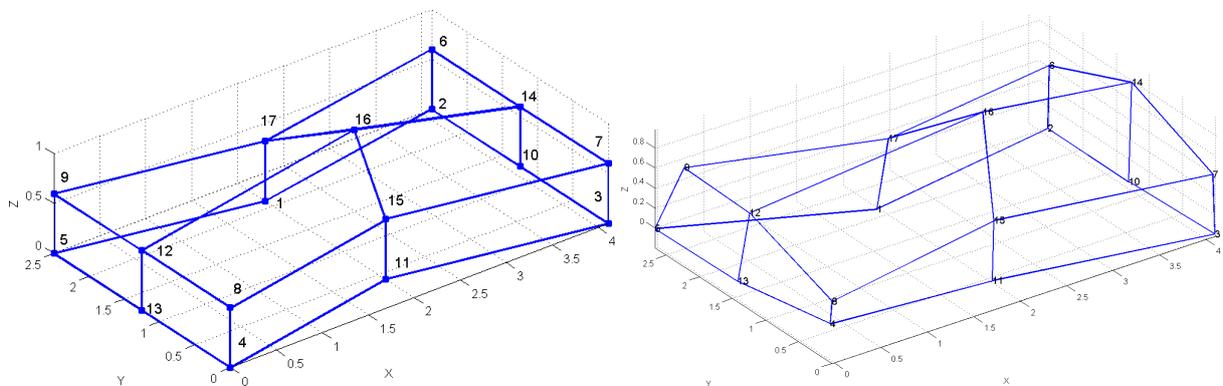


Figura 74: Giro. Deformada asociada a la frecuencia de 5.86 Hz.

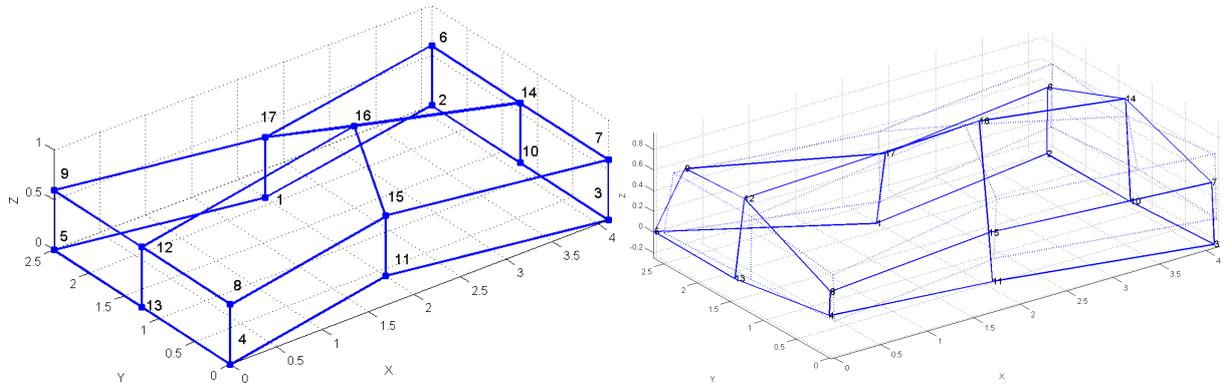


Figura 75: Giro. Deformada asociada a la frecuencia de 5.96 Hz.

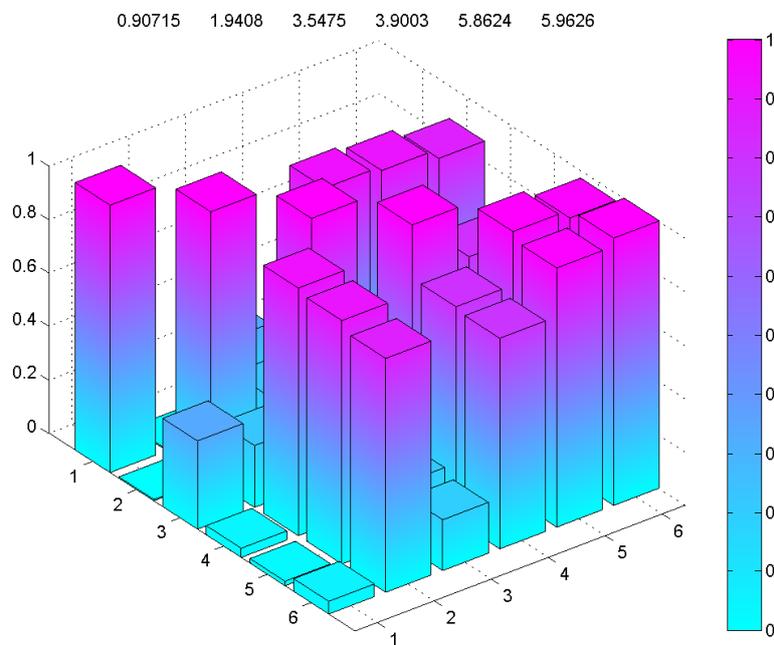


Figura 76: Giro. MAC deformadas seleccionadas

6.6.5. Modos y frecuencias: Tramos Completos

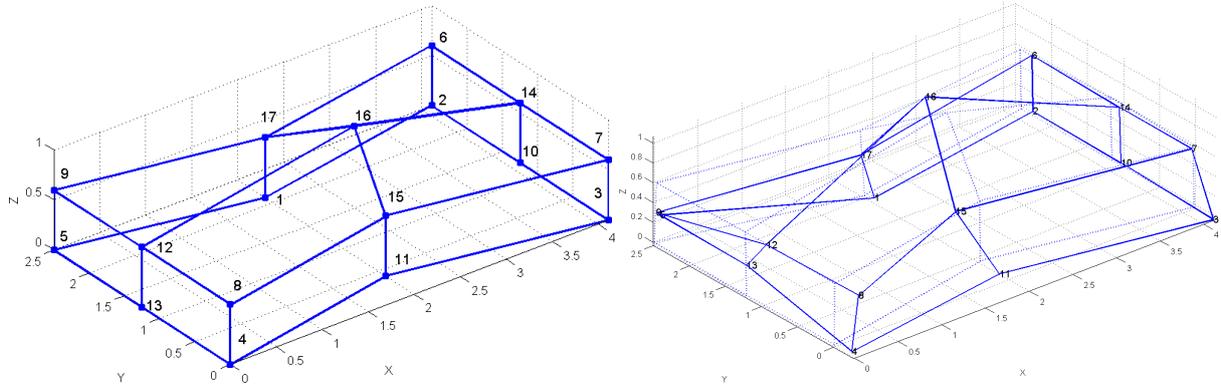


Figura 77: Tramos completos. Deformada asociada a la frecuencia de 1 Hz.

