

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Simulación Estocástica de Cargas para Análisis
Dinámico de Estructuras en Ingeniería Civil

Autor: Daniel Jurado Camacho

Tutores: Javier Fernando Jiménez Alonso

Andrés Sáez Pérez

**Dep. de Mecánica de Medios Continuos
y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Simulación Estocástica de Cargas para Análisis Dinámico de Estructuras en Ingeniería Civil

Autor:

Daniel Jurado Camacho

Tutores:

Javier Fernando Jiménez Alonso

Andrés Sáez Pérez

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Máster: Simulación Estocástica de Cargas para Análisis Dinámico de Estructuras en Ingeniería Civil

Autor: Daniel Jurado Camacho

Tutores: Javier Fernando Jiménez Alonso, Andrés Sáez Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Máster, con título *Simulación Estocástica de Cargas para Análisis Dinámico de Estructuras en Ing. Civil*, parte de la revisión de una serie de metodologías para la generación de cargas estocásticas debidas a la acción del viento y a la acción sísmica. De acuerdo al estudio realizado, dichas metodologías se pueden dividir en dos grandes grupos: métodos basados en espectros de referencia y métodos basados en filtros digitales. Los primeros son más sencillos de implementar, si bien requieren una mayor exigencia computacional que los segundos.

Realizada la revisión de metodologías se han escogido dos casos particulares, ambos basados en espectros de referencia, para la generación, por un lado, de señales sísmicas artificiales y, por otro lado, de historias de velocidad de viento turbulento. Ambas metodologías han sido implementadas, a través del software MatLab, en una interfaz gráfica de usuario: **SimulAcel**© para el caso de señales sísmicas, y **WindMaker**© para el caso de historias de viento. El objetivo ha sido, en todo momento, crear herramientas versátiles que permitan la obtención de series temporales de cargas para su uso en análisis estructurales dinámicos.

Tras la implementación de las metodologías y la creación de las interfaces gráficas, se ha realizado una aplicación práctica para probar las señales generadas. A tal efecto, se ha elegido una pasarela peatonal suspendida situada en el municipio de Zuheros (Córdoba), con objeto de disponer de una estructura con un comportamiento no lineal que propicie el uso de un análisis transitorio para su estudio dinámico. El modelo numérico de dicha pasarela, implementado en el software ANSYS, ha sido debidamente actualizado de acuerdo a medidas de campo de un ensayo de vibración ambiental. Finalmente, se ha procedido al análisis dinámico de la pasarela utilizando las señales sísmicas y de viento generadas con los programas desarrollados en el trabajo con objeto de probar la utilidad de los mismos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación y motivación del trabajo.....	1
1.3 Objetivos del trabajo	2
1.4 Metodología de trabajo	3
1.5 Aproximación a la simulación estocástica de cargas	5
2 REVISIÓN DE MÉTODOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑALES.....	7
2.1 Superposición de ondas.....	8
2.2 Filtros digitales.....	9
2.3 Singularidades según el tipo de proceso simulado.....	11
3 ACELEROGRAMAS SÍSMICOS ARTIFICIALES COMPATIBLES CON UN ESPECTRO DE RESPUESTA.....	15
3.1 Conocimientos básicos.....	16
3.2 Modelo de generación de señales sísmicas artificiales	20
3.3 Descripción del código implementado.....	27
3.4 Implementación en una interfaz: SimulAcel©.....	30
3.5 Ejemplo numérico	31
4 GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE HISTORIAS DE VELOCIDAD DE VIENTO	35
4.1 Conocimientos básicos.....	36
4.2 Modelo de generación de historias de viento	43
4.3 Grado de ajuste de la señal generada	47
4.4 Descripción del código implementado.....	49
4.5 Implementación en una interfaz: WindMaker©.....	52
4.6 Estudio de los parámetros del método	53

4.7 Ejemplos numéricos.....	57
4.8 Fuerzas de Viento Equivalentes	64
5 CASO DE ESTUDIO: PASARELA SUSPENDIDA EN ZUHEROS (CÓRDOBA)	69
5.1 Descripción General de la Estructura.....	69
5.2 Modelo de cálculo numérico.....	72
5.3 Ensayo de Vibración Ambiental	77
5.4 Análisis Modal Operacional.....	81
5.5 Comparación inicial de valores modales.....	84
5.6 Actualización del Modelo Numérico	85
6 ANÁLISIS DE LA PASARELA PEATONAL SUSPENDIDA DE ZUHEROS.....	95
6.1 Descripción del tipo de análisis empleado	95
6.2 Análisis de la pasarela frente a un sismo.....	99
6.3 Análisis de la pasarela frente a fuerzas de viento.....	108
7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	119
7.1 Conclusiones	119
7.2 Trabajos futuros	120
REFERENCIAS.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fases del trabajo realizado y contenido de cada fase. Fuente: Elaboración propia. ...	4
Figura 3.1. Estudio de las constantes del método de Newmark. Fuente: (Sáez, 2016).	19
Figura 3.2. Tipos de funciones de intensidad envolvente. Fuente: Elaboración propia a partir de (Barbat et al., 1994b).	21
Figura 3.3. Diagrama de flujo del código implementado para la generación de señales sísmicas artificiales. Fuente: Elaboración propia.	29
Figura 3.4. Inicio del programa SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 3.5. Espectro en aceleraciones obtenido. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 3.6. Función de intensidad elegida. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 3.7. Solución obtenida en la primera iteración previamente a la realización de correcciones. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 3.8. Solución obtenida en la primera iteración tras la corrección de línea de base del acelerograma. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 3.9. Acelerograma de la primera iteración tras corrección de pico. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 3.10. Comparación entre espectros para la iteración 1 (arriba) y 6 (abajo). Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 3.11. Señal obtenida en la iteración 6. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 4.1. Perfil de velocidades en las proximidades de la tierra. Fuente: (Simiu and Scanlan, 1996).	37
Figura 4.2. Comparación de espectros adimensionales de turbulencia, en términos adimensionales, para la componente longitudinal de la turbulencia. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 4.3. Comparación entre el espectro longitudinal de Von Karman y el espectro generalizado de Von Karman (lateral y longitudinal), en términos adimensionales. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 4.4. Comparación del espectro de la señal y el espectro de referencia (izquierda) y de la correlación cruzada de la señal y de referencia (derecha). Fuente: Elaboración propia.	49

Figura 4.5. Diagrama de flujo del código implementado para la generación de señales de viento turbulento. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 4.6. Inicio del programa WindMaker©. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 4.7. Comparación de espectros de referencia para diferentes Δf . Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 4.8. Comparación de series de velocidad para diferentes Δf . Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 4.9. Error respecto a la turbulencia objetivo de señales con diferentes tiempos de simulación totales. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 4.10. Coeficiente de curtosis de la velocidad longitudinal para diferentes tiempos de simulación totales. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 4.11. Coeficiente de asimetría de la velocidad longitudinal para diferentes tiempos de simulación totales. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 4.12. Esquema para la obtención de velocidades de viento en la “Torre Pelli”. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 4.13. Espectro de turbulencia longitudinal en el punto más bajo (izquierda) y más alto (derecha) del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 4.14. Matriz de densidad espectral cruzada para una frecuencia de 0,01 Hz (izquierda) y 2 Hz (derecha) en los puntos del dominio de cálculo del ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 4.15. Ajuste del espectro de turbulencia longitudinal en el punto más bajo (izquierda) y más alto (derecha) del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 4.16. Componente de velocidad longitudinal turbulenta en el punto más bajo (arriba) y más alto (abajo) del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 4.17. Perfiles de velocidad longitudinal turbulenta para $t = 4,1$ s (izquierda) y $t = 167$ s (derecha) en los puntos del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 4.18. Esquema de tipología de puente considerado para ejemplo bidimensional (no se corresponde con las dimensiones introducidas en el ejemplo). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Imágenes.	61
Figura 4.19. Distribución espacial de la velocidad longitudinal sobre el canto del puente en el plano YZ para el instante de tiempo correspondiente a 150 s. Fuente: Elaboración propia.	62
Figura 4.20. Distribución espacial de la velocidad lateral sobre el canto del puente en el plano YZ para el instante de tiempo correspondiente a 150 s. Fuente: Elaboración propia.	63

Figura 4.21. Distribución espacial de la velocidad vertical sobre el canto del puente en el plano YZ para el instante de tiempo correspondiente a 150 s. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 4.22. Actuación del viento turbulento sobre un tablero rígido esbelto. Fuente: Elaboración propia.	64
Figura 5.1. Situación de la pasarela respecto al municipio de Zuheros. Fuente: (Google, 2017).	70
Figura 5.2. Alzado de la pasarela. Fuente: Elaboración propia a partir de planos elaborados por Metalhergos S.L.	70
Figura 5.3. Colocación de trámex y madera en el tablero de la pasarela. Fuente: Metalhergos S.L.	70
Figura 5.4. Vista de la pasarela desde el interior. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 5.5. Unión entre cables y péndolas en la parte superior. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 5.6. Detalle de unión entre cables y vigas de los extremos de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.	71
Figura 5.7. Elemento LINK180 de ANSYS (versión 16). Fuente: (ANSYS, 2013).	74
Figura 5.8. Elemento BEAM188 de ANSYS (versión 16). Fuente: (ANSYS, 2013).	74
Figura 5.9. Elemento SHELL181 de ANSYS (versión 16). Fuente: (ANSYS, 2013).	74
Figura 5.10. Forma del modelo de elementos finitos de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 5.11. Acelerómetros usados en el ensayo de vibración ambiental. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 5.12. Unidad central de adquisición usada en el ensayo. Fuente: Elaboración propia. ...	79
Figura 5.13. Grupo electrógeno usado en el ensayo. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 5.14. Esquema de los puntos de medición del ensayo de vibración ambiental. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 5.15. Fotografía durante la toma de datos del setup 13 del ensayo. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 5.16. Frecuencias experimentales obtenidas y rango de variación. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 5.17. Representación de la matriz de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 5.18. Diagrama de flujo del algoritmo genético empleado. Fuente: Elaboración propia.	91
Figura 6.1. Función de amortiguamiento de Rayleigh definida. Fuente: Elaboración propia.	99
Figura 6.2. Situación de la pasarela en el mapa sísmico de España. Fuente: (Fomento, 2008).	100

Figura 6.3. Espectro en aceleraciones obtenido en la localización de la pasarela peatonal objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 6.4. Función de intensidad utilizada para la modulación de la señal sísmica empleada en el análisis de la pasarela suspendida en Zuheros. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 6.5. Acelerograma sísmico en dirección vertical obtenido para el análisis de la pasarela suspendida en Zuheros. Fuente: Elaboración propia.	101
Figura 6.6. Ajuste de la respuesta espectral del acelerograma sísmico obtenido para el análisis de la pasarela suspendida en Zuheros. Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 6.7. Puntos de introducción del acelerograma sísmico en la pasarela en un lateral (simétrico para el otro lateral). Fuente: Elaboración propia.	102
Figura 6.8. Aceleraciones verticales del tablero según la posición y el tiempo debidas a la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.	103
Figura 6.9. Evolución de la aceleración con el tiempo en el centro de la pasarela bajo la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.	104
Figura 6.10. Evolución de la aceleración con el tiempo en el punto de máxima aceleración bajo la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.	104
Figura 6.11. Transformada de Fourier del registro de aceleraciones debidas a la acción sísmica en el punto correspondiente al centro de vano. Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 6.12. Transformada de Fourier del registro de aceleraciones debidas a la acción sísmica en el punto correspondiente al máximo valor de aceleración. Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 6.13. Axiles en los cables para peso propio (unidades en N). Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 6.14. Historia de axiles en uno de los cables de la pasarela debida a la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.	107
Figura 6.15. Situación de la pasarela en el mapa de zonas de viento de la IAP-11. Fuente: (Fomento, 2011).	109
Figura 6.16. Incidencia del viento sobre la pasarela (arriba) y puntos considerados en el cálculo de la velocidad del viento (abajo). Fuente: Elaboración propia.	109
Figura 6.17. Ajuste de los espectros obtenidos para la señal de viento generada en el punto 1 del dominio de cálculo establecido para la pasarela. Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 6.18. Series de velocidad longitudinal turbulenta en los puntos del dominio. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 6.19. Puntos utilizados para el cálculo del viento y zona de influencia de los mismos en la pasarela. Fuente: Elaboración propia.	113
Figura 6.20. Series de fuerza del viento vertical sobre los puntos del dominio. Fuente: Elaboración propia.	114

Figura 6.21. Aceleraciones verticales del tablero según la posición y el tiempo debidas a la acción del viento. Fuente: Elaboración propia. 115

Figura 6.22. Envolvente de aceleraciones en el tablero de la pasarela respecto al tiempo debidas a la acción del viento. Fuente: Elaboración propia. 116

Figura 6.23. Transformada de Fourier del registro de aceleraciones debido a la acción del viento en el punto correspondiente al centro de vano. Fuente: Elaboración propia. 116

Figura 6.24. Nivel de confort en la pasarela durante los 10 primeros segundos de aplicación de la carga de viento. Fuente: Elaboración propia. 118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ventajas e inconvenientes de los métodos de generación de señales. Fuente: Elaboración propia.	7
Tabla 4.1. Características del campo de viento turbulento para el ejemplo de aplicación sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 4.2. Características del campo de viento turbulento para el ejemplo de aplicación sobre un puente ficticio. Fuente: Elaboración propia.	62
Tabla 5.1. Características iniciales de los materiales implementados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.	73
Tabla 5.2. Tipos de elementos y secciones asignados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.	75
Tabla 5.3. Frecuencias y modos propios numéricos estimados inicialmente. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 5.4. Frecuencias, amortiguamiento y modos experimentales obtenidos. Fuente: Elaboración propia.	83
Tabla 5.5. Comparación pre-actualización entre valores experimentales y numéricos. Fuente: Elaboración propia.	84
Tabla 5.6. Valores mínimos y máximos establecidos para los parámetros de la actualización del modelo de elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.	89
Tabla 5.7. Parámetros finales obtenidos tras la actualización del modelo. Fuente: Elaboración propia.....	92
Tabla 5.8. Comparación después de la actualización del modelo numérico entre valores experimentales (rojo) y numéricos (azul). Fuente: Elaboración propia.	93
Tabla 6.1. Valores de amortiguamiento para cada frecuencia afectada. Fuente: Elaboración propia.....	98
Tabla 6.2. Valores extremos de axil en un único cable de la parte baja de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 6.3. Características del campo de viento turbulento en las inmediaciones de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.	110
Tabla 6.4. Clases de confort en pasarelas. Fuente: (Heinemeyer et al., 2009).	117

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El presente documento titulado *Simulación Estocástica de Cargas para Análisis Dinámico de Estructuras en Ing. Civil* se enmarca dentro de la normativa referente al Trabajo Fin de Máster de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla (ETSI) para la obtención de los créditos de la asignatura Trabajo Fin de Máster, y así obtener el título de Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Sevilla (Plan 2016/2017).

El departamento adjudicador del Trabajo Fin de Máster ha sido el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la ETSI, siendo los tutores D. Javier Fernando Jiménez Alonso, profesor asociado del departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, y D. Andrés Sáez Pérez, catedrático de universidad del departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

La definición de las diferentes cargas que actúan sobre una estructura es un aspecto muy desarrollado en la mayor parte de normativas de carácter estructural de todo el mundo. En el ámbito del análisis estructural es bien conocido el gran número de normativas, recomendaciones, guías técnicas, etc. de diversos autores, instituciones y organismos que aportan datos y expresiones para calcular las distintas acciones a las que se puede ver sometida una estructura durante su vida útil.

En la mayoría de los casos anteriormente mencionados la naturaleza de la carga calculada es suficiente para llevar a cabo un análisis estructural de tipo lineal. Sin embargo, no todas las estructuras existentes o diseñadas en el futuro pueden ser analizadas bajo esta premisa de comportamiento lineal, pues los materiales que las constituyen o el esquema estructural que forman suscitan un comportamiento predominantemente no lineal.

Para análisis no lineales se han realizado correcciones de las herramientas que permiten el cálculo de las acciones para casos lineales, si bien en muchos casos, en los que la no linealidad es muy fuerte o la estructura en sí presenta un carácter muy singular, dichas herramientas equivalentes pueden no llegar a ser suficientes. Tal es el caso de estructuras como puentes colgantes o atirantados, en los que los elementos estructurales principales son cables de acero con un comportamiento fuertemente no lineal.

En estos casos en los que las herramientas de análisis lineal o de análisis no lineal sencillas no son suficientes, la solución es recurrir a un análisis de tipo transitorio, resolviendo las ecuaciones de equilibrio dinámico mediante una discretización en el dominio del tiempo. Este análisis permite conocer la respuesta de la estructura ante una determinada acción a lo largo de

un período de tiempo, pudiendo observar con detalle la evolución de los parámetros que caracterizan la respuesta estructural. Sin embargo, aparece un nuevo problema: ahora ya no sólo es suficiente con definir un valor de la carga para unas condiciones de cálculo establecidas (como ocurría en el análisis lineal), sino que es imprescindible la definición de una serie temporal con los valores de la carga en cada instante de tiempo. Las normativas, recomendaciones, guías técnicas, etc. rara vez aportan una metodología para el cálculo de estas series temporales de valores de una carga, y es que la obtención de dicha serie no es un aspecto sencillo.

El análisis transitorio de estructuras cobra especial importancia ante cargas de tipo sísmico o de tipo viento, por ejemplo. Estas cargas, con una naturaleza transitoria que las hace variar en el tiempo (en algunos casos en períodos de tiempo relativamente cortos), son susceptibles de ser implementadas en un análisis estructural transitorio. El problema de la obtención de la evolución temporal de la carga se puede abordar de distintas formas. Por un lado, en zonas con una gran actividad sísmica o con fuertes vientos es fácil disponer de mediciones reales (acelerogramas, campos de velocidad, etc.) de un gran número de sucesos, las cuales pueden ser utilizadas directamente en el análisis estructural. Por otro lado, no existen datos disponibles en todas las regiones, y el proceso de realización de mediciones puede suponer un esfuerzo tanto económico como en tiempo; sin embargo, en la mayoría de zonas existen normativas o guías que recogen, en los casos de acciones sísmicas y de viento, espectros de respuesta de referencia.

Para estos últimos casos, en los que no existen mediciones pero sí normativas con espectros de referencia, es muy atractiva la generación de señales aleatorias artificiales basadas en los espectros normativos. El hecho de que estén basadas en un determinado espectro que recoge las características de la acción de una determinada zona hace que la señal generada, aunque aleatoria y artificial, tenga las mismas características que si fuera una acción real medida en campo.

En los últimos años, con el gran avance que se ha producido en el campo del cálculo computacional, la generación de señales artificiales está ganando importancia. La gran potencialidad de esta metodología de cálculo subyace en la posibilidad de obtener una gran cantidad de registros artificiales aleatorios que se adecuan a las necesidades de cálculo de la estructura que se pretende diseñar o analizar. El presente TFM está orientado precisamente a la implementación de una metodología que permita la obtención de dichas señales artificiales, concretamente para los casos de la acción sísmica y de la acción del viento, y su posterior comprobación de utilidad en análisis dinámicos estructurales.