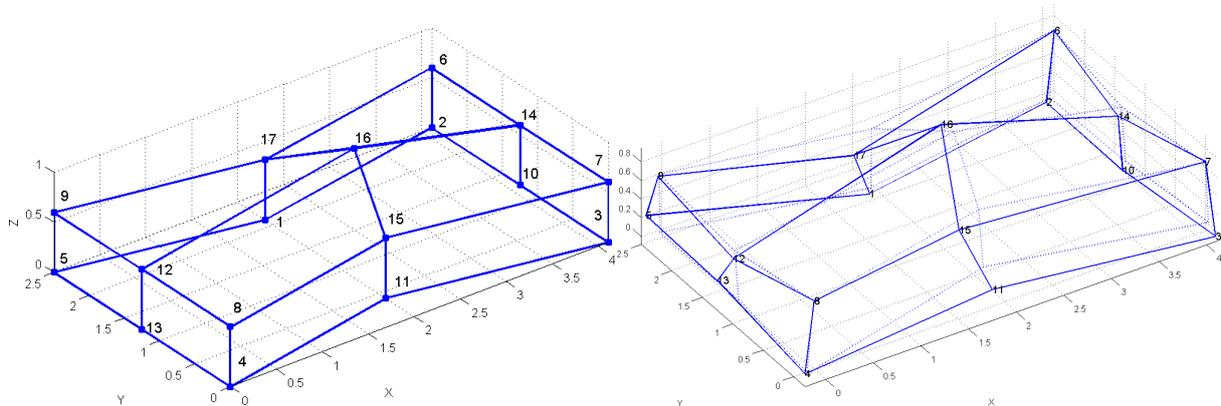


Figura 78: Tramos completos. Deformada asociada a la frecuencia de 1.4 Hz.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al considerar los tramos completos de movimiento. Estos resultados serán útiles a la hora de comparar las deformadas obtenidas en los distintos tipos de pasos. Esta comparación se realiza en la siguiente sección. En este caso encontramos que se han seleccionado 4 deformadas. Las asociadas a las frecuencias de 0.98 y 1.4 Hz tienen cierta similitud, como lo apunta el MAC, mientras que las asociadas a las frecuencias de 3.95 y 24.95 Hz son independientes.

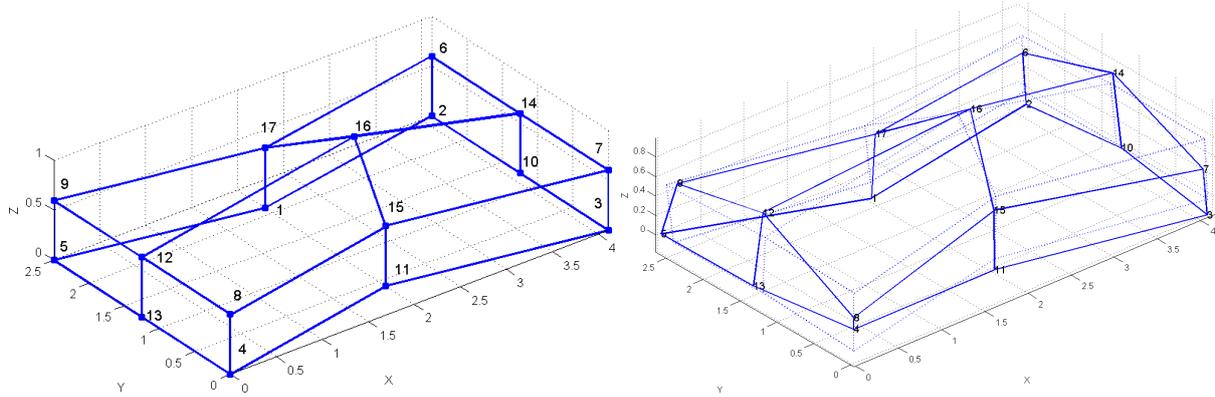


Figura 79: Tramos completos. Deformada asociada a la frecuencia de 3.9 Hz.

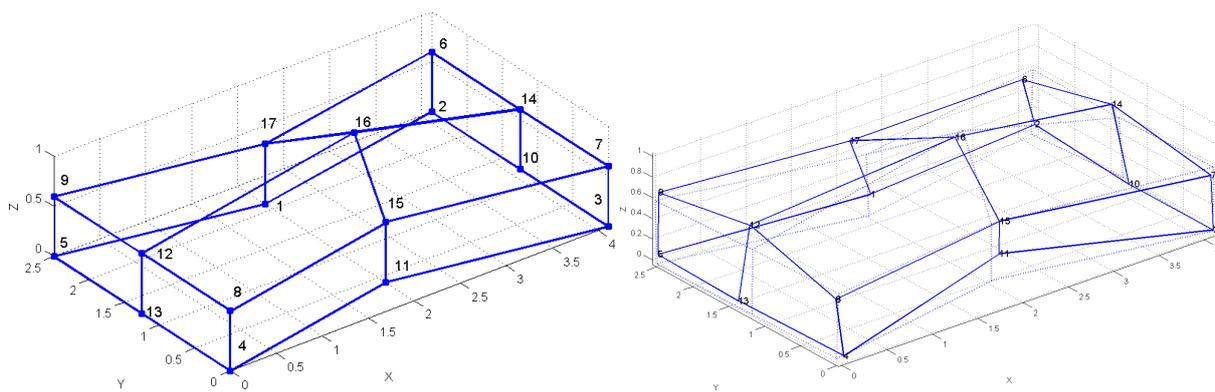


Figura 80: Tramos completos. Deformada asociada a la frecuencia de 24.95 Hz.