Ante todo lo expuesto, la principal motivación del trabajo que aquí se presenta es la elaboración de una herramienta que permita la generación de señales artificiales para su uso en análisis dinámicos estructurales, una herramienta concebida para su uso académico por los alumnos de la Universidad de Sevilla, pero que también puede ser fácilmente extendida al uso profesional en el campo del análisis de estructuras.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Como ya se ha avanzado en el apartado anterior, el principal objetivo del presente TFM es la implementación de metodologías en un software de cálculo numérico para la obtención de señales aleatorias artificiales; en concreto, para la generación de señales sísmicas y de señales de viento. A su vez, se pretende generar una interfaz gráfica que recoja el método implementado con el objeto de facilitar a futuros usuarios del programa la entrada de datos y la visualización de los resultados obtenidos, por lo que se persigue la creación de manuales de usuario que faciliten su uso.

Como objetivo previo, y necesario, respecto al anterior, surge la necesidad de realizar una recapitulación y revisión de las diversas metodologías desarrolladas para la generación de señales aleatorias. En definitiva, se busca una revisión del estado del arte en materia de generación estocástica de señales.

Finalmente, otro objetivo es la realización de un análisis estructural a partir de las señales artificiales generadas, pudiendo así comprobar la validez y la potencialidad de los datos generados mediante las metodologías implementadas. Para ello, se marcan como objetivos secundarios la medición en campo de una pasarela peatonal real y la debida actualización del modelo de cálculo numérico implementado para asegurar la bondad de los resultados obtenidos.

Como resumen, se tienen los siguientes objetivos, ordenados en orden de consecución:

- **Revisión y recapitulación de las metodologías actuales** referentes a la generación estocástica de señales aleatorias artificiales.
- Generación de dos **interfaces gráficas que permitan la generación de señales aleatorias artificiales**, una de ellas orientada a la obtención de señales sísmicas y otra a la obtención de señales de viento, de forma que se disponga de una herramienta rápida y precisa para la obtención de dichas cargas dinámicas.
- Realización de un **análisis estructural** a partir de las señales obtenidas mediante las metodologías implementadas sobre un modelo numérico debidamente actualizado de una pasarela peatonal real, comprobando así la utilidad de las herramientas desarrolladas.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para conseguir los objetivos marcados anteriormente se ha llevado a cabo la metodología de trabajo que se expone en el presente apartado. Dicha metodología se corresponde, aproximadamente, con la estructura del documento.

En el presente *Capítulo 1 Introducción* ya se ha expuesto la justificación del tema desarrollado y los objetivos que se persiguen con la realización del trabajo. Dentro de este mismo capítulo, más adelante, se expone una primera aproximación a las diversas ramas del trabajo realizado sobre el tema central: la simulación estocástica de cargas.

Se ha comenzado el trabajo con la búsqueda de información relativa a la generación de señales aleatorias artificiales, tanto de carácter sísmico como de viento. Tras una selección de la información más interesante para la realización del TFM, se ha llevado a cabo una recapitulación de las metodologías encontradas, así como una revisión de sus ventajas e inconvenientes de implementación en un software de cálculo numérico. Dicha revisión se muestra en el *Capítulo 2 Revisión de Métodos para la Simulación Numérica de Señales*.

Realizado lo anterior, se han elegido dos metodologías, una para sismo y otra para viento, las cuales se detallan ampliamente en los *Capítulos 3 Acelerogramas Sísmicos Artificiales compatibles con un Espectro de Respuesta* y *4 Generación Estocástica de Historias de Velocidad de Viento*, respectivamente. El estudio detallado de estas metodologías ha permitido la implementación de los procesos numéricos necesarios para la obtención de las diferentes señales aleatorias artificiales. Dicha implementación se ha realizado en el software de cálculo numérico MatLab (versión 2015b).

Posteriormente se ha desarrollado la correspondiente interfaz gráfica para cada caso, con sus respectivas particularidades según el método implementado. Se han generado sendas interfaces

de forma que permitan una fácil introducción de los datos necesarios para el cálculo, así como la exportación de los resultados más importantes para el posterior análisis estructural a realizar. Estas interfaces se conciben como herramientas para el uso de aquellos alumnos y personal docente de la Universidad de Sevilla que necesiten señales artificiales para la realización de análisis estructurales dinámicos.

A continuación, utilizando los datos de señales artificiales obtenidos de las metodologías implementadas, se ha realizado un análisis estructural de una pasarela peatonal situada en el término municipal de Zuheros (provincia de Córdoba). Para ello se ha desarrollado un modelo numérico de la pasarela mediante el software ANSYS (versión 16), modelo que ha sido debidamente actualizado mediante mediciones de campo previamente al análisis estructural realizado, como se muestra en el *Capítulo 5 Caso de Estudio: pasarela suspendida en Zuheros (Córdoba)*. Tras lo anterior, se ha analizado la pasarela frente a cargas de sismo y viento generadas con las herramientas de simulación estocástica de cargas desarrolladas; los detalles al respecto se muestran en el *Capítulo 6 Análisis de la pasarela*.

Finalmente, en el *Capítulo 7 Conclusiones y desarrollos futuros* se aportan las conclusiones obtenidas del trabajo realizado, así como posibles vías de desarrollo identificadas a lo largo del mismo referentes a las herramientas implementadas.

Como resumen a lo expuesto en el presente apartado, se remite a la **Figura 1.1**, donde se muestran las ideas y tareas clave de cada paso de trabajo.

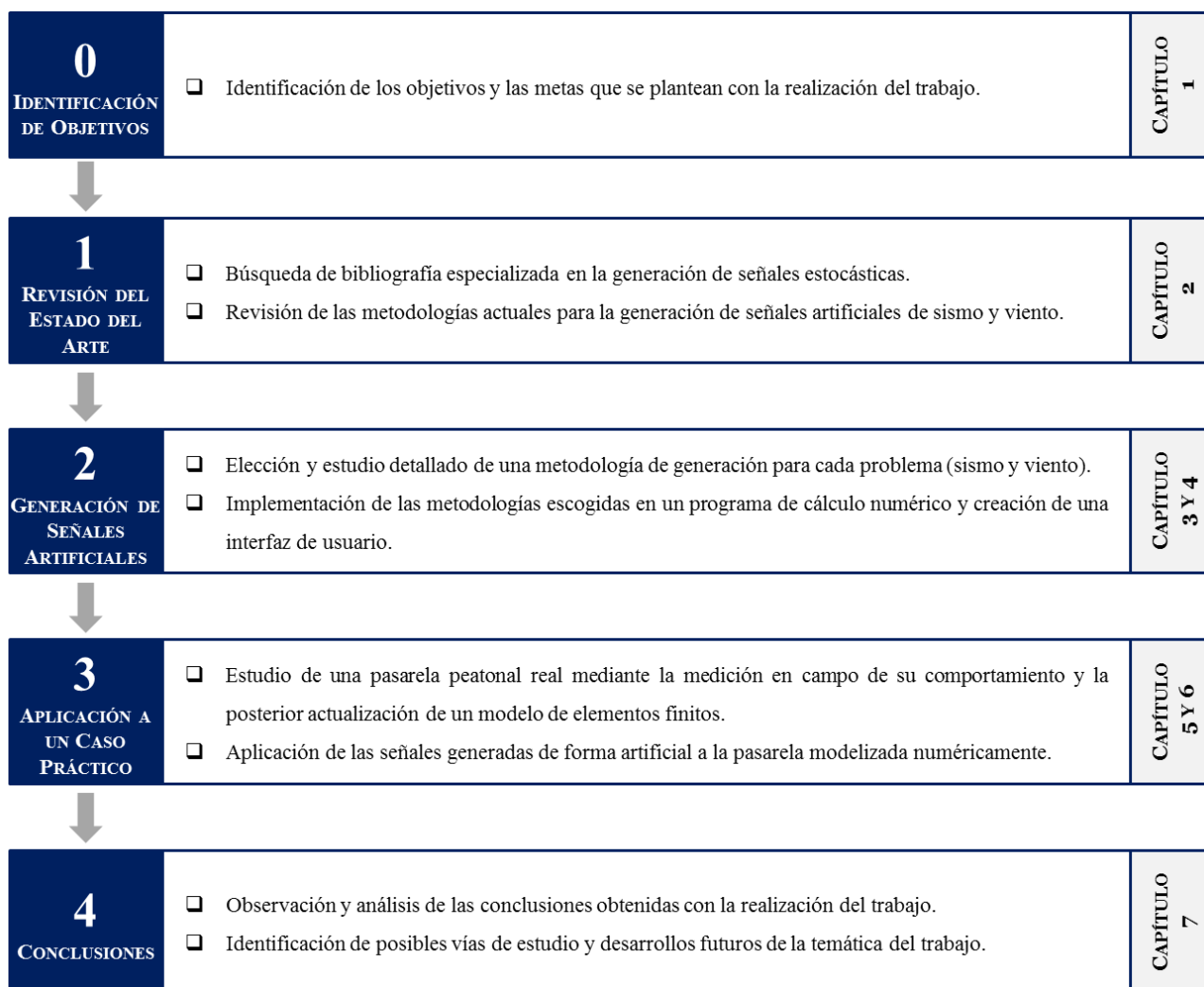


Figura 1.1. Fases del trabajo realizado y contenido de cada fase. Fuente: Elaboración propia.

1.5 APROXIMACIÓN A LA SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DE CARGAS

La simulación estocástica de cargas toma una importancia relevante en casos en los que resulta complicado disponer de mediciones reales en una determinada localización; así, disponer de una herramienta que permita la generación de una historia de cargas que sea consecuente con las características de una determinada tipología de carga en la localización donde se implanta la estructura objeto de análisis facilita mucho el proceso de cálculo.

Dentro del presente TFM, en el *Capítulo 2 Revisión de Métodos para la Simulación Numérica de Señales*, se aborda la revisión de las metodologías más empleadas en la generación estocástica de señales a nivel teórico. Como avance de dicha revisión que sirve de introducción al lector se tienen, por un lado, **métodos basados en la superposición de ondas sinusoidales**, también llamados métodos con enfoque espectral; por otro lado, aparecen los **métodos basados en filtros digitales**, también conocidos como métodos basados en series temporales.

De los dos métodos mencionados, los métodos basados en superposición de ondas poseen como ventaja su sencillez de implementación; sin embargo, el principal inconveniente subyace en los altos tiempos de computación que se necesitan cuando se incrementan notablemente el número de ondas superpuestas. No obstante, lo anterior puede ser fácilmente mejorado mediante la implementación de técnicas de resolución y superposición más avanzadas, tales como la técnica de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, del inglés *Fast Fourier Transform*), que no complican en exceso la formulación del problema, pero mejoran notablemente el tiempo de computación necesario. Por otro lado, los métodos basados en filtros digitales se encuentran en la posición opuesta a los anteriores: poseen una formulación mucho más difícil de implementar, pero una vez ajustados requieren menores tiempos de computación. Sin embargo, poseen el inconveniente de la necesidad de ajuste de los coeficientes que definen el método, lo que puede ser una tarea complicada en muchos casos.

Además de las ventajas e inconvenientes propios del método de resolución numérico, aparece la naturaleza propia del fenómeno que se está simulando. No todos los fenómenos de la naturaleza que dan lugar a cargas sobre estructuras tienen el mismo tipo de comportamiento, por lo que en función del proceso simulado será más o menos conveniente la utilización de un determinado método. Es por ello que diversos autores han investigado y propuesto métodos concretos para la simulación de los fenómenos que atañen a la ingeniería civil, especialmente los fenómenos del sismo y del viento; a tal efecto, se han desarrollado metodologías de cálculo que incorporan un mayor o menor número de variables para la definición del proceso, que hacen más o menos simplificaciones sobre el mismo y que, en consecuencia, es posible su utilización únicamente en determinados casos específicos.

En el TFM objeto de desarrollo se ha optado por la implementación de dos metodologías basadas en superposición de ondas sinusoidales y espectros de referencia: una para la generación de señales sísmicas y otra para la generación de historias de velocidad de viento turbulento. El objetivo final es el desarrollo de interfaces gráficas de usuario que incorporen las metodologías elegidas, si bien dicha implementación requiere de un estudio previo del método en sí.

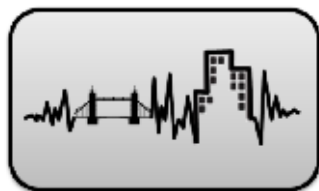
Para la **generación de señales sísmicas** se ha elegido un modelo que se basa en la superposición de una serie de ondas sinusoidales que cubren un rango de frecuencias hasta un límite de entre 50 y 100 Hz, valor aceptable para casos de ingeniería civil. Estas ondas poseen una amplitud característica que se obtiene a partir de un espectro de referencia sísmico y que aporta, en definitiva, la capacidad de coherencia de la señal generada artificialmente con el espectro de referencia utilizado. Además, el método incorpora una serie de ángulos de fase generados de forma aleatoria, lo que confiere a la generación de la señal un carácter estocástico que permite la obtención de infinitas señales para una misma localización con el mismo contenido físico, pero estadísticamente independientes entre sí. Por último, el método utilizado

incorpora una función de modulación del resultado de la superposición, lo que permite considerar un cierto grado de transitoriedad en la generación de la señal, adecuándose más a un tipo de fenómeno con carácter tan marcadamente transitorio como es un sismo.

En el caso de **generación de historias de velocidad de viento** turbulento el concepto general del método utilizado es el mismo que el descrito anteriormente para el caso de un sismo; sin embargo, incorpora ciertos aspectos propios. El método también se basa en la superposición de ondas con un contenido de frecuencias que barre todo el rango deseado, un ángulo de fase aleatorio que le confiere a la señal el carácter estocástico y un parámetro obtenido a partir de un espectro de turbulencia de referencia, el cual se obtiene para todos los puntos del dominio de cálculo. Pero además, aparece el concepto de coherencia entre los distintos puntos del dominio, lo que lleva a la inclusión de la denominada como “función de coherencia”; para el caso implementado, dicha coherencia se ha establecido a nivel espacial. Así, como principal diferencia con el caso de carga sísmica, se tiene la correlación y dependencia entre los distintos puntos que forman el dominio de cálculo.

La sencillez en la formulación de estas metodologías, siempre en comparación con la de los métodos basados en filtros digitales, ha permitido hacer hincapié en el desarrollo de una herramienta competitiva para la generación de dichas señales, lo que se enfoca como el principal objetivo del trabajo; a tal efecto, se han desarrollado sendas **interfaces de usuario** para la generación de las tipologías de señales mencionadas, facilitando notablemente el trabajo de obtención de cargas para análisis dinámicos a través de una interfaz sencilla y guiada. Las interfaces, creadas con MatLab y cuyos resultados han sido corroborados mediante el uso de las señales en una aplicación específica de ingeniería civil (pasarela peatonal suspendida en Zuheros, provincia de Córdoba), son:

- **SimulAcel©:** Programa para la generación de señales sísmicas artificiales.



SimulAcel
versión 1.0

- **WindMaker©:** Programa para la generación de historias de velocidad de viento.



WindMaker
versión 1.0

2 REVISIÓN DE MÉTODOS PARA LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE SEÑALES

Cuando se aborda el análisis dinámico de una estructura, además del análisis numérico de la misma, es necesaria la utilización de un método que permita la generación de la carga en el tiempo, es decir, la obtención de una señal temporal que defina la carga. Existen multitud de métodos con dicho objetivo, los cuales poseen en común su capacidad para simular numéricamente los procesos que generan las cargas que actúan sobre la estructura. Para ello se basan en modelos teóricos exactos, modelos empíricos o mediciones reales de dichos fenómenos.

Generalmente, este tipo de métodos se puede clasificar en dos grandes grupos (Kareem, 2008):

- **Superposición de ondas:** se trata de métodos basados en la suma o superposición de funciones trigonométricas.
- **Filtros digitales:** son métodos basados en series temporales.

En ambos casos, existe una amplia gama de métodos de resolución que varían en las posibles aplicaciones, la complejidad de cálculo, la capacidad de almacenamiento computacional necesaria y el tiempo de cálculo exigido. Como aproximación, se remite al lector a la **Tabla 2.1**, donde se muestran algunas de las ventajas e inconvenientes de cada familia de métodos.

Tabla 2.1. Ventajas e inconvenientes de los métodos de generación de señales. Fuente: Elaboración propia.

MÉTODO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Superposición de ondas	- Gran simplicidad en su implementación	- Alto coste computacional
Filtros digitales	- Alta eficiencia computacional - Posibilidad de uso combinado con las anteriores	- Sensibilidad al paso de tiempo elegido - Dificultad para encontrar los parámetros óptimos del algoritmo

En los inicios del uso de estas técnicas, las simulaciones realizadas se centraban en procesos dominados, o aproximados, por una única variable y por una única dimensión. Sin embargo, los métodos de simulación están caracterizados, según el caso, por ser:

- Condicionados o no condicionados, en función de si se dispone, o no, de mediciones del fenómeno que se pretende simular.
- Gaussianos o no gaussianos, en función de si el fenómeno sigue una distribución de tipo gaussiana o, por el contrario, se desvía de ella.

- Estacionarios o transitorios, en función de la evolución del fenómeno a lo largo del tiempo y del espacio.
- Homogéneos o heterogéneos, en función de la similitud encontrada entre distintos sucesos del mismo proceso.
- Univariantes o multivariantes, en función del número de variables que es necesario definir para establecer una solución.
- Unidimensionales o multidimensionales, en función de las dimensiones significativas para el estudio del fenómeno.

Como se puede ver, se trata de un problema en el que es necesario un estudio a fondo del fenómeno que se pretende simular numéricamente para incluir en el modelo de cálculo todas las características significativas que lo definen. Mediante este estudio detallado es posible determinar el método de simulación más adecuado para el fenómeno que se esté estudiando y, en consecuencia, realizar las posibles simplificaciones que permitan un cálculo más sencillo (en términos de capacidad y tiempo de computación, fundamentalmente).

En los siguientes apartados se describen algunos de los métodos más usados en la simulación numérica de señales dentro de cada una de las familias descritas. Así mismo, se detallan algunos de los aspectos a considerar para la elección de un método u otro en función del proceso que se esté simulando, además de algunos desarrollos realizados hasta el momento.

2.1 SUPERPOSICIÓN DE ONDAS

Los métodos basados en la superposición de ondas definidas por funciones trigonométricas se corresponden con uno de los enfoques más usados tradicionalmente para la generación de señales, probablemente debido a su simplicidad. Estos métodos utilizan una serie de ángulos de fase ϕ generados aleatoriamente para cada onda, así como una amplitud A y una frecuencia ω características de la misma, dando lugar a expresiones del tipo mostrado en la ecuación (2.1); el uso de un gran número de términos en el sumatorio permite la aproximación del espectro de energía de la señal de forma discreta, a pesar de tratarse de una función continua.

$$z(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i) \quad (2.1)$$

De acuerdo a (Kareem, 2008), esta familia de métodos es aplicable a procesos dominados por múltiples variables y dimensiones. Sin embargo, la aproximación del espectro de energía de la señal a través de un gran número de términos conlleva un gran coste computacional, especialmente a medida que se incrementan las variables del problema. Para mejorar los cálculos, la superposición de un gran número de términos trigonométricos se suele abordar a través de la **Transformada Rápida de Fourier (FFT)**. De acuerdo a (Schmidt, 2013), la Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier basado en la división del tiempo, lo cual permite eliminar gran parte de los cálculos repetitivos que hay que llevar a cabo si se desea resolver la misma de forma directa; así, está indicada en aquellos casos en los que el número de operaciones sea muy elevado, ya que proporciona una notable mejora en el tiempo de cálculo. La mejora en el tiempo de cálculo se consigue a costa de una mayor capacidad de almacenamiento, si bien, en conjunto, la mejora es importante. Sin embargo, la necesidad de mayor memoria de almacenamiento para aplicaciones con una gran cantidad de variables y largas duraciones de las señales hace que la FFT no sea suficiente en algunos casos. En estos casos puede ser usado el esquema de simulación numérico

propuesto por Li y Kareem (Kareem, 2008), el cual combina las ventajas de las técnicas de superposición de ondas y de filtros digitales, permitiendo la simulación de procesos aleatorios dominados por múltiples variables y de larga duración. Este nuevo enfoque sigue las directrices de la tradicional FFT, pero elimina las necesidades de almacenamiento excesivo; para ello, simula un gran número de series temporales que quedan segmentadas por el uso de la FFT, las cuales posteriormente quedan sintetizadas mediante medias a través de un filtro digital que determina la duración de la señal final; en definitiva, se trata de un método con una mayor eficiencia computacional, dotado con mayor robustez.

La densidad espectral de una señal es una función que informa acerca de la distribución de la potencia, o la energía, de una determinada señal sobre las distintas frecuencias que la forman; en definitiva, la función de densidad espectral caracteriza a la señal, o al proceso, en el dominio de la frecuencia. Por otro lado, cuando se habla de densidad espectral cruzada, se está analizando la interrelación en frecuencia existente entre dos procesos estocásticos. De acuerdo a (Martín, n.d.), la función de densidad espectral cruzada cumple con la propiedad de simetría.

El hecho de que la función de densidad espectral cruzada cumpla con la propiedad de simetría permite la realización de una descomposición de **Cholesky** sobre la misma. Esta descomposición se trata de una metodología ampliamente usada en la simulación de procesos multivariados y multidimensionales, que mejora la eficiencia que se tendría con la típica descomposición LU en matrices simétricas.

Una alternativa a la descomposición de Cholesky es la descomposición de **Schur**, quizás más atractiva que la anterior debido al menor número de modos que deben ser usados en la simulación. Lo mismo se puede conseguir utilizando la descomposición de Cholesky, si bien es necesario realizar un truncamiento de sus términos.

Otro enfoque es la “**descomposición estocástica**” de la matriz de densidad espectral de potencia cruzada (Kareem, 2008), inicialmente orientada a la simulación de procesos aleatorios estacionarios, pero después desarrollada para el caso de procesos transitorios. Esta alternativa se basa en la descomposición de la función de un proceso aleatorio en un conjunto de funciones de subprocesos, de forma que dos componentes cualesquiera del mismo subproceso son estadísticamente dependientes, mientras que dos componentes cualesquiera de dos subprocesos diferentes son independientes. De esta forma, la simulación del proceso principal se puede simplificar mediante la simulación de un conjunto de subprocesos independientes.

Como resumen del presente apartado, cabe mencionar que los métodos basados en superposición de ondas trigonométricas han sido los más usados tradicionalmente debido, fundamentalmente, a su simplicidad. Sin embargo, su alto coste computacional ha limitado su uso para problemas con múltiples variables y dimensiones. Los diversos avances realizados en este campo van orientados precisamente a la reducción del coste computacional de las simulaciones, para lo cual se han desarrollado métodos que permiten un análisis discreto del problema sin pérdida de información.

2.2 FILTROS DIGITALES

Los modelos basados en filtros digitales ofrecen métodos eficientes para simular procesos aleatorios basados en series temporales. Estos modelos reproducen los patrones de variaciones anteriores de una variable en el tiempo, usando esta información para predecir sus futuras variaciones; de esta forma, es posible construir un modelo simplificado de la serie temporal para representar su aleatoriedad, por lo que es muy útil para predecir procesos (Cadenas et al., 2016). Los más comunes son:

- **Modelos autorregresivos (AR).**
- **Modelos de medias móviles (MA).**
- **Modelos autorregresivos de medias móviles (ARMA),** concebidos como una combinación de los anteriores.
- **Modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA).**

Un **modelo autorregresivo** es la representación de un tipo de proceso aleatorio, que como tal, describe ciertos procesos variables en el tiempo. El modelo AR tiene como característica específica que la variable de salida debe depender linealmente de sus propios valores anteriores, es decir: la variable endógena de un período t es explicada por las observaciones de ella misma correspondientes a períodos anteriores, añadiéndose un término de error.

Los modelos autorregresivos se abrevian con la palabra AR, tras la que se indica el orden del modelo: AR(1), AR(2), etc. El orden del modelo expresa el número de observaciones retrasadas de la serie temporal analizada que intervienen en la ecuación. Así, un modelo AR(p) se define como:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i \cdot X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2.2)$$

Dónde:

- X_t es la variable de salida.
- ϕ_i son los parámetros del modelo.
- c es una constante.
- ε_t es un término de error.

Por otro lado, un **modelo de medias móviles** es aquel que explica el valor de una determinada variable en un período t en función de un término independiente y una sucesión de errores correspondientes a períodos precedentes, ponderados convenientemente. Contrariamente a los modelos autorregresivos, el MA es siempre estacionario. La notación MA(q) se refiere a un modelo de media móvil de orden q y su expresión es la siguiente:

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \cdot \varepsilon_{t-i} \quad (2.3)$$

Dónde:

- X_t es la variable de salida.
- θ_i son los parámetros del modelo.
- ε_{t-i} son los términos de error.

Los **modelos autorregresivos de media móvil (ARMA)** están formados por dos partes: una parte autorregresiva (AR) y otra de media móvil (MA). El modelo se conoce con el nombre de ARMA(p,q), donde p es el orden de la parte autorregresiva y q es el orden de la parte de media móvil. Su formulación surge de la combinación de ambos modelos descritos anteriormente:

$$X_t = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \phi_i \cdot X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \cdot \varepsilon_{t-i} \quad (2.4)$$

La formulación definida para el modelo ARMA conlleva una serie de relaciones recursivas ponderadas para relacionar el proceso aleatorio simulado en sucesivos pasos temporales. Al contrario que las metodologías basadas en la Transformada Rápida de Fourier, el modelo ARMA no requiere una gran capacidad de almacenamiento. Sin embargo, la estimación de los parámetros óptimos es muy sensible al paso de tiempo seleccionado (Kareem, 2008) y, en base a las características dinámicas del sistema, las metodologías de integración temporal requieren que el paso de tiempo no exceda un valor prescrito.

Los **modelos autorregresivos integrados de media móvil** (ARIMA) utilizan variaciones y regresiones de datos estadísticos con el fin de encontrar patrones para predicciones futuras. Estos modelos han sido usados en numerosos problemas de predicciones de series temporales debido a su robustez y su sencillez de implementación. En cambio, pueden aparecer dificultades cuando existen valores atípicos que influyen la estimación de valores futuros. El modelo se denota como $ARIMA(p,d,q)$ donde los parámetros p , d y q son números enteros no negativos que indican el orden de las distintas componentes del modelo: las componentes autorregresiva, integrada y de media móvil, respectivamente. El modelo $ARIMA(p,d,q)$ se puede expresar como:

$$X_t = -\left(\Delta^d \cdot X_t - X_t\right) + \phi_0 + \sum_{i=1}^p \phi_i \cdot \Delta^d \cdot X_{t-i} - \sum_{i=1}^q \theta_i \cdot \varepsilon_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2.5)$$

Dónde:

- d corresponde a las d diferencias que son necesarias para convertir la serie original en estacionaria.
- ϕ_0 es una constante.

Todos estos enfoques basados en la aplicación de filtros digitales pueden ser directamente implementados para la predicción de procesos de varias variables y dimensiones, aunque también pueden usarse conjuntamente con uno de los métodos de descomposición vistos en el apartado 2.1; en el último de los casos, cada una de las componentes del proceso es simulada como si se tratara de un proceso de una única variable.

Como resumen del presente apartado, cabe mencionar el gran ahorro computacional que los métodos de filtros digitales suponen con respecto a los métodos basados en la superposición de ondas. Sin embargo, el principal inconveniente en ellos radica en la elección de los parámetros numéricos adecuados para su solución, parámetros a los que los modelos basados en filtros digitales son muy sensibles.

2.3 SINGULARIDADES SEGÚN EL TIPO DE PROCESO SIMULADO

En la parte introductoria del presente *Capítulo 2 Revisión de Métodos para la Simulación Numérica de Señales* ya se aportó una enumeración de los posibles modelos de simulación a utilizar en función del tipo de proceso que se aborda. A medida que el carácter transitorio de un proceso se hace más plausible, o la distribución de las variables que dominan el proceso se desvían de una distribución gaussiana, el modelo resultante incrementa su dificultad y, a su vez, supone un incremento en el coste computacional necesario para su resolución. En los siguientes apartados se describen algunas de las singularidades y vías de desarrollo de las diferentes casuísticas identificadas.

2.3.1 PROCESOS TRANSITORIOS

Un proceso estacionario es un proceso estocástico cuya distribución de probabilidad en un instante de tiempo fijo, o en una posición fija, es la misma para todos los instantes de tiempo, o de posiciones. Por el contrario, un proceso transitorio es aquél en el que dicha distribución de probabilidad no permanece constante en el tiempo o en el espacio.

El carácter transitorio de algunos fenómenos es un aspecto difícil de capturar. Éste no solo hace que los parámetros estadísticos de la carga cambien en el tiempo, sino que también varía el ángulo de ataque de dicha carga respecto a la estructura; un caso muy típico de carga con un gran carácter transitorio es la carga asociada al viento. También existe un alto carácter transitorio en las cargas debidas a terremotos.

Los procesos transitorios pueden tener su origen en diversos motivos (Kareem, 2008):

- Media variable en el tiempo: típicamente, esta fuente de transitoriedad ha sido tratada como una moda en la señal y, una vez eliminada, los procesos restantes son tratados como estacionarios si no se encuentran otras fuentes de transitoriedad.
- Varianza variable en el tiempo: se debe fundamentalmente a la dependencia temporal de la amplitud de la señal, la cual introduce varianza con el tiempo en las fluctuaciones de la misma.
- Cambios en la varianza dependientes de la frecuencia: igual a la anterior, pero en este caso la dependencia de la amplitud es con el contenido de frecuencias de la señal.

Como se puede intuir, el problema resulta complejo únicamente con la consideración de uno de los orígenes anteriores; sin embargo, en ocasiones, el fenómeno objeto de estudio puede poseer varias de las fuentes mencionadas, lo que complica aún más la formulación a emplear.

De acuerdo a (Kareem, 2008), la mayoría de las simulaciones de procesos transitorios han evolucionado a partir de la generación de movimientos de origen sísmico en el terreno, un fenómeno de cuyo carácter transitorio se tiene constancia. Diversos modelos estocásticos transitorios han sido adoptados para la generación de registros sísmicos, incluyendo procesos de Poisson modulados por filtros, procesos estacionarios modulados y procesos estacionarios modulados por filtros. El desarrollo de modelos de series temporales de procesos no estacionarios como el AR, el MA y el ARMA también ha evolucionado a lo largo de los años a través de la simulación de registros sísmicos. A pesar de las ventajas computacionales, los modelos basados en series temporales para procesos no estacionarios pueden no ser sencillos debido a la imprecisa definición de la variación con el tiempo y de la función espectral, combinado con la dificultad asociada con la selección del orden del modelo.

Los autores Li y Kareem, en 1991, introdujeron por primera vez un esquema de simulación basado en una FFT para procesos transitorios y de múltiples variables. La utilización de la FFT fue posible a través de la aplicación de la descomposición estocástica expuesta en el apartado 2.1. En este esquema la matriz espectral descompuesta fue expandida en un sumatorio ponderado de funciones básicas y pesos dependientes del tiempo que son simulados el algoritmo basado en la FFT. La efectividad de esta técnica fue demostrada en la generación de señales sísmicas, las cuales pueden ser separadas en componentes dependientes del tiempo y la frecuencia, es decir, existe variación de la amplitud de la señal en función del tiempo y la frecuencia.

De acuerdo a (Kareem, 2008), el reconocimiento de la significancia de la carga de viento en estructuras durante el paso de tormentas ha provocado investigaciones con el objetivo de

modelizar y simular el campo de viento basado en medidas. Sin embargo, la no uniformidad y transitoriedad del campo de viento tanto en el tiempo como en el espacio ha planteado desafíos en su modelización y simulación. Los autores Wang y Kareem, entre los años 2004 y 2005, propusieron un eficiente modelo de simulación basándose en que la frecuencia instantánea de las fluctuaciones del viento en varias bandas de frecuencia sigue una distribución gaussiana; sin considerar ninguna hipótesis asociada con los modelos paramétricos, este enfoque ayuda a caracterizar y simular los vientos de una tormenta basados en una única muestra medida. Otros intentos se basan en el uso de modelos ARMA con variación temporal para la simulación de las características transitorias del viento en tormentas; modelos similares han sido desarrollados para capturar las características transitorias de los huracanes.

2.3.2 PROCESOS NO GAUSSIANOS

A lo largo de la última década se han realizado importantes progresos en la modelización y simulación de procesos gaussianos, mientras que los desarrollos en el área de los procesos no gaussianos han sido bastante escasos. Las líneas de investigación seguidas son dos (Kareem, 2008):

- Técnicas basadas en transformaciones estáticas.
- Técnicas de transformación con memoria.

El enfoque más expandido y usado para la simulación de procesos no gaussianos está basado en la transformación estática que relaciona el subyacente proceso gaussiano con la simulación del proceso no gaussiano. La técnica anterior, basada en transformaciones estáticas, no tiene memoria, por lo que puede fallar al tratar de encapsular cualquier dato que pueda estar presente en las señales objetivo. Existen técnicas que ofrecen una alternativa para así garantizar la preservación de memoria, como son los modelos Volterra, encuadrándose éstos en la segunda línea de investigación de la cual todavía no ha habido grandes avances.

2.3.3 SIMULACIONES CONDICIONADAS

En algunos casos, pueden existir localizaciones donde se disponga de series temporales del proceso que se quiere simular que no se encuentren completas; un ejemplo puede ser el fallo de los instrumentos de medición situados en una cierta localización que hayan fallado durante un determinado período de tiempo. También puede ocurrir que no se disponga de mediciones en puntos localizados que resulten de interés pero sí en puntos cercanos, por lo que puede ser interesante la generación de las señales en dichos puntos localizados a partir de los datos disponibles.

De acuerdo a (Kareem, 2008), existen dos enfoques fundamentales cuando se trata de **simulaciones condicionadas de procesos gaussianos**:

- Simulaciones basadas en estimaciones lineales.
- Simulaciones basadas en una función de densidad de probabilidad condicionada.

Ambos casos permiten la generación de series temporales del proceso deseado en nuevas localizaciones o puntos localizados cuando existe al menos una serie temporal dentro del intervalo de tiempo considerado. También es posible su uso cuando se pretende extender una determinada serie temporal con una duración menor a la deseada.

Otra posibilidad paralela a las anteriores es la utilización de una estimación estocástica lineal (LSE, del inglés *Linear Stochastic Estimation*), en la cual la información disponible de una serie de puntos se usa para la estimación de información a lo largo de todo el dominio. Se trata de una metodología fundamentalmente orientada a casos de ingeniería del viento, en la cual los valores estimados a partir de una serie temporal conocida en puntos de referencia se expresan en términos en serie de Taylor truncados al primer orden. De manera general, esta técnica estima una variable aleatoria como una combinación lineal de varias variables de referencia conocidas. Además, tiene la habilidad de reconstruir la variable aleatoria mediante el uso de unas pocas variables de referencia en conjunción con correlaciones. Todo esto ha sido de aplicación en la ingeniería del viento, donde el uso del LSE ha permitido reconstruir la serie temporal de presiones inducida por el viento a partir de la matriz de covarianza de análisis de carga estructural en tejados de edificios bajos. Debe recalcar que esta técnica permite reducir el almacenamiento de datos en bases de almacenamiento de gran escala y que no se logró reproducir fielmente las series temporales individuales, probablemente debido a la naturaleza no gaussiana de los datos.

Los **procesos no gaussianos**, según (Kareem, 2008), se experimentan con frecuencia en este campo debido a las fluctuaciones en la presión en regiones de flujo separadas o fluctuaciones de velocidad en condiciones extremas atmosféricas. Los autores Gurley y Kareem, en 1998, realizaron una simulación no gaussiana de varias variables basada en una corrección espectral que se extendió a una simulación condicionada usando una función de densidad de probabilidad condicionada que es aplicable tanto a procesos de banda ancha como de banda estrecha.

3 ACELEROGRAMAS SÍSMICOS ARTIFICIALES COMPATIBLES CON UN ESPECTRO DE RESPUESTA

En la actualidad, existen multitud de formas de definir la acción sísmica sobre las estructuras. Una de las primeras vías de definición pasó por el establecimiento de una fuerza sísmica asociada directamente a la aceleración máxima del terreno, un método que se comprobó que no era fiable en todos los casos tras la observación de daños poco relevantes en estructuras sometidas a fuerzas sísmicas muy elevadas; el motivo fundamental de esta poca fiabilidad subyace en la gran incertidumbre que existe en la mayoría de parámetros que definen un sismo, como pueden ser la intensidad del mismo, el contenido de frecuencias, la duración, etc. Otra posible vía consiste en la definición numérica de la acción sísmica, para lo que tradicionalmente se han empleado modelos deterministas basados en el conocimiento de las características del movimiento sísmico de un determinado terreno; a pesar de su sencillez y su fácil aplicación en el diseño de estructuras, siguen sin tener en cuenta la gran incertidumbre existente en las características de un terremoto, un proceso que es predominantemente aleatorio.

La definición de la acción sísmica está directamente condicionada por el tipo de análisis estructural que se va a abordar. A tal efecto, cuando se trata de análisis lineales, es suficiente con la utilización de espectros de respuesta para la definición de la acción sísmica y el análisis modal para el cálculo de la respuesta estructural. Sin embargo, en el caso de abordar análisis no lineales, el uso de espectros de respuesta no está completamente fundamentado desde un punto de vista teórico. En el segundo de los casos, en muchas normativas se adopta un espectro de respuesta inelástica que permite un diseño lineal equivalente, si bien en los casos de estructuras muy complejas es necesario recurrir al uso de acelerogramas; es decir, se pasa a un tipo de análisis transitorio en el dominio del tiempo.

Cuando se necesita el uso de acelerogramas para el diseño estructural, surge una nueva vía de incertidumbre asociada a la región sísmica en la que se emplace la estructura. En zonas sísmicas muy activas es mucho más probable que existan registros de aceleraciones del terreno que permiten una definición directa de la acción sísmica, o incluso el uso de dichos registros para el cálculo estructural; sin embargo, en zonas con menos actividad sísmica la cantidad de datos puede ser reducida o incluso nula. Es por esto último que se requieren métodos numéricos que permitan la definición de acelerogramas artificiales que sean compatibles con el espectro normativo definido en la zona. La revisión de uno de estos métodos y su implementación en un software de cálculo numérico es uno de los objetivos del presente TFM.