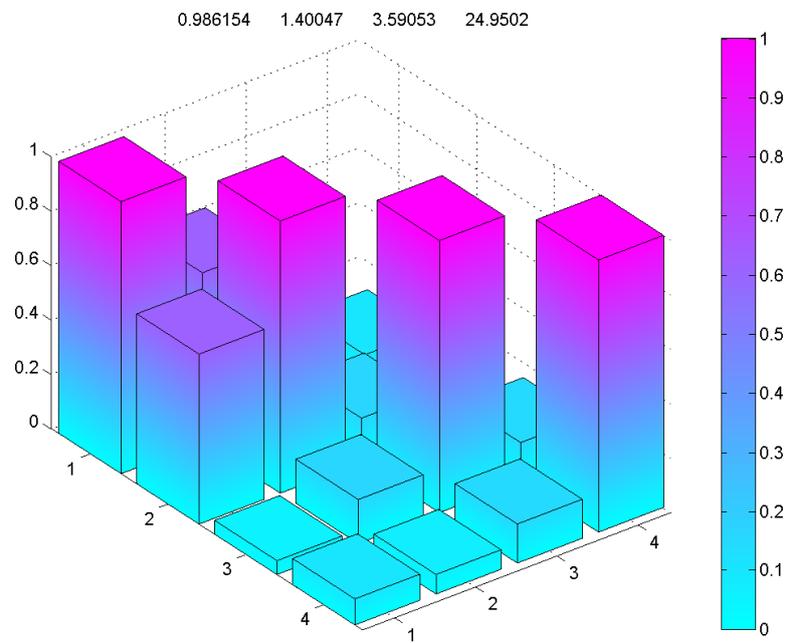


Figura 81: Tramos completos. MAC deformadas seleccionadas

6.7. Análisis global de modos y frecuencias encontrados

En esta sección se presentan las deformadas que se consideran más determinantes, por su forma y por su recurrencia. A pesar del gran número de deformadas obtenidas, muchas de ellas son similares como demuestran los MAC calculados. Haciendo un estudio en síntesis de los resultados de todos los tipos de pasos se han elegido 2 deformadas como las más representativas del comportamiento del sistema. A pesar de la similitud entre las deformadas, existen grandes diferencias en lo que respecta a las frecuencias en las que estas se encuentran. Esto último es lógico, ya que los modos obtenidos son modos operacionales.

La primera de la deformada seleccionada está presente en todos los tipos de pasos y aparece a distintas frecuencias. Esto, que puede comprobarse cualitativamente comparando las deformadas de un modo visual, también se puede comprobar cuantitativamente empleando la herramienta del MAC. En la figura 82 se ve, en el resultado de un MAC cruzado, que para distintas frecuencias de distintos tipos de paso la deformada es casi idéntica en términos numéricos. En las figuras 83, 84 y 85 se observan las deformadas referenciadas antes. Se observan 2 puntos críticos en estas deformadas. Uno de ellos en la esquina inferior derecha, que presenta notables deformaciones de compresión y tracción en el eje z. El otro punto crítico se encuentra en el centro en la parte frontal, lugar que coincide con la colocación del llamador. Este punto también presenta las deformaciones de compresión y tracción en el eje z. Las deformadas en estos puntos críticos se encuentran en contrafase.

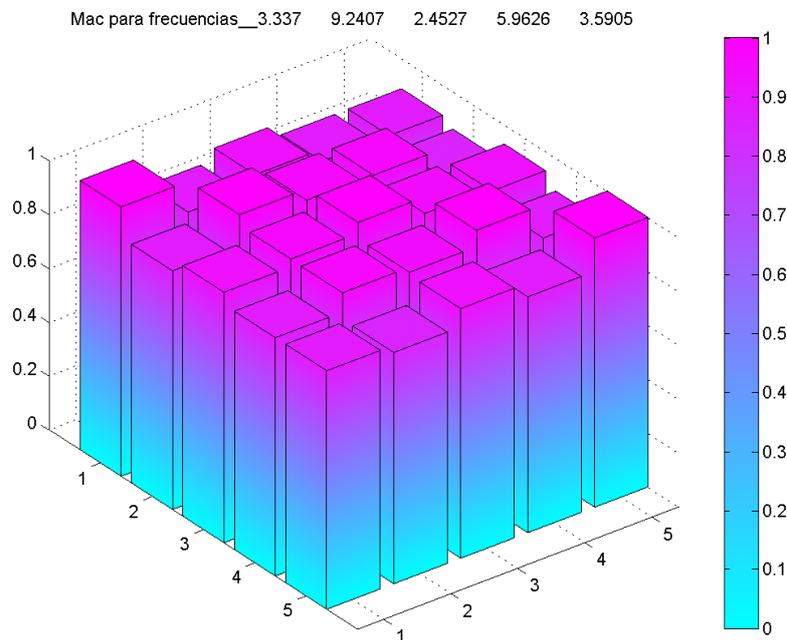


Figura 82: MAC cruzado entre tipos de Pasos. Cada frecuencia está asociada a un modo operacional de cada uno de los tipos de pasos estudiados. De izquierda a derecha: paso normal(3.337 Hz), paso lento (9.2407 Hz), paso agachado (2.4527 Hz), giro (5.96 Hz) y tramos completos (3.5905 Hz).