La mayoría de los procedimientos existentes a tal efecto están basados en el hecho de que cualquier función periódica puede ser expandida en una serie de ondas sinusoidales o, dicho de otra forma, se puede obtener una señal artificial mediante la superposición de una serie de ondas sinusoidales en el tiempo:

$$z(t) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i) \quad (3.1)$$

dónde ϕ_i , ω_i y A_i son el ángulo de fase, la frecuencia y la amplitud, respectivamente, asociadas a cada onda i . De esta forma, si se fijan un número n de frecuencias ω_i , que se encuentren equiespaciadas en el rango de interés, y generando aleatoriamente un número n de ángulos de fase ϕ_i , se pueden obtener de forma adecuada el mismo número de amplitudes A_i para conseguir que el espectro de la señal artificial generada sea compatible con el espectro de respuesta de referencia.

A lo largo del presente capítulo se expone la metodología implementada para conseguir lo estipulado en el párrafo anterior. Previamente a ello, se presenta un apartado dedicado a la exposición de algunos conocimientos que resultan básicos para la comprensión e implementación del método. Posteriormente, se aporta un ejemplo numérico que permite observar el proceso de cálculo.

3.1 CONOCIMIENTOS BÁSICOS

La metodología para la generación de señales sísmicas artificiales a partir de un espectro de respuesta de referencia incorpora una serie de conceptos y métodos de cálculo cuyo conocimiento resulta primordial para la comprensión del método general. En el presente apartado se muestran los aspectos más significativos en dicho sentido.

3.1.1 ESPECTROS DE REFERENCIA

Como ya se ha dicho, el método desarrollado en el presente capítulo permite la generación de señales sísmicas artificiales a partir de un espectro de respuesta de referencia. Un espectro sísmico de respuesta se puede definir como el resumen de la respuesta máxima de cualquier estructura de un grado de libertad (g.d.l. en adelante) a un acelerograma dado. En la implementación realizada se ha optado por disponer los dos espectros establecidos por la normativa sismorresistente de aplicación en España, a saber: la NCSE-02 (Fomento, 2009), para edificación, y la NCSP-07 (Fomento, 2008), para puentes.

Ambas normativas definen un espectro de respuesta en aceleraciones en función de unos periodos característicos, los cuales dependen de las características de los sismos de la zona, las características geotécnicas del terreno en el que se emplaza la estructura, el factor de amortiguamiento de la misma y el tipo de sismo a considerar (último, para el cuál la estructura debe resistir sin colapsar, y frecuente, para el cual la estructura debe resistir sin poner en peligro su funcionamiento normal). Además, se utiliza como referencia el valor máximo de la aceleración del terreno, que se puede obtener, según la NCSP-07 y la NCSE-02, como:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b \quad (3.2)$$

Dónde:

- a_c es la aceleración sísmica horizontal de cálculo, valor máximo que se alcanza en el terreno de la zona.
- a_b es la aceleración sísmica básica, correspondiéndose con el valor característico de la aceleración horizontal de la superficie del terreno.
- S es un coeficiente que tiene en cuenta las características del terreno.
- ρ es un coeficiente que tiene en cuenta la importancia de la estructura y el período de retorno del sismo de cálculo.

La filosofía de ambas normativas es muy similar, y simplemente difieren en algunas expresiones a la hora de definir la forma del espectro. Para una información más detallada al

respecto, se remite al lector a la NCSE-02 (Fomento, 2009), para edificación, y la NCSP-07 (Fomento, 2008), para puentes.

Como se ha dicho, los espectros de referencia normativos están definidos en términos de aceleraciones. Se verá posteriormente la necesidad de utilizar el espectro definido en términos de velocidades para el cálculo de la función estacionaria de densidad espectral de potencia, que garantiza la compatibilidad del acelerograma artificial con el espectro de referencia; además, conocer los espectros de velocidades y desplazamientos también resulta útil para visualizar la bondad del ajuste entre el espectro obtenido de la señal artificial y el espectro de referencia. A tal efecto, la relación entre ellos se muestra en las siguientes expresiones:

$$S_v = \frac{S_a}{\omega} \quad (3.3)$$

$$S_d = \frac{S_a}{\omega^2} \quad (3.4)$$

dónde S_a , S_v y S_d hacen referencia a la respuesta estructural en aceleraciones, velocidades y desplazamientos, respectivamente; y ω es la frecuencia natural asociada al grado de libertad n .

3.1.2 INTEGRACIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO: MÉTODO DE NEWMARK

La ecuación de equilibrio dinámico de un problema estructural en el que aparece la acción sísmica como fuerza desestabilizadora sigue la siguiente expresión:

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = f(t) = -M \cdot a(t) \quad (3.5)$$

dónde M , C y K son, respectivamente, las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura; x , $\dot{x}$ y $\ddot{x}$ son, respectivamente, los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura; y $a(t)$ es el acelerograma que representa la acción sísmica.

La ecuación (3.5) es una ecuación implícita, en la que no se puede obtener una solución de forma directa. Es por ello que se recurre a la integración numérica en el dominio del tiempo, integración que se realiza discretizando el tiempo en una serie de incrementos dt en los que la variación del estado de la estructura es mínima.

Para ello, se ha utilizado el método de Newmark (Sáez, 2016), un método implícito en el que la solución en cada paso de tiempo es función de la propia solución; en otras palabras, se utiliza la aceleración de un paso de tiempo para calcular la posición y la velocidad del mismo paso de tiempo. Las ecuaciones del movimiento según el método de Newmark son las siguientes:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \Delta t^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \cdot \ddot{x}_n + \beta \cdot \ddot{x}_{n+1} \right] \quad (3.6)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \Delta t \cdot \left[(1 - \gamma) \cdot \ddot{x}_n + \gamma \cdot \ddot{x}_{n+1} \right] \quad (3.7)$$

dónde n es el paso de tiempo en el que se conocen los valores, y $n+1$ el paso de tiempo en el cual se quieren calcular; los coeficientes del método, β y γ , se discuten más adelante. Si se agrupan en una nueva variable los datos de las ecuaciones (3.6) y (3.7) que ya se conocen para

hacerlas más compactas, se tienen las siguientes soluciones para desplazamientos y velocidades en función de la aceleración:

$$x_{n+1} = x_* + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot \ddot{x}_{n+1} \xrightarrow{\text{Siendo}} x_* = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \Delta t^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \beta\right) \cdot \ddot{x}_n \quad (3.8)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_* + \Delta t \cdot \gamma \cdot \ddot{x}_{n+1} \xrightarrow{\text{Siendo}} \dot{x}_* = \dot{x}_n + \Delta t \cdot (1 - \gamma) \cdot \ddot{x}_n \quad (3.9)$$

Si se sustituye lo anterior en la ecuación de equilibrio dinámico, se obtiene el siguiente desarrollo que permite obtener una expresión de la aceleración:

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{x}_{n+1} + C \cdot \left(\dot{x}_* + \Delta t \cdot \gamma \cdot \ddot{x}_{n+1} \right) + K \cdot \left(x_* + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot \ddot{x}_{n+1} \right) &= f_{n+1} \longrightarrow \\ \left[M + \Delta t \cdot \gamma \cdot C + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot K \right] \cdot \ddot{x}_{n+1} &= f_{n+1} - C \cdot \dot{x}_* - K \cdot x_* = b_{n+1} \longrightarrow \\ \ddot{x}_{n+1} &= \left[M + \Delta t \cdot \gamma \cdot C + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot K \right]^{-1} \cdot b_{n+1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

dónde se ha agrupado la parte conocida de la ecuación en el siguiente término para compactar la misma:

$$b_{n+1} = f_{n+1} - C \cdot \dot{x}_* - K \cdot x_* \quad (3.11)$$

Puesto que los valores iniciales de desplazamientos y velocidad son conocidos e iguales a cero, se puede obtener la solución para los distintos pasos de tiempo simplemente mediante la sustitución en las ecuaciones anteriores. El algoritmo que permite obtener la solución se presenta en el apartado siguiente.

3.1.2.1. Algoritmo de resolución

Los pasos a seguir para la obtención de la solución de un caso particular son los siguientes:

- 1) Calcular las matrices de masa M , rigidez K y amortiguamiento C .
- 2) Calcular la aceleración inicial de la estructura que permita el equilibrio en tiempo cero.
- 3) Elegir un paso de tiempo dt y, para cada paso, repetir el siguiente bucle mientras el tiempo t sea menor que el tiempo total de simulación para calcular x , $\dot{x}$ y $\ddot{x}$:

i. Calcular x_* y $\dot{x}_*$.

ii. Calcular $\left[M + \Delta t \cdot \gamma \cdot C + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot K \right]$ y b_{n+1} .

iii. Resolver el sistema que da el valor de $\ddot{x}_{n+1}$.

iv. Obtener los valores de x_{n+1} y $\dot{x}_{n+1}$ a partir de $\ddot{x}_{n+1}$.

3.1.2.2. Estudio de las constantes del método

Los coeficientes β y γ que regulan el método de Newmark tienen una serie de valores para los cuales el método es estable. Los valores óptimos del método son:

$$\beta = 0,25$$

$$\gamma = 0,50$$

para los cuales el método equivale a asumir un valor medio de la aceleración entre dos instantes de tiempo consecutivos (Sáez, 2016). La explicación a dichos valores se muestra en la **Figura 3.1**, obtenida de forma experimental para un caso en el que no se considera amortiguamiento. Sin embargo, la experiencia general ha demostrado que se obtienen valores representativos aun cuando se considera el amortiguamiento de la estructura.

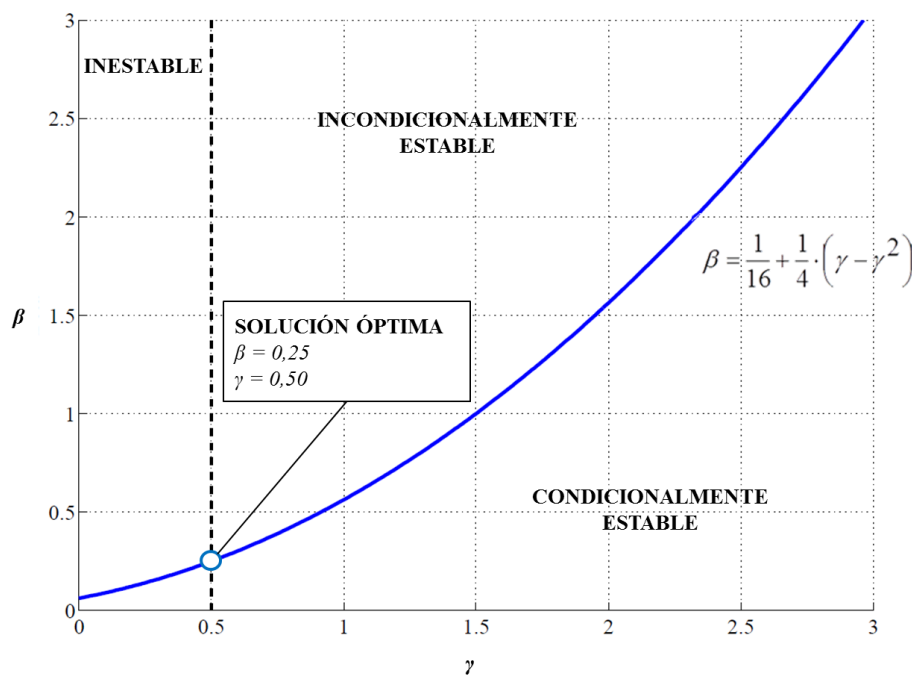


Figura 3.1. Estudio de las constantes del método de Newmark. Fuente: (Sáez, 2016).

3.1.3 OBTENCIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA ASOCIADOS A UNA SEÑAL

En el apartado anterior se ha introducido la ecuación (3.5), que establece la ecuación de equilibrio dinámico de una estructura de múltiples grados de libertad ante fuerzas de carácter sísmico. Si dicha ecuación se particulariza para una estructura de un único grado de libertad, adquiere la siguiente forma:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t) = -m \cdot a(t) \quad (3.12)$$

dónde m , c y k son la masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, del sistema de 1 g.d.l.

Utilizando las expresiones clásicas que relacionan los diferentes parámetros dinámicos de un sistema de un grado de libertad, la ecuación (3.12) se puede escribir como:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot \dot{x} + \omega_n^2 \cdot x = -a(t) \quad (3.13)$$

dónde ω_n es la frecuencia natural del sistema y ζ es el factor de amortiguamiento del mismo, definido como la relación entre el amortiguamiento de la estructura y el amortiguamiento crítico de la misma.

Conocida la naturaleza de la excitación sísmica, es decir, el acelerograma $a(t)$, se puede obtener el valor de la respuesta máxima de la estructura a lo largo del tiempo, para lo cual se puede realizar una integración en el dominio del tiempo de la ecuación (3.13) mediante el método de Newmark expuesto en el apartado anterior. Realizando este proceso para todo el rango de frecuencias que se considere, se puede obtener la forma del espectro de respuesta asociado a la señal sísmica, es decir, el resumen de la respuesta máxima de cualquier estructura de 1 g.d.l. frente a un acelerograma dado.

3.2 MODELO DE GENERACIÓN DE SEÑALES SÍSMICAS ARTIFICIALES

El modelo que se describe en el presente apartado permite la generación de señales sísmicas artificiales compatibles con un espectro de respuesta dado; dicha señal se expresa como la historia temporal de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del terreno. La información necesaria para su desarrollo ha sido obtenida de las referencias (Barbat et al., 1994b) y (Barbat and Canet, 1994a).

El método está basado, fundamentalmente, en el hecho de que cualquier función periódica puede ser expresada como la superposición de un conjunto de ondas sinusoidales moduladas por una función temporal envolvente que, en definitiva, define la forma del acelerograma:

$$a(t) = I(t) \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t + \phi_i) \quad (3.14)$$

Dónde:

- $a(t)$ es la historia de aceleraciones, es decir, el acelerograma buscado.
- $I(t)$ es la función envolvente que da forma al acelerograma. Con objeto de simular el carácter transitorio que poseen los terremotos reales, generalmente se utilizan funciones de intensidad envolventes deterministas previamente definidas que han sido obtenidas a partir de registros sísmicos reales. En la **Figura 3.2** se muestran las funciones de intensidad que se han implementado en la presente metodología.
- n es el número de ondas superpuestas que, al aumentar, mejora la compatibilidad del espectro al dar mayor contenido de frecuencias a la señal.
- ϕ_i es el ángulo de fase asociado a la onda i , siendo el responsable del carácter aleatorio de la señal artificial generada. Los ángulos de fase se han obtenido aleatoriamente siguiendo una distribución uniforme de los valores entre 0 y 2π . El hecho de que estos valores sean aleatorios propicia la generación de acelerogramas artificiales compatibles que, aunque posean diferentes detalles, son similares en cuanto al contenido de frecuencias.
- ω_i es la frecuencia asociada a la onda i . El conjunto de frecuencias se elige de manera regular en el intervalo fijado, de forma que en el cálculo se incluya todo el contenido de frecuencias de dicho intervalo.
- A_i es la amplitud asociada a la onda i . Dichas amplitudes son las responsables de la compatibilidad de la señal generada con el espectro de respuesta de referencia, pues se calculan, como se verá posteriormente, a partir de la función estacionaria de densidad espectral $G_z(\omega_n)$, obtenida a su vez del espectro de referencia en velocidades $S_v(\omega_n)$. La modificación de estas amplitudes permite mejorar la compatibilidad entre el espectro de la señal y el espectro de respuesta.

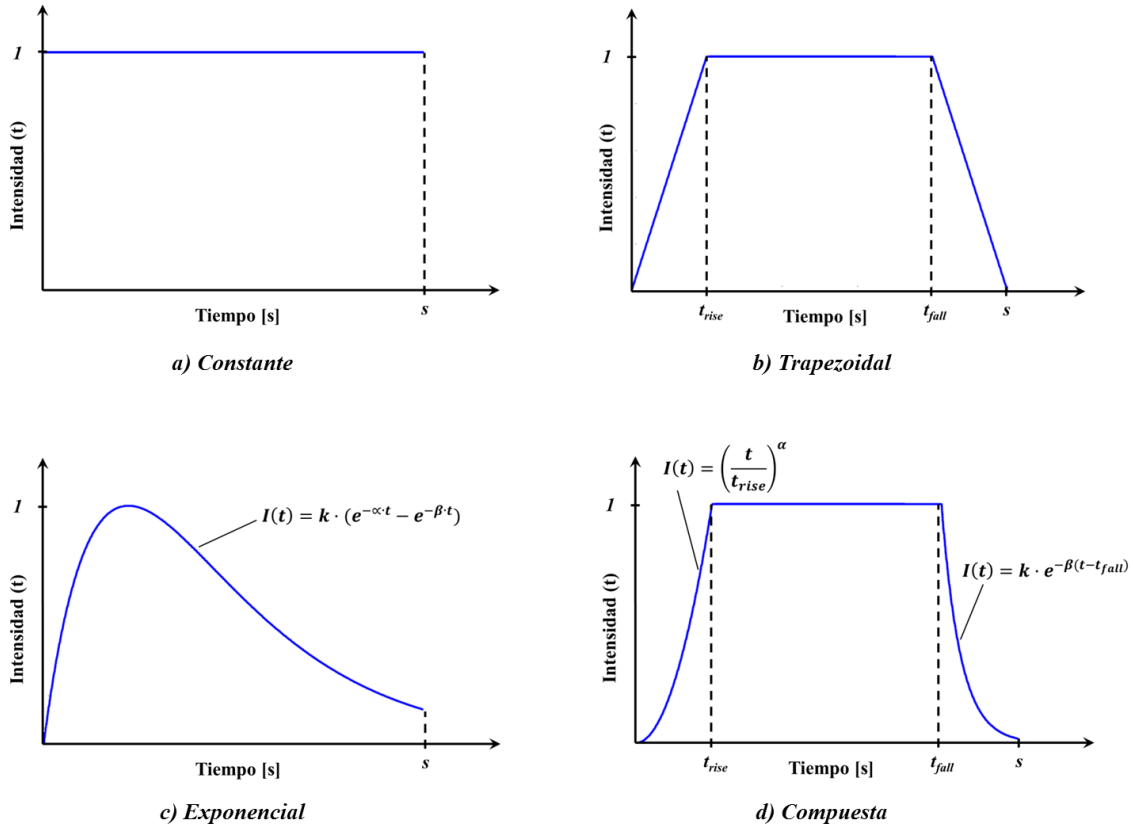


Figura 3.2. Tipos de funciones de intensidad envolvente. Fuente: Elaboración propia a partir de (Barbat et al., 1994b).

De esta forma, el modelo queda definido conociendo las características de un número n de ondas sinusoidales (ángulos de fase, frecuencias y amplitudes) y la función de intensidad envolvente. Obtenidas las aceleraciones del terreno, los valores de velocidad y desplazamiento se pueden obtener mediante las ecuaciones del movimiento de Newmark expuestas en el apartado 3.1.2.

3.2.1 CÁLCULO DE LAS AMPLITUDES

De acuerdo a lo expuesto en (Barbat et al., 1994b), la función de densidad espectral de potencia $G_z(\omega)$ de un proceso aleatorio estacionario y ergódico $z(t)$ se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación $R_z(\tau)$ de una función de muestra $z_1(t)$ del proceso

$$G_z(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} R_z(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} \cdot d\tau \quad (3.15)$$

dónde la función de autocorrelación $R_z(\tau)$ representa el valor medio del producto $z_1(t) \cdot z_1(t+\tau)$

$$R_z(\tau) = \overline{z_1(t) \cdot z_1(t+\tau)} \quad (3.16)$$

que, al ser el proceso estacionario y ergódico, es independiente de t y presenta los mismos valores para cualquier función muestra $z_1(t)$ de éste.

La función de densidad espectral de potencia representa, en una visión general, la contribución relativa de cada frecuencia ω_i al valor medio cuadrático del proceso. En un proceso

dado por una función aleatoria estacionaria con media nula, la varianza de la función es igual a la potencia total de su función de densidad espectral, por lo que:

$$\sigma_z^2 = \int_0^\infty G_z(\omega) \cdot d\omega \quad (3.17)$$

Por otro lado, la varianza de una función sinusoidal dada por:

$$\ddot{y}(t) = A \cdot \sin(t) \quad (3.18)$$

vale:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} A^2 \cdot \sin^2(t) \cdot dt = \frac{A^2}{2} \quad (3.19)$$

Consecuentemente, la potencia total del proceso definido por la ecuación (3.14) de acuerdo con (3.17) y (3.19) es:

$$\int_0^\infty G_z(\omega) \cdot d\omega = \sigma_z^2 = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{2} \quad (3.20)$$

Aproximando la potencia total como la integral del área debajo de la curva $G_z(\omega)$, se tiene:

$$\sum_{i=1}^n G_z(\omega_i) \cdot \Delta\omega_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_i^2}{2} \quad (3.21)$$

expresión que será válida solo cuando el número de sinusoides n en la función que define el proceso $z(t)$ sea alto.

Dado que la densidad espectral de potencia representa la contribución relativa de cada frecuencia ω_i , se puede aceptar la hipótesis (bastante precisa, aunque no exacta) de la igualdad de sumandos en la ecuación (3.21):

$$G_z(\omega_i) \cdot \Delta\omega_i \approx \frac{A_i^2}{2} \quad (3.22)$$

por lo que, dada dicha función, se pueden calcular las amplitudes que definen la ecuación (3.14) como:

$$A_i \approx \sqrt{2 \cdot G_z(\omega_i) \cdot \Delta\omega_i} \quad (3.23)$$

3.2.2 GENERACIÓN DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

Siguiendo con las especificaciones expuestas en (Barbat et al., 1994b), la determinación de la función de densidad espectral de potencia a partir de un espectro dado ha sido objeto de un considerable esfuerzo. El objetivo es calcular dicha función para una señal desconocida $z(t)$ a partir de la velocidad máxima relativa $S_v(\omega_n)$ y la fracción del amortiguamiento crítico ξ de un sistema con un grado de libertad excitado por la señal desconocida $z(t)$. Como aclaración, en la notación que se sigue a lo largo de este subapartado u , v y w hacen referencia a la respuesta en desplazamientos, velocidades y aceleraciones del mencionado sistema de un grado de libertad.

El procedimiento seguido, dentro de lo que se conoce como teoría de vibraciones aleatorias, empieza definiendo en términos probabilistas el espectro de pseudo-aceleraciones espectrales S_w del sistema con un grado de libertad en función de la desviación estándar de las aceleraciones totales medias en el sistema:

$$S_{w,s,p} = \zeta_{s,p} \cdot \sigma_w(\omega_n) \quad (3.24)$$

En esta ecuación $S_{w,s,p}$ es el nivel de aceleración bajo el cual el valor absoluto de la respuesta $w(t)$ del sistema tiene una probabilidad p de ser excedido cuando es excitado por una señal estacionaria de duración s ; $\sigma_w(\omega_n)$ es la desviación estándar de las aceleraciones totales del sistema lineal con frecuencia natural ω_n evaluada en el instante s ; $\zeta_{s,p}$ es un factor pico que es función de la probabilidad p y de la duración s .

El problema de la determinación del factor de pico $\zeta_{s,p}$ es conocido como el “problema del primer sobrepaso”, para el cual existen soluciones aproximadas. Considerando un sistema de un grado de libertad y una excitación estacionaria, la expresión general aproximada se simplifica en el siguiente factor de pico $\zeta_{s,p}$:

$$\zeta_{s,p} = \sqrt{2 \cdot \ln \left(-\frac{\omega_n \cdot s}{\pi \cdot \ln(p)} \cdot \left[1 - e^{\sqrt{4 \cdot \xi_s \cdot \ln \left(-\frac{\omega_n \cdot s}{\pi \cdot \ln(p)} \right)}} \right] \right)} \quad (3.25)$$

dónde ξ_s es un amortiguamiento ficticio dependiente de la duración s de la señal cuya expresión es:

$$\xi_s = \frac{\xi}{1 - e^{-2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s}} \quad (3.26)$$

que, desde un punto de vista práctico, se puede tomar igual al amortiguamiento real.

Un resultado básico de la teoría de vibraciones aleatorias de sistemas lineales establece la siguiente relación entre las funciones de densidad espectral de potencia de la entrada y la salida del sistema:

$$G_u(\omega, \omega_n) = G_z(\omega) \cdot |H_u^z(\omega, \omega_n)|^2 \quad (3.27)$$

dónde $G_u(\omega, \omega_n)$ es la densidad espectral de potencia de los desplazamientos relativos del sistema lineal con frecuencia natural ω_n , $G_z(\omega)$ es la densidad espectral de potencia del acelerograma y $|H_u^z(\omega, \omega_n)|$ es la función de transferencia del sistema lineal que relaciona las transformadas de Fourier del desplazamiento relativo del sistema con la de la aceleración. Para un tiempo de excitación s grande, ésta vale:

$$|H_u^z(\omega, \omega_n)|^2 = \left[(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot \xi_s^2 \cdot \omega_n^2 \cdot \omega^2 \right]^{-1} \quad (3.28)$$

De acuerdo a la ecuación (3.17), la desviación estándar de los desplazamientos relativos del sistema se escribe:

$$\sigma_u^2(\omega_n) = \int_0^\infty G_u(\omega, \omega_n) \cdot d\omega = \int_0^\infty G_z(\omega) \cdot |H_u^z(\omega, \omega_n)|^2 \cdot d\omega \quad (3.29)$$

Además, aplicando la relación expuesta en la ecuación (3.4), se establece la siguiente relación entre las desviaciones estándar del desplazamiento y de la aceleración:

$$\sigma_w(\omega_n) = \omega_n^2 \cdot \sigma_u(\omega_n) \quad (3.30)$$

por lo que se tiene:

$$\sigma_w^2(\omega_n) = \omega_n^4 \cdot \int_0^\infty G_z(\omega) \cdot \left| H_u^z(\omega, \omega_n) \right|^2 \cdot d\omega \quad (3.31)$$

Reemplazando (3.28) en (3.31), operando y simplificando, se obtiene:

$$\sigma_w^2(\omega_n) \approx G_z(\omega) \cdot \omega_n \cdot \left(\frac{\pi}{4 \cdot \xi_s} - 1 \right) + \int_0^{\omega_n} G_z(\omega) \cdot d\omega \quad (3.32)$$

Finalmente, reemplazando la ecuación (3.32) en (3.24), utilizando la relación expuesta en la ecuación (3.3) y despejando $G_z(\omega_n)$ se obtiene:

$$G_z(\omega) \approx \frac{1}{\omega_n \cdot \left(\frac{\pi}{4 \cdot \xi_s} - 1 \right)} \cdot \left[\frac{\omega_n^2 \cdot S_v^2(\omega_n)}{\xi_{s,p}^2} - \int_0^{\omega_n} G_z(\omega) \cdot d\omega \right] \quad (3.33)$$

que es la función buscada definida de manera recursiva. Para evaluar la expresión anterior, se empieza por la frecuencia natural más baja, donde la contribución del término integral de la derecha es nula; en el resto de pasos, para una frecuencia arbitraria ω_i , se conoce la integral numérica de $G_z(\omega_i)$ y, por lo tanto, se puede evaluar $G_z(\omega_{i+1})$. En la referencia (Barbat and Canet, 1994a) aparece más información acerca de la evaluación de la ecuación (3.33).

Se puede observar que la expresión anterior no es única, pues depende de la duración s del proceso y del nivel de probabilidad p asignado. Por un lado, el ajuste entre el espectro de respuesta y el espectro calculado será mejor cuanto más grande sea la duración s de la señal. Por otro lado, de acuerdo a (Barbat et al., 1994b) y (Barbat and Canet, 1994a), los ensayos numéricos demuestran que con un valor de $p = 0,367$ (para que $\ln(p) = -1$) se obtienen excelentes resultados incluso si la duración de la señal es relativamente corta.

3.2.3 MEJORA DE LA SEÑAL ARTIFICIAL

Tras haber calculado el valor de la función de densidad espectral de potencia para todo el rango de frecuencias establecido de acuerdo a la ecuación (3.33), y habiendo definido una función de intensidad, se está en disposición de generar una señal de excitación que sea compatible con el espectro de respuesta mediante las expresiones (3.23) y (3.14). El resultado es una función no estacionaria $a(t)$ que se conforma como el acelerograma sísmico del terreno.

Sin embargo, la señal generada por el procedimiento descrito presenta una serie de deficiencias que, en algunos casos pueden ser completamente eliminadas, y en otros fácilmente atenuadas. Para ello se han seguido las especificaciones expuestas en (Barbat et al., 1994b), que establece un total de tres ajustes orientados a la mejora de la calidad de la señal artificial.

3.2.3.1. Ajuste de línea base

El acelerograma $a(t)$ generado por el método anterior se puede procesar de igual forma que si se tratara de un registro de un terremoto real. La corrección de la línea de base se realiza para intentar que tanto la velocidad como el desplazamiento de la señal generada tiendan a un valor nulo al final del terremoto. Para ello se realiza una corrección parabólica de la línea de base del acelerograma, una corrección cuyos coeficientes se eligen para minimizar el valor cuadrático medio de la velocidad.

Considerando la variable $a(t)$ como un acelerograma obtenido mediante el procedimiento descrito, el acelerograma tras la corrección de línea base $a'(t)$ tiene la siguiente forma:

$$a'(t) = a(t) + c_0 + c_1 \cdot \frac{t}{s} + c_2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \quad (3.34)$$

dónde s es la duración de la señal. Los coeficientes c_i se seleccionan de forma que el valor cuadrático medio de la velocidad en el intervalo $[0, s]$ sea mínimo; con ello, se llega a la siguiente relación:

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -300 & 900 & -630 \\ 1800 & -5760 & 4200 \\ -1890 & 6300 & -4725 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

dónde los coeficientes b_k se obtienen de la siguiente forma:

$$b_k = s^{-k-3} \cdot \int_0^s v(t) \cdot t^{k+1} \cdot dt \quad k = 0, 1, 2 \quad (3.36)$$

siendo $v(t)$ la velocidad correspondiente al acelerograma $a(t)$.

Las integrales de la ecuación (3.36) se han evaluado numéricamente mediante la regla del trapecio, suponiendo que la aceleración $a(t)$ varía linealmente entre dos instantes de tiempo consecutivos; esta aproximación es válida, obviamente, si el incremento de tiempo elegido en los cálculos para la obtención del acelerograma es suficientemente pequeño.

Después de realizar la corrección de la línea base del acelerograma, las velocidades y desplazamientos se pueden obtener mediante doble integración en el tiempo del acelerograma $a'(t)$; para ello, se pueden usar las ecuaciones del movimiento de Newmark expuestas en el apartado 3.1.2.

3.2.3.2. Ajuste de la aceleración máxima

La aceleración máxima que resulta del procedimiento de obtención de acelerogramas sintéticos es una variable aleatoria; a pesar de que el espectro de respuesta de referencia se escalada adecuadamente con una aceleración máxima, el procedimiento no garantiza que en el resultado final aparezca dicha aceleración, aunque la diferencia existente entre la obtenida y la esperada sea relativamente pequeña.

Para realizar el ajuste de la aceleración máxima se debe actuar según dos casos diferenciados:

- Si el valor absoluto de la aceleración máxima obtenida es menor que la especificada, simplemente se puede modificar su valor absoluto al valor deseado.
- Si el valor absoluto de la aceleración máxima obtenida es mayor que la especificada, se escalan todas aquellas aceleraciones cuyo valor absoluto sobrepase el especificado.

Con el ajuste descrito se puede garantizar que sólo exista una aceleración máxima de valor absoluto igual al prefijado. El valor prefijado se ha tomado igual a la aceleración de cálculo que se define en la NCSE-02 (Fomento, 2009) y la NCSP-07 (Fomento, 2008).

3.2.3.3. Ajuste de la respuesta espectral

El hecho de que el procedimiento de cálculo utilice expresiones aproximadas, junto con las dos correcciones realizadas en los apartados anteriores, propician que el espectro de respuesta de la señal generada no sea exactamente igual al de referencia, aunque sí compatible. Por lo tanto, aparece la posibilidad de mejorar el ajuste entre ambos espectros.

Este ajuste supone un procedimiento cíclico en el que se compara el espectro de respuesta de la señal con el de referencia en un conjunto de frecuencias de control ω_j (que por defecto pueden ser iguales al número total de frecuencias usadas en el cálculo), obteniendo en cada frecuencia de control la relación entre la respuesta deseada y la calculada. El ajuste de la respuesta espectral pasa por la modificación del valor correspondiente de la función de densidad espectral de potencia en proporción al cuadrado de la siguiente relación:

$$G(\omega_j)_{i+1} = G(\omega_j)_i \cdot \left[\frac{S_v(\omega_j)}{S_{v,i}(\omega_j)} \right]^2 \quad (3.37)$$

Con estos nuevos valores se genera una nueva señal de excitación, llevando a cabo el procedimiento cíclico junto con el resto de ajustes hasta alcanzar un grado de error aceptable. Este error se ha evaluado como el error relativo medio de todos los valores analizados.

El procedimiento descrito no es convergente en todas las frecuencias de control. Esto es así porque el proceso iterativo se basa en la hipótesis de que el valor de la densidad espectral de potencia en una frecuencia dada depende exclusivamente de tal frecuencia, hipótesis que no es del todo cierta pues también existe dependencia de los valores de dicha función en frecuencias cercanas. Sin embargo, en las primeras iteraciones del proceso el efecto de las frecuencias lejanas es despreciable, por lo que es una buena hipótesis para procesos cíclicos con pocas iteraciones.

3.2.4 PARÁMETROS DE INTERÉS

Tras la generación y corrección de la señal artificial, es posible definir y calcular algunos parámetros que pueden resultar de interés para el análisis físico de la señal sísmica. Algunos de los parámetros más importantes dentro del campo de la ingeniería sísmica se han obtenido de (Carreño et al., 1999) y (Susagna et al., 2012), detallándose su significado físico y la expresión que permite obtenerlos en los siguientes puntos:

- 1) **Intensidad de Arias (IA):** es una medida de la energía del terremoto, definida de acuerdo a la siguiente expresión, donde $a(t)$ es la historia de aceleraciones y t_f es el tiempo total de la señal:

$$IA = \frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^{t_f} a^2(t) \cdot dt \quad (3.38)$$

- 2) **Duración significativa (TD):** este concepto relaciona la duración con la fase de máxima energía del movimiento, quedando representado por el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la intensidad de Arias.

- 3) **Gráfico de Husid:** permite la visualización gráfica del significado de la duración significativa. Se trata de una gráfica en la que el eje de abscisas contiene la duración de la señal, y el eje de ordenadas los valores acumulados normalizados de la intensidad de Arias en cada instante t ; la expresión resultante es la siguiente:

$$\frac{It}{IA} = \frac{\frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^t a^2(t) \cdot dt}{\frac{\pi}{2 \cdot g} \cdot \int_0^{t_f} a^2(t) \cdot dt} \quad (3.39)$$

- 4) **Velocidad Absoluta Acumulada (CAV):** es una función que está relacionada con el daño estructural al incluir, además de la amplitud del movimiento, los efectos acumulativos de su duración. Su expresión es la siguiente:

$$CAV = \int_0^{t_f} |a(t)| \cdot dt \quad (3.40)$$

- 5) **Intensidad de Houssner (IH):** es usada como medida del daño potencial del acelerograma en estructuras tipo. Se obtiene, en función del período T y el índice de amortiguamiento ξ de la estructura, como:

$$IH = \int_{0,1}^{2,5} S_v(T, \xi) \cdot dT \quad (3.41)$$

3.3 DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO IMPLEMENTADO

Todo el procedimiento descrito en el apartado anterior ha sido implementado en el software de cálculo numérico MatLab (versión 2015b), con el objeto final de crear un programa que permita la obtención de señales sísmicas artificiales para su uso en análisis estructurales que así lo requieran.

En el presente apartado únicamente se muestra un esbozo que ayude al lector a la hora de entender el procedimiento de cálculo del algoritmo.

El código implementado comienza con la petición de una serie de datos de entrada necesarios para los distintos cálculos que realiza. A tal efecto, se piden los datos relativos a la duración y discretización de la señal, al espectro de referencia que se utilizará en los cálculos, a la función de intensidad que modula la señal y al procedimiento cíclico utilizado (iteraciones máximas y error asumible).

Introducidos los datos de entrada, el algoritmo sigue los siguientes pasos:

- 1) Cálculo del espectro de referencia según la normativa especificada.
- 2) Cálculo de la envolvente de intensidad que establece la forma de la señal.
- 3) Generación de la función de densidad espectral de potencia.
- 4) Cálculo de la señal artificial, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento cíclico:
 - i. Cálculo del acelerograma $a(t)$ a partir de las variables obtenidas en los pasos 1 a 3.
 - ii. Ajuste de línea de base del acelerograma $a(t)$, obteniendo un nuevo acelerograma $a'(t)$.
 - iii. Cálculo de los desplazamientos y velocidades asociados a $a'(t)$ mediante el método de integración temporal de Newmark.
 - iv. Corrección de la aceleración máxima de la serie $a'(t)$.
 - v. Obtención del espectro de respuesta asociado a la señal artificial generada.
 - vi. Obtención de los nuevos valores de la función de densidad, buscando de esta forma un ajuste de la respuesta espectral.
 - vii. Si el error relativo medio obtenido al comparar ambos espectros (el de referencia y el obtenido de la señal artificial) es menor al error asumible o se ha alcanzado el número máximo de iteraciones fijado, fin del paso 4. Si no se cumple lo anterior, vuelta al paso i.
- 5) Cálculo de los parámetros de interés de la señal generada.

Lo anterior se muestra de forma resumida en el diagrama de flujo de la **Figura 3.3**.