En la figura 86 se representa el MAC cruzado para todos los pasos correspondiente a la segunda

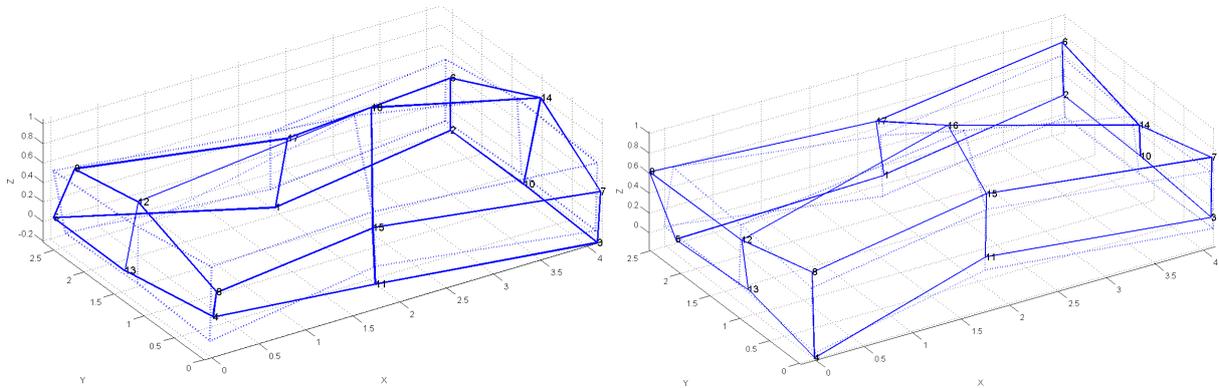


Figura 83: Deformadas a 3,34 Hz 9,24 Hz para paso normal y paso lento respectivamente

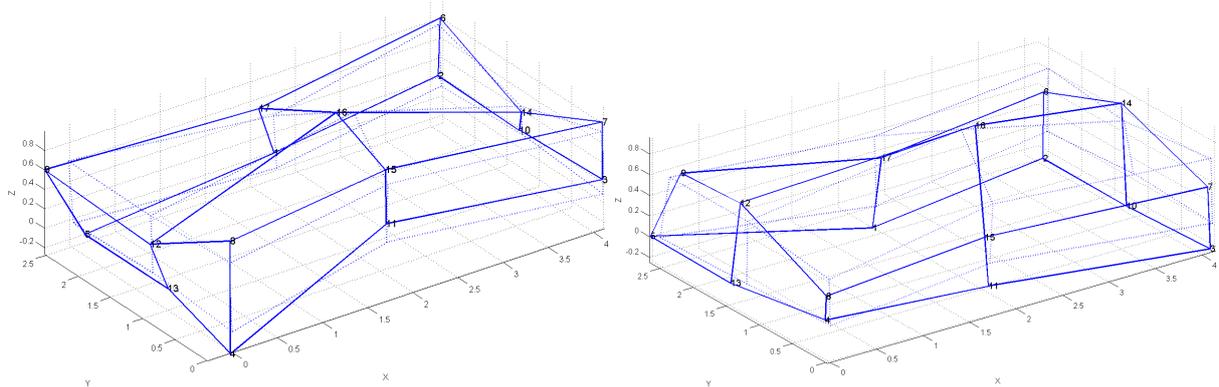


Figura 84: Deformadas a 2.45 Hz 5.96 Hz para paso agachado y giro respectivamente

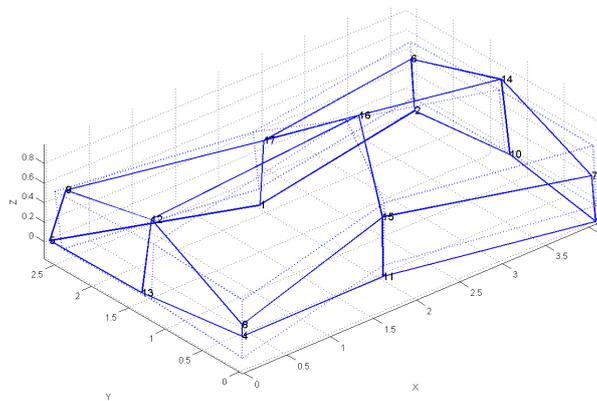


Figura 85: Deformada a 3.59 Hz para tramos completos

deformada . En este caso la aparición en los distintos tipos de pasos no es tan parecida como en el anterior. En algunos pasos hay más coincidencia que en otros, pero por lo general el valor del MAC es alto. En las figuras 87, 88 y 89 aparecen las deformadas mencionadas. En este caso las frecuencias son mucho más coincidentes. En esta deformada encontramos un punto crítico en la parte trasera izquierda del paso, que es la que más deformaciones sufre.

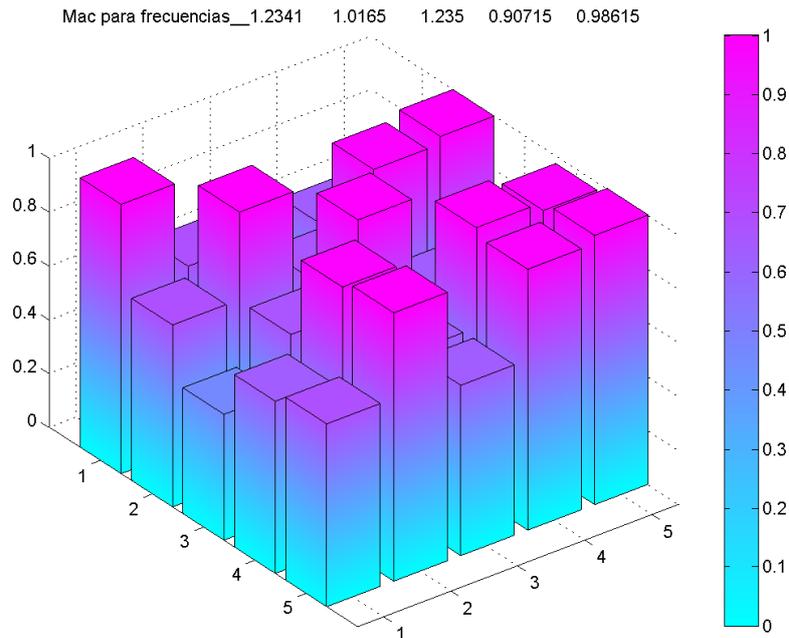


Figura 86: MAC cruzado entre tipos de pasos. Cada frecuencia está asociada a un modo operacional de cada uno de los tipos de pasos estudiados. De izquierda a derecha: paso normal(1.2341 Hz), paso lento (1.0165 Hz), paso agachado (1.235 Hz), giro (0.907 Hz) y tramos completos (0.9861 Hz).