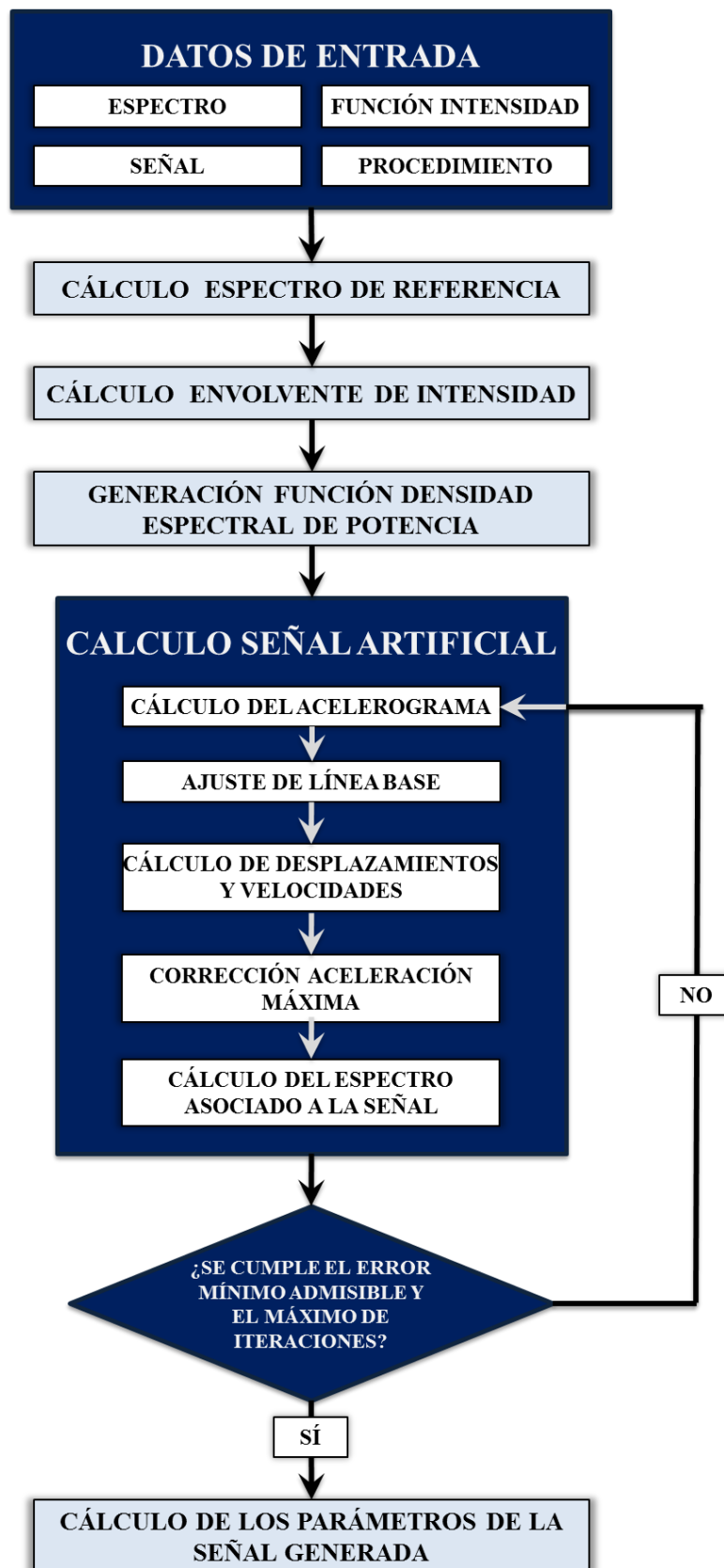


Figura 3.3. Diagrama de flujo del código implementado para la generación de señales sísmicas artificiales.
Fuente: Elaboración propia.

3.4 IMPLEMENTACIÓN EN UNA INTERFAZ: SIMULACEL©

La metodología de cálculo de señales sísmicas artificiales, desarrollada en MatLab siguiendo las pautas recogidas en el apartado anterior, se ha implementado en una interfaz gráfica con el objetivo de disponer de un entorno más atractivo para la generación de señales sísmicas artificiales. Dicha interfaz ha sido denominada SimulAcel© (ver **Figura 3.4**), siendo aportada en el CD adjunto al presente documento junto con un vídeo en el que se muestra un ejemplo de uso del programa; su manual de usuario se puede consultar en el *Anejo A – Manual de Usuario de SimulAcel©*.



Figura 3.4. Inicio del programa SimulAcel©. Fuente: Elaboración propia.

La estructura de SimulAcel© se puede resumir de la siguiente forma:

- **Módulo 1:** este módulo se concibe como el preproceso del programa, comprendiendo dos menús:
 - Menú (S): en este primer menú se procede a la definición del espectro de referencia en el que se basará la señal sísmica generada. En la versión actual se puede definir el espectro de acuerdo a la NCSE-02 y la NCSP-07.
 - Menú (I): el segundo menú permite definir la función de intensidad envolvente que modulará el acelerograma de la señal sísmica. En la actual versión se puede elegir entre cuatro funciones distintas.
- **Módulo 2:** en este módulo se establecen las correcciones de la señal que serán aplicadas durante el cálculo; se puede visualizar, además, el grado de ajuste del espectro de respuesta de la señal a medida que avanza el cálculo.
- **Módulo 3:** el último módulo permite la visualización de los parámetros que definen la señal artificial generada, así como la forma de la misma.

Finalmente, mencionar que el programa permite guardar los resultados obtenidos en cada módulo, además de cargar dichos resultados en sesiones posteriores. Por otro lado, existen botones de exportación de aquellas imágenes y valores más significativos, pudiéndose usar los resultados obtenidos en análisis estructurales posteriores. Para más información, se remite al lector al manual de usuario del programa.

3.5 EJEMPLO NUMÉRICO

En el presente apartado se aporta un ejemplo numérico para visualizar los resultados que permite obtener el procedimiento descrito según la implementación del mismo realizada, así como el efecto de las mejoras de la señal que se han tenido en cuenta.

Se ha partido del espectro de respuesta definido en la NCSP-07. La pasarela suspendida que posteriormente será analizada en el presente TFM se encuentra ubicada en el municipio de Zuheros, en el cual se da una aceleración sísmica básica a_b de $0,07 \cdot g$ y un coeficiente de uniformidad K de 1. Al tratarse de una construcción de importancia normal, el factor de importancia γ_I toma un valor de 1, habiéndose elegido un período de retorno P_r de 500 años y un tipo de sismo último. Para el terreno, se ha considerado que éste es de Tipo I, con lo que el coeficiente de terreno adopta un valor de 1. Finalmente, el factor de amortiguamiento ζ de la estructura se ha tomado igual al 4% (de acuerdo a la NCSP-07 para puentes de acero bajo la acción del sismo último de cálculo). Con todos estos datos, se ha obtenido un espectro en aceleraciones que se muestra en la **Figura 3.5** y un valor de la aceleración máxima o aceleración de cálculo a_c igual a $0,55 \text{ m/s}^2$ (valor necesario para el ajuste de pico del acelerograma). Estos valores se corresponden con una componente horizontal del sismo.

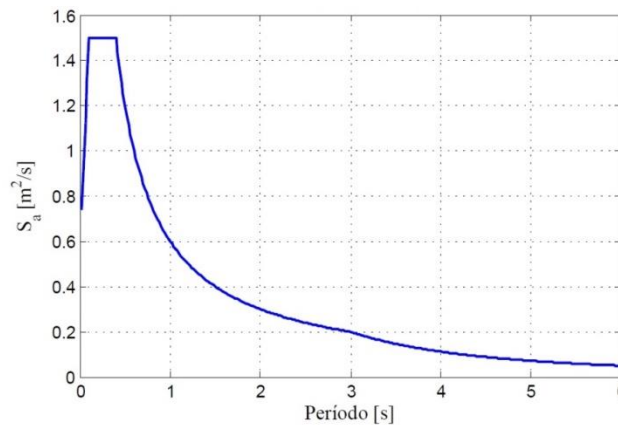


Figura 3.5. Espectro en aceleraciones obtenido. Fuente: Elaboración propia.

Para la generación de la señal artificial se ha adoptado una duración s de 15 segundos, y un incremento de tiempo dt de 0,01 segundos, lo que determina un total de 1501 valores de aceleración. La función de intensidad elegida ha sido de tipo trapezoidal, con un tramo de subida hasta los 4 s, un tramo constante hasta los 12 s, y un tramo de bajada hasta los 15 s (ver **Figura 3.6**). Finalmente, la simulación se ha realizado estipulando un número máximo de 10 iteraciones y un error relativo mínimo admisible del 10%.

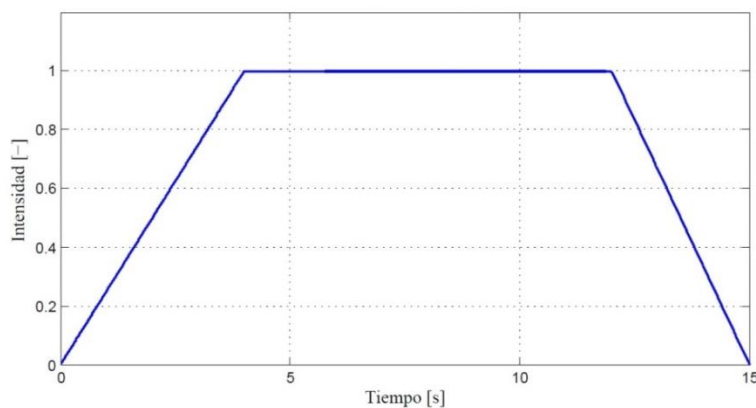


Figura 3.6. Función de intensidad elegida. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de los datos anteriores, el algoritmo obtiene una serie de resultados que es interesante observar. En primer lugar, se muestra en la **Figura 3.7** la señal artificial obtenida en la primera iteración antes de realizar las correcciones para su mejora; se puede observar que, aunque la aceleración es cero al final del sismo, la velocidad adquiere cierto valor, y especial es el caso del desplazamiento, que al final del sismo alcanza valores en el entorno de los máximos obtenidos durante el terremoto. Este problema se soluciona mediante la corrección de la línea base del acelerograma, obteniéndose los resultados que se muestran en la **Figura 3.8**; sin embargo, aún se aprecian valores de aceleración por encima del máximo prefijado, por lo que es necesaria la corrección del pico del acelerograma.

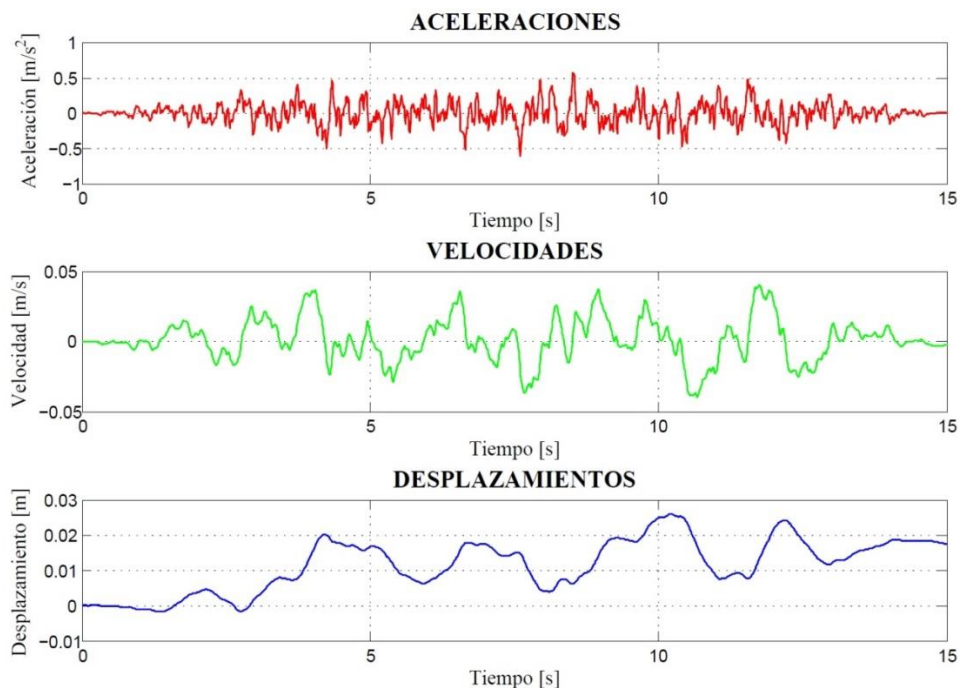


Figura 3.7. Solución obtenida en la primera iteración previamente a la realización de correcciones. Fuente: Elaboración propia.

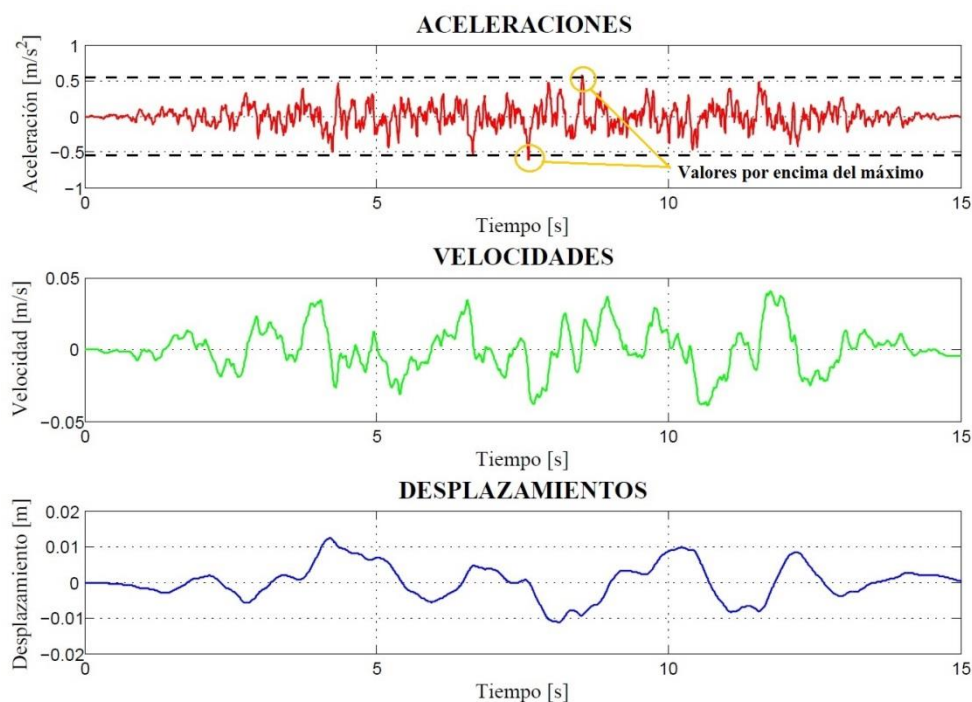


Figura 3.8. Solución obtenida en la primera iteración tras la corrección de línea de base del acelerograma. Fuente: Elaboración propia.

La corrección del pico del acelerograma aporta los resultados que se muestran en la **Figura 3.9**. En dicha figura se comprueba que únicamente existe un valor de aceleración igual al máximo prefijado; además, se puede comprobar, en comparación con la **Figura 3.8**, que la posición del máximo se encuentra en el mismo instante de tiempo, y que el resto de valores superiores al máximo prefijado se han escalado.

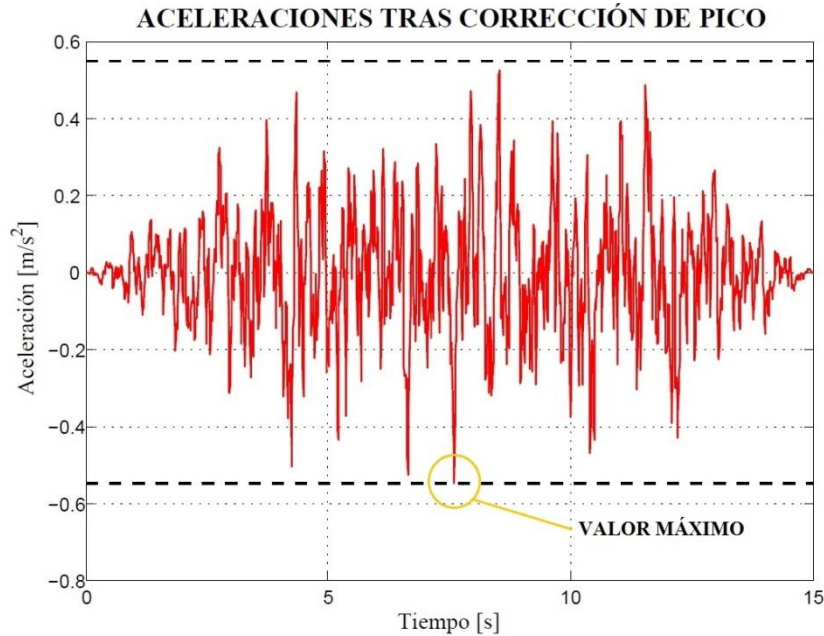


Figura 3.9. Acelerograma de la primera iteración tras corrección de pico. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la última corrección ajusta la respuesta espectral de la señal artificial generada. En la primera iteración se ha obtenido un error relativo medio del 17,53%. El procedimiento cíclico de ajuste ha permitido que, en la iteración 6, el error medio relativo se haya reducido hasta un 9,86%, cumpliendo con el criterio de error admisible preestablecido. Si se comparan los resultados en ambos casos (ver **Figura 3.10**), se puede apreciar que la mejora del ajuste es evidente. La señal obtenida finalmente en la iteración 6 es la mostrada en la **Figura 3.11**.

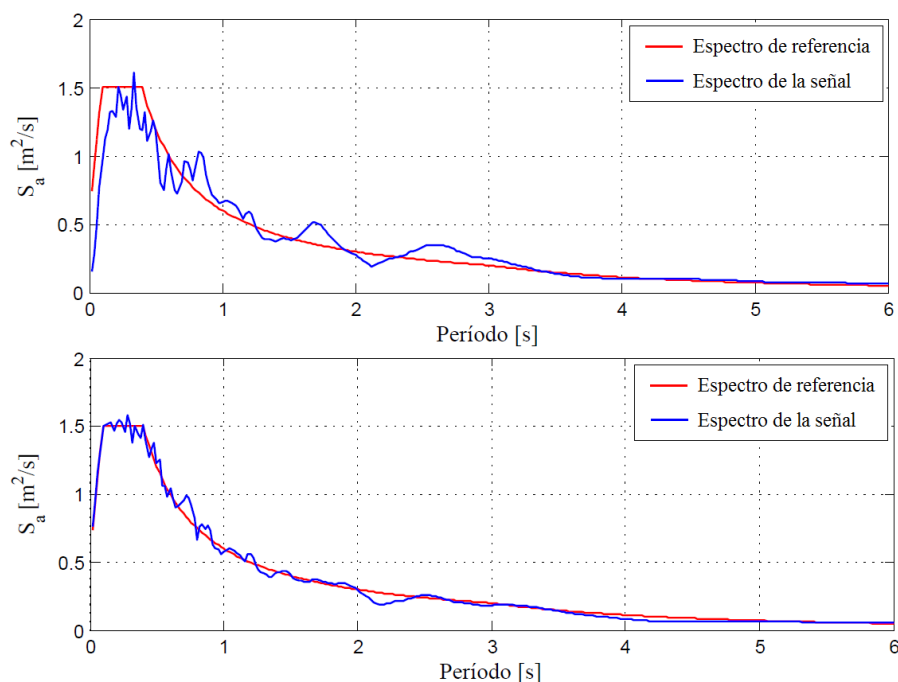


Figura 3.10. Comparación entre espectros para la iteración 1 (arriba) y 6 (abajo). Fuente: Elaboración propia.

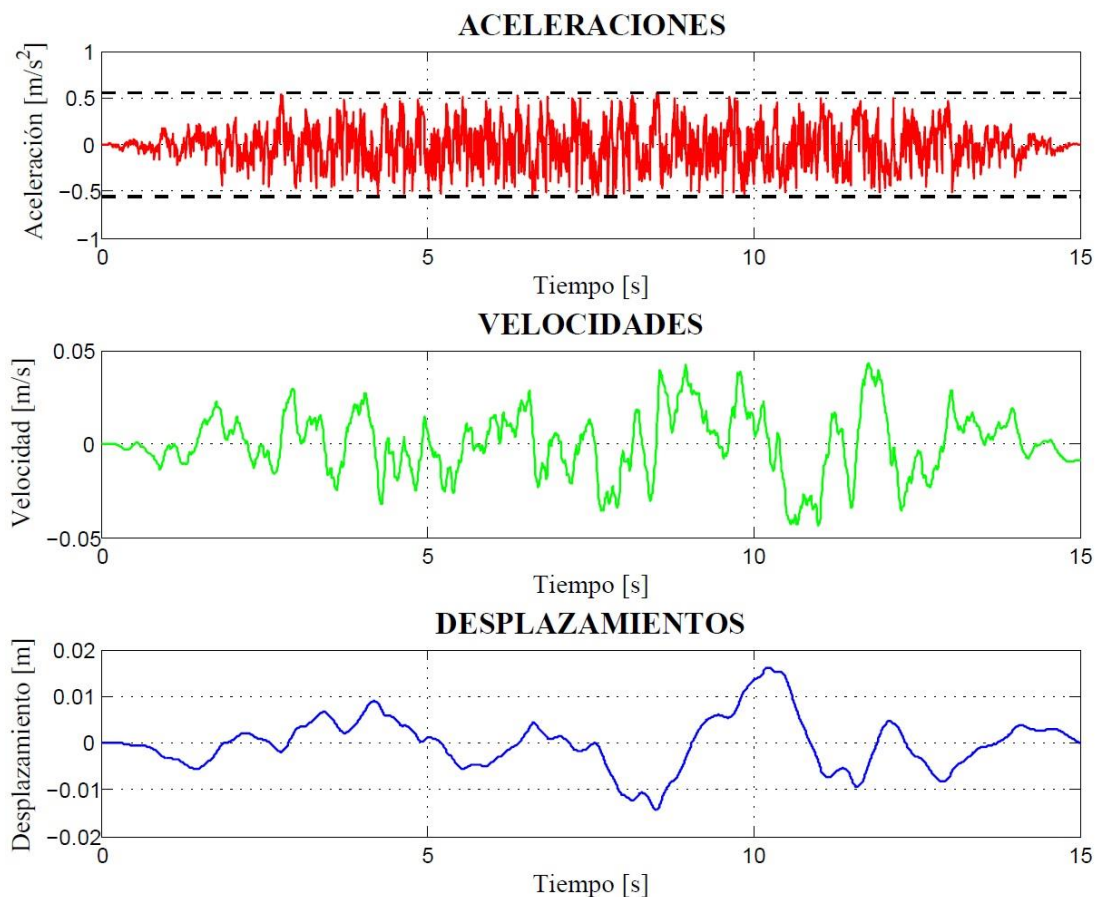


Figura 3.11. Señal obtenida en la iteración 6. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de interés de la señal no se analizan en este apartado ya que únicamente se pretende mostrar la potencia de las mejoras de la señal artificial generada; dichos parámetros se analizarán, posteriormente, en el *Capítulo 6 Análisis de la pasarela* cuando se aborde la generación de la señal que será utilizada en la aplicación práctica.

Como aportación final, cabe mencionar que los resultados obtenidos pueden variar notablemente en algunos casos debido al carácter aleatorio que tiene el problema de la generación de señales artificiales. Esto provoca que, en algunos casos, el error relativo medio sea muy difícil de reducir por debajo de valores admisibles.

4 GENERACIÓN ESTOCÁSTICA DE HISTORIAS DE VELOCIDAD DE VIENTO

El análisis de estructuras frente a cargas de viento se puede abordar desde varias perspectivas, ya que existen diferentes fenómenos relacionados con el efecto del viento, y con diversos grados de complejidad, según el tipo de método de cálculo empleado y la obtención de la carga que el viento ejerce sobre la estructura.

Generalmente, la opción más sencilla para el cálculo de la fuerza asociada a la acción del viento sobre una estructura es el establecimiento de una fuerza estática equivalente, normalmente mayorada. Esta vía de cálculo es la implementada en la mayoría de normativas y guías que establecen las características de la acción del viento. Sin embargo, dado que esta metodología simplificada está orientada a su uso en estructuras sencillas, no siempre se puede recurrir al uso de fuerzas estáticas equivalentes para el cálculo de estructuras; en casos de estructuras complejas por su tamaño, por su esquema estructural, por el comportamiento de los materiales o por el comportamiento no lineal de la estructura, puede ser necesario recurrir a la definición de la carga a través de metodologías más complejas.

La definición de la carga de viento se hace especialmente importante en casos de análisis dinámicos en estructuras que se puedan ver sometidas a efectos vibratorios como consecuencia del viento. En algunos casos puede ser suficiente con recurrir al uso de definiciones en el dominio de la frecuencia, siempre que la respuesta de la estructura se ajuste a los parámetros del comportamiento lineal. En otros casos, aparecen estructuras con un comportamiento no lineal en los que ya no es válido el análisis mediante espectros de frecuencia o mediante análisis armónicos, siendo necesario recurrir a una definición temporal de la carga que permita la realización de un análisis transitorio en el dominio del tiempo.

Para este último caso se pueden adoptar diversas metodologías para la generación de una historia de velocidades de viento que permita obtener unas cargas equivalentes en cada instante de tiempo, las cuales se aplican a la estructura objeto de estudio. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, existen métodos basados en el uso de filtros digitales (AR, MA, ARMA, etc.), así como métodos basados en espectros de referencia del viento.

En el presente capítulo se exponen las claves de la metodología basada en espectros de referencia empleada para la generación estocástica de historias de velocidad de viento. En primer lugar se aportan algunos conocimientos básicos necesarios para definir la acción del viento y sus características; además, se exponen consideraciones necesarias para la definición del modelo. Posteriormente se describen las especificaciones relativas al modelo de generación implementado, se estudia el efecto de algunos de los parámetros más importantes del método, y se aportan ejemplos de cálculo numéricos a partir de la metodología implementada en una interfaz de usuario gráfica mediante el software de cálculo numérico Matlab (versión 2015b). Finalmente, se aborda el estudio de la obtención de las fuerzas equivalentes a partir de las series de viento.

4.1 CONOCIMIENTOS BÁSICOS

En el presente apartado se aportan los conocimientos básicos necesarios para entender la metodología de generación estocástica de historias de velocidad de viento implementada. En primer lugar se han estudiado los tipos de vibraciones a los que puede dar origen el viento en estructuras, centrando el análisis en estructuras tipo puente al ser una pasarela peatonal la analizada en el presente trabajo. Posteriormente se exponen algunas de las características fundamentales del campo de velocidades de viento, en concreto el perfil de velocidades generado y el fenómeno de turbulencia del viento. Finalmente se aportan nociones sobre el espectro en frecuencias de la componente turbulenta del viento.

4.1.1 VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS POR EL EFECTO DEL VIENTO

Los fenómenos aerodinámicos juegan un papel muy importante en el diseño y análisis de algunas estructuras, en especial en puentes esbeltos muy flexibles como pueden ser los puentes atirantados o los puentes colgantes. Las estructuras soportadas por cables pueden estar sometidas a grandes movimientos dinámicos inducidos por el viento, existiendo diversos mecanismos de interacción viento-estructura que pueden producir vibraciones en la misma. Los mecanismos de importancia en el diseño de estructuras son el flameo (*flutter*), el bataneo (*buffeting*), el desprendimiento de vórtices (*vortex shedding*) y el galope (*galloping*).

El **flameo** (*flutter*) es una vibración autoinducida que ocurre cuando una superficie sustentadora se dobla bajo una carga aerodinámica, inestabilidad potencial en el caso de puentes suspendidos y colgantes de gran longitud, flexibles y esbeltos. Para un cierto valor de velocidad del viento las fuerzas aerodinámicas actuantes tienen la capacidad de generar oscilaciones en la estructura, en ocasiones incrementando la amplitud de vibración hasta valores extremos que comprometen la seguridad de la misma. La velocidad del viento a la que se produce el flameo depende de las frecuencias naturales verticales y de torsión, y de la forma de la sección (del tablero en puentes), la cual determina las fuerzas aerodinámicas actuantes. Es por este fenómeno de inestabilidad que el Puente Tacoma Narrows colapsó en 1940 (Billah and Scanlan, 1991). Para asegurar la estabilidad frente al flameo la velocidad del viento más baja que induce inestabilidad debe exceder la velocidad máxima de diseño de la estructura.

El **bataneo** (*buffeting*) se define como la carga inestable generada por fluctuaciones en la velocidad del viento actuante, generando movimientos irregulares en la estructura. La respuesta de la misma depende de la intensidad de la turbulencia, de la forma de los elementos estructurales y de las frecuencias naturales. En este caso, la seguridad de la estructura no suele verse comprometida, pero puede generarse un bajo nivel de confort para los usuarios y desembocar en la fatiga de algunos elementos estructurales.

El **desprendimiento de vórtices** (*vortex shedding*) es un flujo inestable generado a ciertas velocidades de viento según el tamaño y forma del cuerpo cilíndrico. En el flujo se crean vórtices en la parte de atrás del cuerpo y se desprenden de manera periódica de cada lado. El desprendimiento de vórtices se produce cuando el flujo de viento pasa por un objeto poco afilado: el flujo sobrepasa al objeto generando vórtices de baja presión en su dirección de avance, haciendo que el elemento tienda a moverse hacia las zonas de baja presión; si la frecuencia del desprendimiento de vórtices coincide con la frecuencia de resonancia de la estructura, ésta comenzará a sincronizarse por efecto del *lock-in* y el movimiento será autoestable. En un principio, se propuso que el colapso del puente de Tacoma Narrows fue causado por el desprendimiento de vórtices (Billah and Scanlan, 1991), pero dicha hipótesis fue rechazada debido a que la frecuencia del desprendimiento de vórtices no coincidía con la del puente. Como ya se ha comentado, el fallo fue causado por el flameo aerolástico.

El **galope** (*galloping*) es una inestabilidad que se da en miembros estructurales esbeltos con secciones no fuseladas y en algunos casos, en cables cubiertos por hielo; se caracteriza por generar vibraciones perpendiculares a la dirección del viento y por presentar unas frecuencias mucho más bajas que en el caso de desprendimiento de vórtices. La estructura presenta grandes amplitudes de vibración en la dirección normal al flujo, producidas cuando la suma del amortiguamiento aerodinámico y mecánico de la estructura se vuelve negativo.

4.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO DE VIENTO

El viento es el movimiento del aire respecto a la superficie de la tierra. Como campo, se puede expresar en forma vectorial a partir de tres componentes: longitudinal (U), transversal (V) y vertical (W). Dichas componentes, en una localización determinada, vienen dadas en función del tiempo a partir de un valor medio U y de una variación de media cero debida a la turbulencia:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (4.1)$$

$$V(t) = v(t) \quad (4.2)$$

$$W(t) = w(t) \quad (4.3)$$

4.1.2.1. Velocidad media: componente constante de la velocidad

Cuando el viento avanza cerca de la superficie de la tierra ésta ejerce una fuerza de arrastre sobre el mismo, reduciendo su velocidad en las inmediaciones de la superficie (ver **Figura 4.1**). El efecto que esta fuerza tiene en el flujo decrece a medida que aumenta la altura sobre la superficie, haciéndose despreciable cuando se alcanza la capa límite atmosférica.

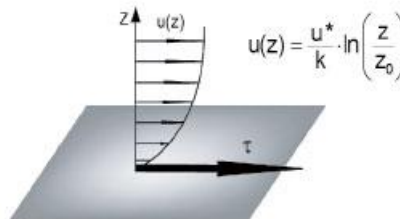


Figura 4.1. Perfil de velocidades en las proximidades de la tierra. Fuente: (Simiu and Scanlan, 1996).

Dentro de la capa límite, la velocidad del viento crece con la altura. Generalmente, la velocidad media a una altura z se puede expresar a través de la conocida “ley logarítmica”:

$$U(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.4)$$

Dónde:

- k es la constante de Von Karman, con un valor experimental de 0,4.
- z_0 es el valor de la longitud de rugosidad de la superficie.
- u^* es la velocidad de corte o velocidad de fricción.

En el presente trabajo, centrado en la obtención de velocidades de viento para España y cuyo análisis se basa en una pasarela peatonal, se ha usado la metodología de cálculo de la velocidad media expuesta en la *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera* (en adelante IAP-11), de (Fomento, 2011). En dicha publicación la velocidad media del viento v_m a una altura z se estima de acuerdo a la siguiente expresión:

$$v_m(z) = c_r \cdot c_0 \cdot v_b \quad (4.5)$$

Dónde:

- c_r es un factor de rugosidad obtenido en función del tipo de entorno donde se desarrolla el campo de viento, dependiendo de la altura del punto considerado, el factor del terreno, la longitud de la rugosidad y la altura mínima (parámetros definidos en la IAP-11).
- c_0 es un factor de topografía, que tiene en cuenta el grado de encauzamiento del flujo del viento por efecto de los obstáculos de la zona de actuación. Su valor se debe determinar, en casos complejos, mediante estudios específicos.
- v_b es la velocidad básica del viento, en m/s, para un determinado período de retorno en una determinada ubicación. En su definición también aparecen factores relativos a la dirección del viento y la estación del año considerada, que deben ser determinados por estudios específicos.

Para más información sobre la definición de la velocidad media del viento, se remite a la IAP-11 (Fomento, 2011).

4.1.2.2. *Turbulencia: componente variable de la velocidad*

La velocidad del viento varía aleatoriamente con el tiempo debido al efecto de la turbulencia del flujo de viento. Este efecto, que provoca una variación con respecto a la velocidad media del flujo, puede tener efectos negativos en estructuras esbeltas, como pueden ser puentes suspendidos en cables. En este punto resulta de interés la definición de parámetros que caracterizan el flujo turbulento del viento.

Se define la **intensidad de turbulencia**, íntimamente relacionada con la longitud de la rugosidad, como el ratio entre la desviación típica de la fluctuación de una componente del flujo de viento (σ_i) y el valor medio de la velocidad del viento (U) a una altura z :

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\bar{U}(z)} \quad (4.6)$$

A tal efecto, se definen tres intensidades de turbulencia, según la componente de velocidad considerada: longitudinal (I_u), lateral (I_v) y vertical (I_w).

La velocidad media del viento a una altura z puede ser obtenida a partir de las expresiones mostradas en el apartado 4.1.2.1. Sin embargo, la desviación típica no tiene una expresión analítica definida, por lo que generalmente se recurren a expresiones empíricas; cerca de la superficie, de acuerdo a las mediciones realizadas tradicionalmente en el campo objeto de estudio, la desviación estándar de cada componente puede ser aproximada según las siguientes expresiones en función de la velocidad de corte u^* (González-Longatt et al., 2007):

$$\sigma_u = 2,50 \cdot u^* \quad (4.7)$$

$$\sigma_v = 2,20 \cdot u^* \quad (4.8)$$

$$\sigma_w = 1,35 \cdot u^* \quad (4.9)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.7), (4.8) y (4.9) en la ecuación (4.6), de forma independiente, y usando la expresión (4.4) para el valor medio de la velocidad del viento, se obtienen las siguientes expresiones para la intensidad de turbulencia de cada componente de la velocidad:

$$I_u = \frac{1}{\ln(z/z_0)} \quad (4.10)$$

$$I_v = \frac{0,88}{\ln(z/z_0)} \quad (4.11)$$

$$I_w = \frac{0,55}{\ln(z/z_0)} \quad (4.12)$$

De esta forma la intensidad de la turbulencia en un punto a una altura z , independientemente de la componente considerada, depende únicamente de longitud de rugosidad de la superficie del terreno.

Si se quiere conocer el valor de la desviación típica de una componente, es suficiente con despejarla de la ecuación (4.6) tras conocer los valores de intensidad de turbulencia de cada componente y el valor medio de la velocidad del viento.

Por otro lado, aparece el concepto de **escala de longitud**, jL_i , el cual representa el tamaño medio de los remolinos turbulentos del flujo de viento. Existen nueve escalas de longitud, las cuales se corresponden con las tres dimensiones de los remolinos ($j = x, y, z$), asociadas con las tres componentes del flujo turbulento (i): longitudinal ($i = u$), lateral ($i = v$) y vertical ($i = w$).

De acuerdo a (González-Longatt et al., 2007), a grandes alturas sobre la superficie la turbulencia no se ve afectada por la superficie, transformándose en isotrópica; por otro lado, la proximidad de la tierra restringe el tamaño de los torbellinos turbulentos, reduciendo las escalas de longitud, por lo que éstas deben ser corregidas en función de la altura. En el espectro que caracteriza la componente turbulenta del viento que se utiliza en el presente trabajo (ver apartado 4.1.3) únicamente intervienen las escalas de longitud que determinan el tamaño de los remolinos en la dirección longitudinal del viento (x), referida a cada una de las componentes del mismo (u, v, w); a tal efecto, las expresiones que permiten obtener su valor son las siguientes:

$$^xL_u = 280 \cdot \left(\frac{z}{z_{iso}} \right)^{0,35} \quad (4.13)$$

$$^xL_v = 140 \cdot \left(\frac{z}{z_{iso}} \right)^{0,48} \quad (4.14)$$

$$^xL_w = 0,35 \cdot z \quad \text{para } z < 400 \text{ m} \quad (4.15)$$

Dónde z_{iso} es la altura sobre la superficie para la cual la turbulencia se hace isotrópica, pudiendo calcularse a partir de la siguiente expresión en función de la longitud de rugosidad de la superficie z_0 :

$$z_{iso} = 1000 \cdot z_0^{0,18} \quad (4.16)$$

El trabajo de simulación estocástica de historias de velocidad de viento desarrollado en el presente TFM está orientado a la definición de la variación de la velocidad del flujo debida a su turbulencia, siendo la aplicación elegida la de una pasarela peatonal suspendida en cables, la cual es susceptible de sufrir efectos vibratorios como consecuencia de la acción del viento turbulento.