6.8. Comparación de resultados obtenidos por SSI y EFDD

La comparación de los resultados obtenidos empleando los 2 algoritmos se realiza con vistas a justificar la equivalencia de ambos resultados. De este modo se refuerzan los resultados obtenidos. La comparación se realizará, en primer lugar en cuanto al rango y valor de las frecuencias halladas, y en segundo lugar en lo que respecta a las deformadas obtenidas.

Los modos de vibración obtenidos tanto en SSI como en EFDD están asociados a frecuencias que se mueven en un rango idéntico, esto es, entre 0 y 15 Hz. Los valores son, además, coincidentes en muchos casos. Desde la tabla 2 hasta la tabla 6 se presentan estas comparaciones.

Si bien en algunas frecuencias encontramos ciertas diferencias, teniendo en cuenta las limitaciones de tiempo de los registros estudiados, circunstancia ésta que limita la exactitud de los resultados, podemos concluir que, en lo que a frecuencias respecta, los valores obtenidos son equivalentes.

El caso de las deformadas obtenidas es similar al de las frecuencias. Si bien la forma de algunas de las deformadas varía según que método empleemos, la tónica general es la de una gran

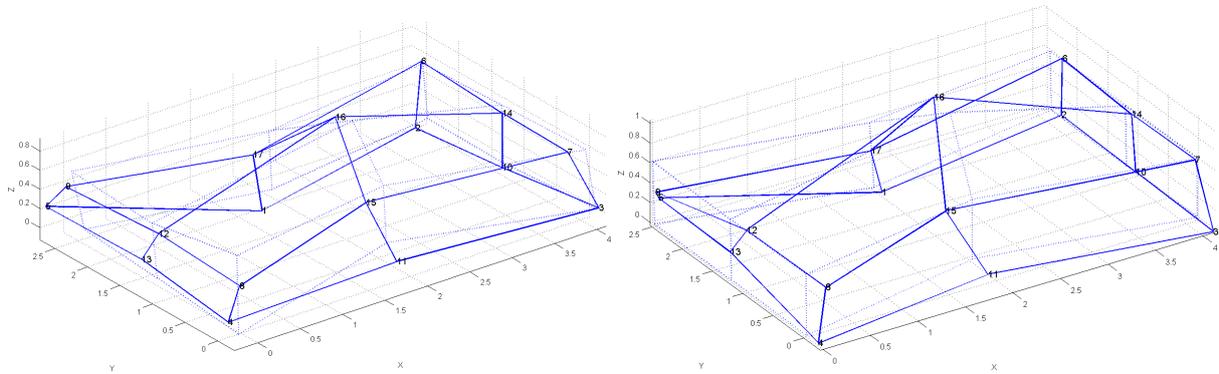


Figura 87: Deformadas a 1.235 Hz 1 Hz para paso normal y paso lento respectivamente

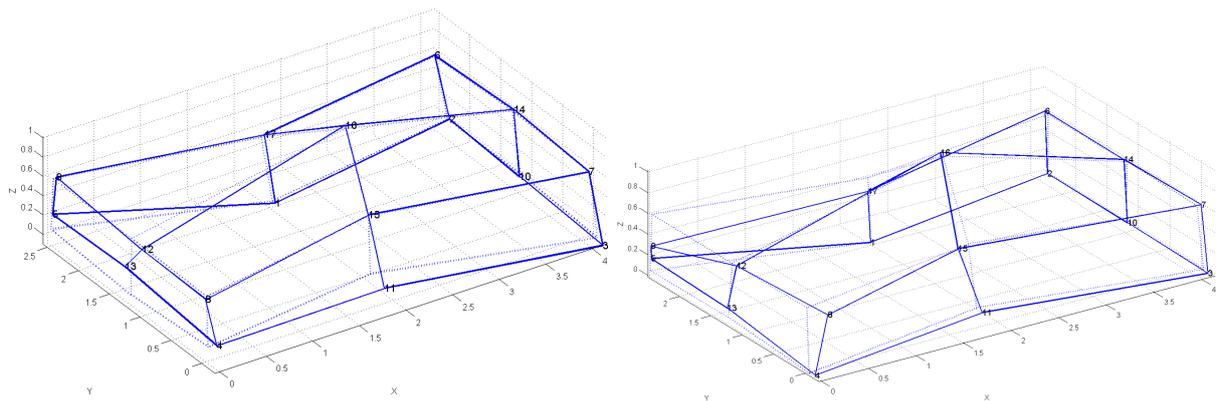


Figura 88: Deformadas a 1.2 Hz 0.9 Hz para paso agachado y Giro respectivamente

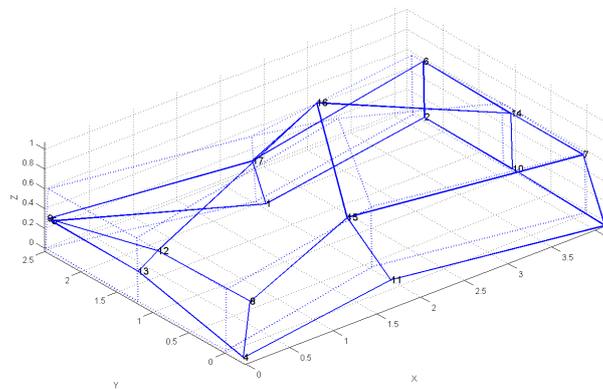


Figura 89: Deformada a 0.98 Hz Para tramos completos. Cada frecuencia está asociada a cada uno de los tipos de pasos estudiados.

Giro	Frec 1	Frec 2	Frec 3	Frec 4	Frec 5	Frec 6
EFDD	0.9768	1.9245	1.9971	2.8903	3.8871	5.3886
SSI	0.9072	1.7043	1.9408	3.4957	3.9003	5.8624

Tabla 2: Comparación frecuencias encontradas para giro

Paso Agachado	Frec 1	Frec 2	Frec 3	Frec 4
EFDD	1.2479	2.4690	3.6452	4.9281
SSI	1.2350	2.4527	4.5936	4.9176

Tabla 3: Comparación frecuencias encontradas para paso agachado

similitud, con casos de coincidencia total. En las figuras 90, 91 y 92 se comparan 3 ejemplos de las deformadas más relevantes comentadas en el apartado anterior.

En el primero de los casos, el de la figura 90, se muestra la deformada cuyo punto crítico es el de la esquina inferior derecha. En los otros 2 ejemplos, los de las figuras 91 y 92 se encuentra la comparación para la otra deformada importante establecida en la sección anterior, donde los puntos críticos eran la parte frontal central, y la parte trasera derecha. Si bien se observa que en la solución aportada por Artemis (algoritmo EFDD) señala como punto crítico la parte frontal central, no hace lo propio con la parte trasera derecha. Esta diferencia es comprensible debido a lo antes mencionado respecto a la duración de los registros. Ante la incertidumbre, convenimos en señalar la parte trasera derecha como un posible punto crítico tal y como indican los resultados obtenidos con el algoritmo SSI. Hay que comentar que, mientras que la comparación de deformadas para el tramo de giro proporciona resultados más coincidentes, como se ve en la figura 90, para los demás pasos se encuentran más diferencias, lo cual vuelve a apuntar al factor de la duración de los registros como elemento clave para la obtención de buenos resultados.

En conclusión, dado el perfil global del ensayo, y comprobado la equivalencia en lo obtenido por ambos caminos, se consideran ambos algoritmos como válidos para identificar el sistema. Se ha optado por presentar los resultados obtenidos en el entorno Macec, como ya se ha comentado, por considerarse más ilustrativos.

Paso Lento	Frec 1	Frec 2	Frec 3	Frec 4	Frec 5
EFDD	1.0135	2.0340	4.0530	6.1039	10.1815
SSI	1.0138	2.0423	4.0605	6.1157	10.2437

Tabla 4: Comparación frecuencias encontradas para paso lento

Paso normal	Frec 1	Frec 2	Frec 3
EFDD	1.009	3.2547	3.9614
SSI	1.2341	3.3370	4.0172

Tabla 5: Comparación frecuencias encontradas para paso normal

Tramos completos	Frec 1	Frec 2
EFDD	0.8423	3.6781
SSI	0.9862	3.5905

Tabla 6: Comparación frecuencias encontradas para tramos completos

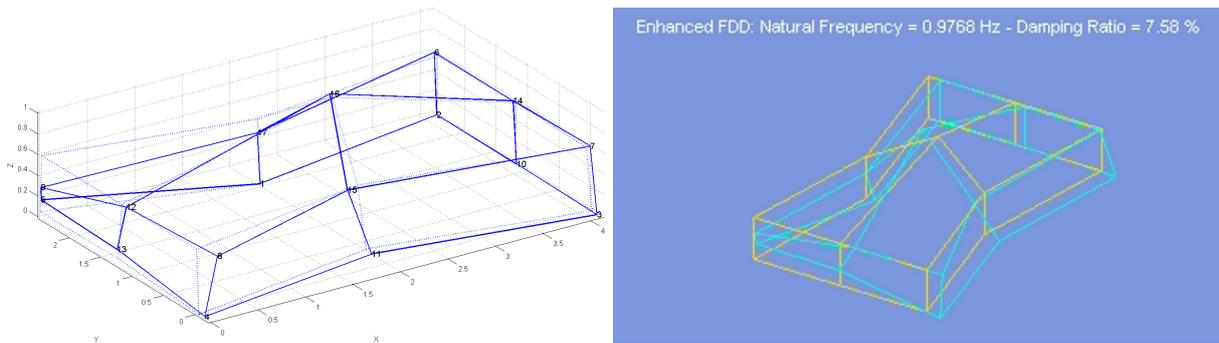


Figura 90: Deformadas obtenidas por EFDD y SSI para giro. Frecuencia 0.9 Hz

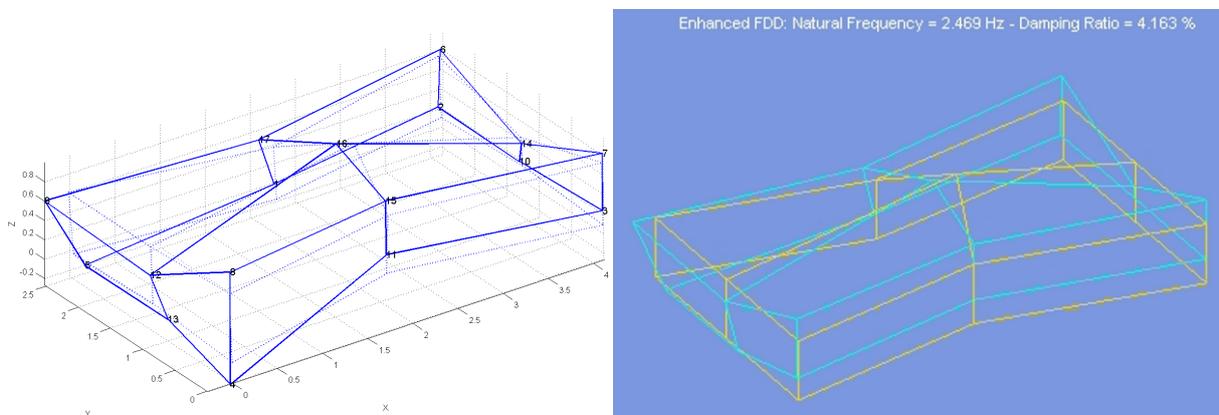


Figura 91: Deformadas obtenidas por EFDD y SSI para paso agachado. Frecuencia 2.45 Hz

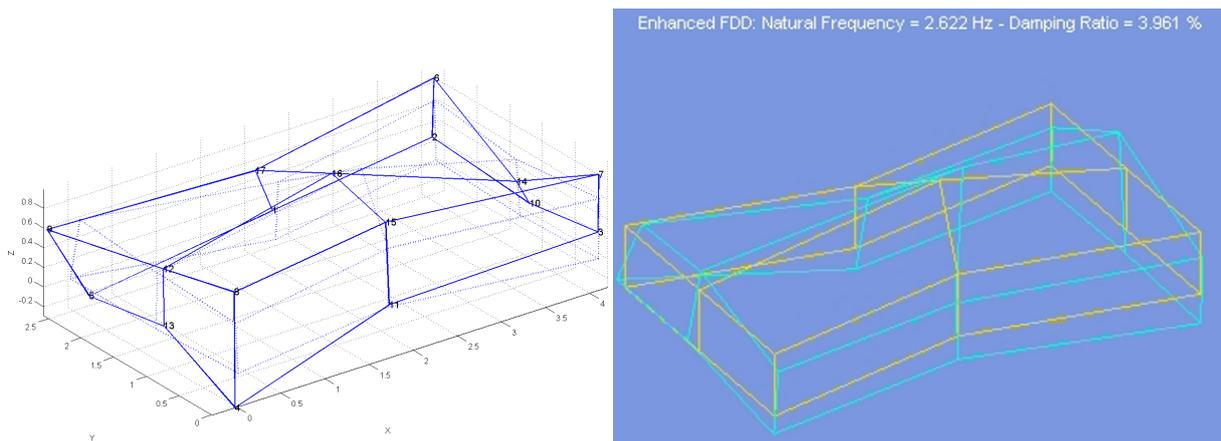


Figura 92: Deformadas obtenidas por EFDD y SSI para paso normal. Frecuencia 3 Hz

7. Conclusiones

En esta sección se realiza una síntesis global del trabajo realizado y de los resultados obtenidos. La realización de ensayos experimentales que caractericen el comportamiento estructural del Paso conllevan un gran esfuerzo técnico y humano. Son necesarias muchas personas y muchas horas para recrear la configuración ornamental del paso en procesión, y esto conlleva limitaciones tanto para la preparación del ensayo como para su ejecución. A pesar de esto, las decisiones tomadas para el desarrollo de esta experiencia han servido para, salvando esas limitaciones, obtener resultados fiables. La mayor salvedad, como ya se ha comentado, ha sido la escasa duración de los registros temporales recogidos. Esto que en principio podría parecer de trivial solución, no lo es en absoluto. Si bien los registros asociados a los pasos agachados y pasos lentos podrían alargarse en el lugar donde se realizaron los ensayos (interior de la Basílica), siempre que fuese factible para los costaleros, los registros correspondientes al paso normal, el más interesante ya que es el más desarrollado durante la procesión, necesitarían de una ubicación más adecuada para realizarse. Los registros obtenidos del paso normal son del orden de 12 segundos, y la distancia recorrida en ese tramo es del orden de 6 metros. Para conseguir registros de duración similar a los de giro, 80 segundos, el lugar de ensayo debería contar con una distancia recta disponible de 40 metros aproximadamente. Estos cálculos dan una idea de cuan limitado resulta el espacio de la basílica para poder capturar el comportamiento de este tipo de paso. Con vistas a futuros ensayos sería interesante encontrar un lugar de ensayo alternativo que cumpliera estas condiciones.

Como muestran los resultados obtenidos, los 2 eventos donde se registran los valores picos de aceleración del Paso son el momento de la levantada y los golpes de llamador. Es de esperar que la levantada afecte de una manera global al sistema, mientras que el llamador lo haga localmente en torno a la zona donde está ubicado. Es posible que ambos eventos afecten de una manera negativa al sistema estructural. Esto, que puede no ser un motivo de peligro a corto plazo, sería interesante poder cuantificarlo para predecir su efecto a largo plazo. Para ello otro tipo de ensayos deberían realizarse, distintos al aquí desarrollado, como modelos numéricos y medidas locales de deformaciones y aceleraciones.

Después de contrastar los datos de modos y frecuencias obtenidos, no se ha encontrado un gran contraste en el comportamiento del sistema para los distintos tipos de paso. Se han encontrado algunas particularidades en las resoluciones de los tramos de giro, pero estas se asocian como se ha comentado antes a la duración de los registros. Los armónicos encontrados en los distintos pasos han sido similares y las deformadas obtenidas también lo han sido. A pesar de esto, no sería apropiado concluir que el comportamiento del sistema es equivalente para los distintos tipos de paso debido al carácter global de este estudio. Es posible que con unos ensayos más profundos y concretos se puedan encontrar particularidades para cada tipo de paso. En cualquier caso, aunque nunca está de más estudiar todos los registros de maniobras que desarrolla el sistema en uso, con vistas a futuros ensayos dinámicos, las prioridades deberían enfocarse sobre las maniobras de paso normal y giro, que son, con diferencia, las más recurrentes en uso.

Las deformadas obtenidas señalan, principalmente, 3 puntos de interés sobre el sistema. En primer lugar, la zona trasera izquierda del paso. En la figura 93 se observa una deformada que señala una deformación grande en esa zona. En esta zona del sistema se encontraron grietas que fueran tratadas en el proceso de restauración. La grietas pueden deberse a que esa zona estructural está trabajando más que otras, y por tanto sufriendo más. Esto coincidiría con los resultados que se observan en estas deformadas. Si bien el efecto final, que son las grietas, se ha arreglado, es posible que la causa del mismo no se haya subsanado, por lo que sería muy aconsejable estar pendiente de la posible aparición de nuevos desperfectos en esa zona del sistema.

De aparecer, un ensayo enfocado a conocer deformaciones y aceleraciones locales, con vistas a establecer la causa del exceso de deformación en la zona sería adecuado. Algo que hubiese sido de mucha utilidad es un ensayo previo a la restauración con el fin de contrastar resultados.

El segundo punto de interés que señalan estos resultados tiene una gran relación con el primero. Se trata de la parte trasera derecha del sistema, donde se vuelven a encontrar deformaciones elevadas. En la figura 94 se puede observar lo comentado. Si existe un desequilibrio en la manera de responder de la estructura de manera que la esquina trasera izquierda ha estado sometida a mayores deformaciones y han aparecido desperfectos, tiene sentido pensar que, por razones de simetría, esté ocurriendo lo mismo en la esquina trasera derecha. La recomendación es similar a la realizada antes. Sería adecuado una supervisión de la zona, y en caso de encontrar indicios de desperfectos, sería recomendable realizar un estudio local de ambas esquinas.

Por último, el tercer punto de interés es la zona delantera central del sistema. Nuevamente se registran unas deformaciones elevadas, como se puede observar en la figura 95. Lo llamativo de esta zona es que es donde actúa el llamador. Los datos obtenidos al analizar el llamador son limitados, pero aun así, reflejan que se trata de un impacto de gran energía, con una afectación diferencial según la zona, esto es, las aceleraciones alcanzadas en la zona del llamador son de un orden de magnitud superior a las registradas en las zonas más alejadas. Aunque con el tipo de ensayo realizado no podemos asegurar que la integridad estructural de la zona en torno al llamador se vea afectada, con los datos obtenidos hay que tener esta posibilidad presente con vistas a futuros estudios.

Como se ha comentado a lo largo del estudio, los modos obtenidos son modos operacionales. Esto en un principio puede resultar una dificultad añadida para conocer las características dinámicas de un sistema, ya que los modos propios del sistema pueden enmascarse. Sin embargo, en este caso esta circunstancia no presenta un inconveniente tan grande. Si bien es cierto que es interesante, con vistas a conocer mejor el comportamiento del sistema, diferenciar entre modos operacionales y modos del sistema, en este caso, los armónicos que hemos estudiado van a estar vinculados siempre al uso del sistema por lo que las deformadas obtenidas se pueden considerar un reflejo fidedigno del comportamiento del sistema en uso. Con vistas a obtener los modos propios del sistema se podrían realizar ensayos donde las cargas fuesen aplicadas artificialmente con los dispositivos adecuados. En cualquier caso, no se han encontrado datos que indiquen que un estudio de este calibre sea recomendado.

En resumen, las conclusiones más relevantes se enumeran a continuación:

- No se ha encontrado evidencias que cuestionen la integridad estructural del Paso. Se han localizado zonas concretas cuyo comportamiento presenta irregularidades. Estas zonas son las esquinas traseras y la parte frontal central de Paso. En futuros estudios estas zonas deben considerarse como prioritarias para los análisis.
- En proyectos de restauración de bienes culturales semejantes se ha de tener en cuenta que el método de estudio estructural basado en OMA ha resultado satisfactorio.
- Para futuros ensayos se realizan 2 recomendaciones:
 - Realizar estudios estructurales antes y después del proceso de restauración. Por un lado, se obtendrá más información para el diseño del proceso de restauración, y por otro lado, se podrán evaluar las consecuencias de dicho proceso sobre el Paso.
 - Con vistas a mejorar los resultados obtenidos al emplear métodos basados en OMA se recomienda configurar los ensayos de manera que los registros obtenidos tengan una duración elevada.

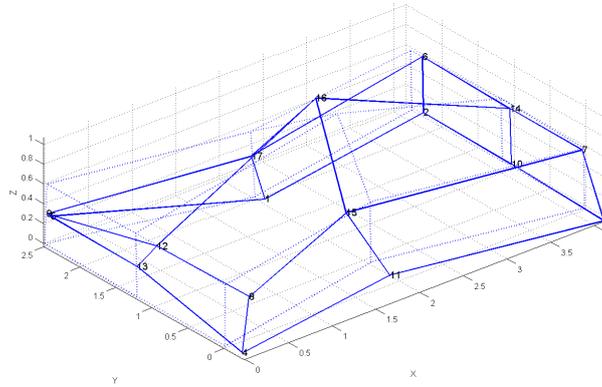


Figura 93: Ejemplo deformada recurrente. Para frecuencia de 1 Hz correspondiente al Tramo completo

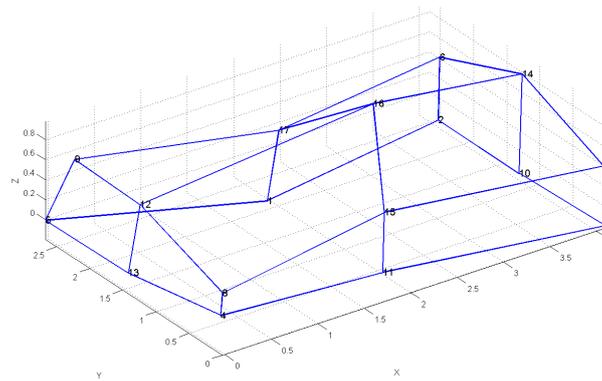


Figura 94: Ejemplo deformada recurrente. Para frecuencia de 5,86 Hz correspondiente al giro

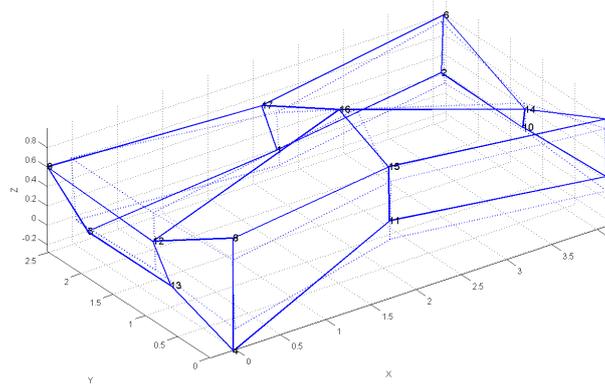


Figura 95: Ejemplo deformada recurrente. Para frecuencia de 2,45 Hz correspondiente al paso agachado

Referencias

- [1] A. Brandt, *Noise and vibration analysis*. New York, USA: Wiley, 2011.
- [2] R. J. Allemang and D. L. Brown, “A correlation coefficient for modal vector analysis,” in *Proceedings of the International Modal Analysis Conference & Exhibit*, pp. 110–116, 1982.
- [3] B. Peeters and G. D. Roeck, “Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 13, no. 6, pp. 855–878, 1999.
- [4] R. Brincker, L. Zhang, and P. Andersen, “Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition,” *Smart Materials and Structures*, vol. 10, no. 3, p. 441, 2001.
- [5] K. L. Structural Mechanics Division, “Macec.”
- [6] T. Mathworks, “Matlab,” 2011.
- [7] SVS, “Artemis software,” 2009.