4.1.3 ESPECTRO DE TURBULENCIA

El espectro de turbulencia describe la distribución de probabilidad en función de la frecuencia de la componente turbulenta de la velocidad del viento. El espectro se define de forma que la contribución de la varianza σ^2 (cuadrado de la desviación típica σ), en el rango de frecuencias de f a $f+df$, venga dada por $S_i \cdot df$ (siendo S_i la densidad espectral para la componente i de la turbulencia del viento); así, integrando para todas las frecuencias, se tiene que:

$$\sigma_i^2 = \int_0^\infty S_i(f) \cdot df \quad (4.17)$$

En base a la relación anterior se han obtenido numerosas expresiones analíticas que permiten definir el espectro de turbulencia. Generalmente, se utilizan relaciones que tenga en cuenta que el espectro decae para altas frecuencias según lo hace el valor de la turbulencia de los remolinos, como consecuencia de la energía disipada en forma de calor (González-Longatt et al., 2007). La mayoría de expresiones más extendidas están orientadas a la definición de la componente longitudinal de la turbulencia del viento.

Siguiendo con lo anterior, uno de los espectros de turbulencia más usados tradicionalmente ha sido el **espectro de Von Karman**, cuya expresión adimensional es la siguiente (González-Longatt et al., 2007) para la componente longitudinal:

$$\tilde{S}_{V.K.} = \frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \cdot \tilde{f}_u}{\left(1 + 70,8 \cdot \tilde{f}_u^2\right)^{5/6}} \quad (4.18)$$

Dónde $\tilde{f}_u$ es un factor adimensional que depende de la frecuencia f , la escala de longitud $^x L_u$, y la velocidad media del viento U , y que puede ser definido como una “frecuencia adimensional”.

Otra de las expresiones más utilizadas, en concreto por el código americano, es la que define el **espectro de Kaimal**; la forma adimensional es la siguiente (González-Longatt et al., 2007) para la componente longitudinal:

$$\tilde{S}_{Kaimal} = \frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{6,868 \cdot \tilde{x}}{\left(1 + 10,302 \cdot \tilde{x}\right)^{5/3}} \quad (4.19)$$

Dónde $\tilde{x}$ es un valor adimensional con idéntico significado al parámetro $\tilde{f}_u$ del espectro de Von Karman.

Por otro lado, en el Eurocódigo 1 (Asoc. Española de Normalización y Certificación, 1998), se define un espectro similar al de Kaimal; la expresión adimensional del **espectro del Eurocódigo** es la siguiente para la componente longitudinal:

$$\tilde{S}_{E.C.} = \frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{6,8 \cdot N_x}{(1 + 10,2 \cdot N_x)^{5/3}} \quad (4.20)$$

Dónde N_x tiene el mismo significado que $\tilde{x}$ en el espectro de Kaimal y que $\tilde{f}_u$ en el espectro de Von Karman.

Si se representan los espectros adimensionales definidos anteriormente en una misma gráfica como se ha hecho en la **Figura 4.2**, se puede observar lo siguiente:

- Los espectros de Kaimal y del Eurocódigo son prácticamente similares, si bien sí existe una diferencia apreciable entre ambos y el de Von Karman.
- Para valores bajos de frecuencia el espectro de Von Karman aporta valores mayores que los espectros de Kaimal y del Eurocódigo; en concreto, el valor máximo del espectro de Von Karman es un 25% mayor, aproximadamente.
- Para valores altos de frecuencias los espectros de Kaimal y del Eurocódigo dan valores más elevados que el espectro de Von Karman.
- Además, como ya se mencionó, el valor del espectro decae a medida que aumenta la frecuencia.

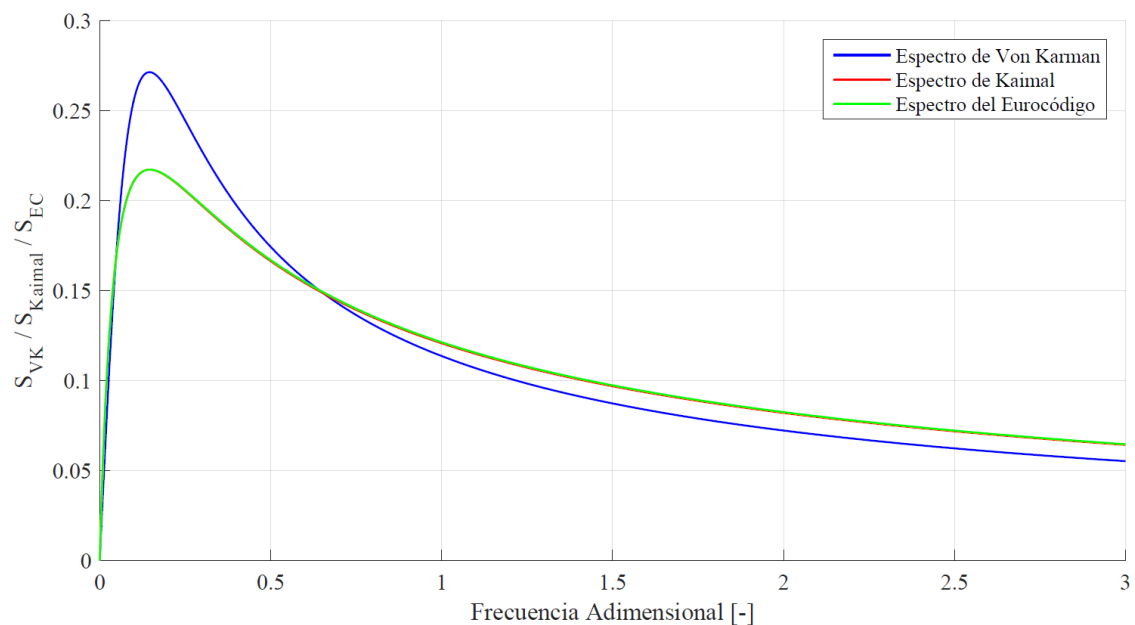


Figura 4.2. Comparación de espectros adimensionales de turbulencia, en términos adimensionales, para la componente longitudinal de la turbulencia. Fuente: Elaboración propia.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los espectros expuestos están definidos para la componente longitudinal de la turbulencia del viento. Para poder simular las dos componentes restantes (lateral y vertical), se utilizará la expresión corregida de Von Karman; dicha expresión, para un único punto, es la siguiente (Aas-Jakobsen and Strommen, n.d.):

$$\tilde{S} = \frac{f \cdot S_i(f)}{\sigma_i^2} = \frac{4 \cdot \tilde{f}_i \cdot \left(1 + 755.2 \cdot \tilde{f}_i^2\right)}{\left(1 + 283.2 \cdot \tilde{f}_i^2\right)^{11/6}} \quad (4.21)$$

Dónde:

- i es la componente de la turbulencia considerada, lateral v o vertical w .
- $\tilde{f}_i$ es un parámetro adimensional que, para cada dirección i , viene determinado por:

$$\tilde{f}_i = \frac{f \cdot {}^x L_i}{U} \quad (4.22)$$

Siendo f la frecuencia, ${}^x L_i$ es la escala de longitud en la dirección i y U es la velocidad media del viento en el punto considerado.

La representación gráfica del espectro generalizado para las componentes lateral y vertical definido en la expresión (4.21), en comparación con el espectro de Von Karman para la dirección longitudinal definido según la ecuación (4.18), se muestra en la **Figura 4.3**. Se puede comprobar que la diferencia es mínima entre ambos, si bien el espectro generalizado aporta valores sensiblemente mayores que el longitudinal para frecuencias bajas, y viceversa.

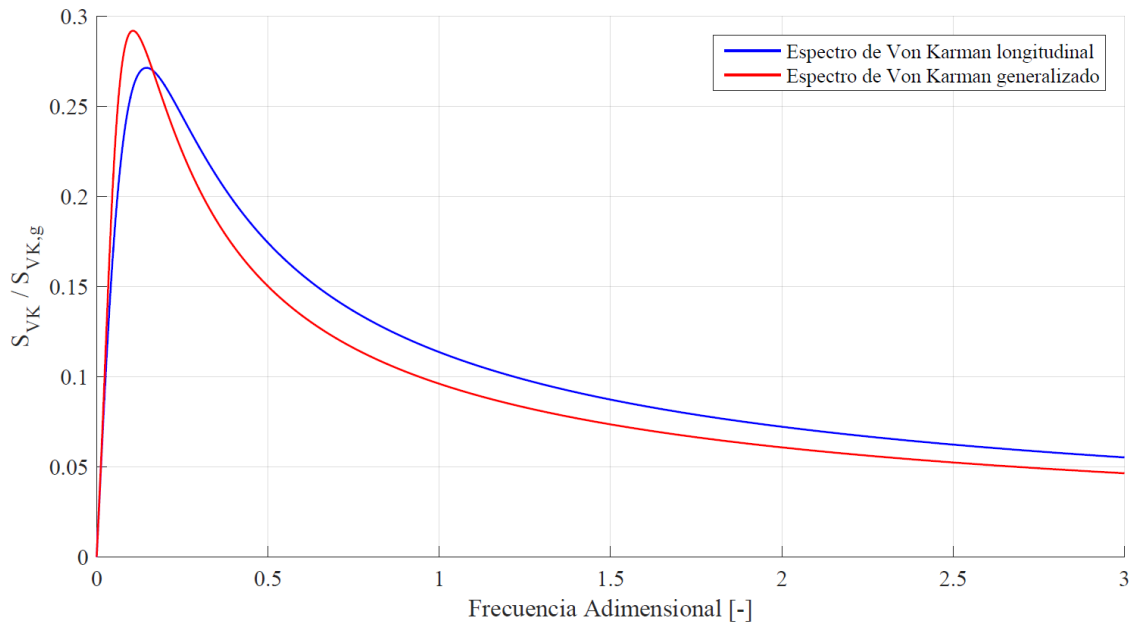


Figura 4.3. Comparación entre el espectro longitudinal de Von Karman y el espectro generalizado de Von Karman (lateral y longitudinal), en términos adimensionales. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a uno de los espectros de turbulencia definidos, se puede obtener la densidad espectral de un único punto para cada una de las frecuencias del rango considerado. Sin embargo, el viento es un fenómeno en el que existe correlación entre la densidad espectral de los distintos puntos, por lo que es necesario definir un modelo de cálculo que tenga en cuenta este aspecto si se trabaja en dominios multidimensionales. La descripción del método empleado a tal efecto se detalla en el próximo apartado.

4.2 MODELO DE GENERACIÓN DE HISTORIAS DE VIENTO

Como se viene avanzando en capítulos anteriores, se va a utilizar una metodología para generar historias de viento turbulento basada en espectros de referencia. A pesar de que el tiempo computacional es más elevado en técnicas de este tipo que en técnicas que usan filtros digitales (por ejemplo, ARMA), éstas últimas requieren un complejo proceso para establecer el orden del método en cada caso, lo que puede dificultar notablemente los cálculos; es por ello, fundamentalmente, que se ha optado por la utilización del modelo basado en espectros de referencia.

El método considerado parte de las siguientes hipótesis sobre el campo de viento, el cual es considerado como:

- **Unidireccional:** equivale a considerar que la dirección principal del flujo es constante, tanto en el tiempo como en el espacio.
- **Estacionario:** supone que la distribución de probabilidad del viento en función de la frecuencia no varía en el período considerado en la simulación, es decir, el espectro de turbulencia usado como referencia es constante en el tiempo.
- **Homogéneo:** da lugar a que las propiedades estadísticas de la señal son iguales en toda la región considerada, es decir, el espectro de turbulencia no varía según la localización.
- **Gaussiano:** supone la consideración de que la distribución que sigue el fenómeno es de tipo normal.

Estas hipótesis son asunciones muy importantes en un fenómeno como el viento; no obstante, sin considerar procesos como huracanes o tornados, donde estas hipótesis serían inasumibles, con las consideraciones expuestas se consigue simular series de viento turbulento que se ajustan a la realidad. Este buen ajuste se consigue para registros de tiempo que no sean demasiado elevados, y en casos en los que la topografía local o la existencia de obstáculos no den lugar a un incremento de la turbulencia (y la consecuente pérdida de la distribución normal asumida); en el último caso, por ejemplo, sería necesaria la simulación mediante métodos de mecánica de fluidos, o ensayos en túneles de viento.

El modelo de generación empleado en el presente TFM tiene la siguiente expresión (Shinozouka, 1972) para un determinado punto p del dominio, y para la componente longitudinal del viento, u_p :

$$u_p(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^N |G_{pi}(f_j)| \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta f} \cdot \cos(\omega_j \cdot t + \phi_{ij}) \quad (4.23)$$

Dónde:

- p es el punto en el que se obtiene la velocidad.
- t es el instante de tiempo considerado, en segundos.
- N es el número máximo de frecuencias en las que se discretiza el rango de frecuencias.
- i es un índice que recorre el número de puntos del dominio.
- j es un índice que recorre el número de frecuencias del rango establecido.
- f_j es la frecuencia considerada, en Hz.
- ω_j es la frecuencia angular, en rad/s, asociada a la frecuencia f_j .
- Δf es el incremento de frecuencia en el que se discretiza el rango, en Hz, normalmente un valor constante al ser la discretización de forma que haya equidistancia entre las frecuencias consideradas.
- ϕ_{ij} es un ángulo de fase aleatorio que sigue una distribución uniforme entre 0 y 2π ; equivale a establecer la fase de la componente de frecuencia introducida en el sumatorio.
- $G_{pi}(f_j)$ es el valor de la matriz triangular inferior, obtenida a partir de la matriz de correlación cruzada de los puntos del dominio, asociada a los puntos p e i y la frecuencia f_j . Su significado se aborda más ampliamente en el apartado 4.2.2.

Para las componentes lateral, v_p , y vertical, w_p , del mismo punto p , la expresión utilizada es idéntica a la ecuación (4.23), pero cambiando el valor del parámetro $G_{pi}(f_j)$ según la componente requerida.

En los siguientes apartados se hace hincapié en algunos de los aspectos y parámetros fundamentales que intervienen en la ecuación (4.23).

4.2.1 ESPECTRO DE DENSIDAD CRUZADA

Anteriormente, en el apartado 4.1.3, se han expuesto los espectros de Von Karman para la componente longitudinal del viento, por un lado, y para las componentes lateral y vertical, por otro lado; ambas expresiones son las siguientes:

$$\tilde{S}_{V.K.} = \frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \cdot \tilde{f}_u}{\left(1 + 70,8 \cdot \tilde{f}_u^2\right)^{5/6}} \quad (4.24)$$

$$\tilde{S} = \frac{f \cdot S_i(f)}{\sigma_i^2} = \frac{4 \cdot \tilde{f}_i \cdot \left(1 + 755,2 \cdot \tilde{f}_i^2\right)}{\left(1 + 283,2 \cdot \tilde{f}_i^2\right)^{11/6}} \quad (4.25)$$

Dónde:

- i es la componente de la turbulencia considerada (u, v, w).
- σ_i es la desviación típica de la componente i de la turbulencia del viento.
- $\tilde{f}_i$ es una parámetro adimensional que, para cada dirección i , viene determinado por:

$$\tilde{f}_i = \frac{f \cdot {}^x L_i}{U} \quad (4.26)$$

Siendo f la frecuencia, ${}^x L_i$ es la escala de longitud en la dirección i y U es la velocidad media del viento en el punto considerado.

El espectro de Von Karman está definido para un único punto individual dentro del dominio. Sin embargo, el viento es un fenómeno en el cual existe una determinada correlación entre los diferentes puntos del dominio sobre el que actúa el campo de velocidades del viento. Para tener en cuenta este hecho, se recurre a la definición de un **espectro de densidad cruzada**, el cual tiene la siguiente expresión:

$$S_{pq}(f) = \sqrt{S_p(f) \cdot S_q(f)} \cdot coh_{pq}(f) \quad (4.27)$$

Dónde:

- p, q , son dos puntos cualesquiera del dominio de cálculo.
- f es la frecuencia considerada dentro del rango de frecuencias establecidos.
- S_p, S_q , es el espectro de turbulencia asociado a los puntos p y q , respectivamente.
- coh_{pq} es la función de coherencia espacial entre los puntos p y q . Para su definición se ha usado la expresión impuesta por Davenport (Riera and Davenport, n.d.), la cual tiene la siguiente expresión:

$$coh_{pq}(f) = \exp \left[\frac{-2 \cdot f \cdot \sqrt{C_x^2 \cdot (x_p - x_q)^2 + C_y^2 \cdot (y_p - y_q)^2 + C_z^2 \cdot (z_p - z_q)^2}}{\bar{U}(z_p) + \bar{U}(z_q)} \right] \quad (4.28)$$

Siendo:

- C_x, C_y, C_z , coeficientes adimensionales de decaimiento establecidos experimentalmente. Algunos autores, como (Asoc. Española de Normalización y Certificación, 1998) o (Castro et al., 2015), establecen un valor de estos coeficientes de 11,5.
- U es la velocidad media del viento en el punto considerado.
- x, y, z , son las coordenadas espaciales de los puntos considerados.

De esta forma, conocido el espectro individual de cada punto del dominio para una componente de la velocidad del viento, y obtenida la función de coherencia para el par de puntos p y q , se puede obtener el espectro de densidad cruzada S_{pq} entre dichos puntos. Como se ha mencionado, este proceso se realiza para cada componente de la velocidad del viento, por lo que se obtendrían, de forma independiente, tres espectros de densidad cruzada: longitudinal, lateral y vertical, según el análisis que se pretenda realizar.

Obtenido S_{pq} para una determinada componente de la velocidad del viento, la matriz de densidad espectral cruzada se obtiene dividiendo el dominio de cálculo en un total de P puntos; de esta forma, se obtiene una matriz $P \times P$ para cada frecuencia dentro del rango establecido y para cada componente de la velocidad, siendo la expresión resultante generalizada la siguiente:

$$\mathbf{S}(f_j) = \begin{bmatrix} S_{11}(f_j) & S_{12}(f_j) & \cdots & S_{1P}(f_j) \\ S_{21}(f_j) & S_{22}(f_j) & \cdots & S_{2P}(f_j) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{P1}(f_j) & S_{P2}(f_j) & \cdots & S_{PP}(f_j) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

4.2.2 DESCOMPOSICIÓN DE CHOLSKY

La matriz de densidad espectral cruzada mostrada anteriormente en la expresión (4.29) cumple la siguiente propiedad:

$$S_{pq}(f) = S_{qp}^*(f) \quad (4.30)$$

Por lo tanto, la matriz de densidad espectral cruzada es una matriz Hermitiana, es decir, es una matriz cuadrada de elementos, en general, complejos, que tiene la característica de ser igual a su propia traspuesta conjugada. Además, la matriz cumple la condición de ser definida positiva, por lo que se puede realizar una descomposición de Cholesky sobre la misma, de forma que:

$$\mathbf{S}(f_j) = \mathbf{G}(f_j) \cdot \mathbf{G}^{*T}(f_j) \quad (4.31)$$

Es decir, la matriz de densidad espectral cruzada puede ser escrita como el producto de una matriz triangular inferior, $\mathbf{G}(f_j)$, y su conjugada traspuesta, $\mathbf{G}^{*T}(f_j)$. La matriz $\mathbf{G}(f_j)$, con dimensiones $P \times P$ (siendo P el número de puntos en los que se discretiza el dominio de cálculo), tendría la siguiente forma:

$$\mathbf{G}(f_j) = \begin{bmatrix} G_{11}(f_j) & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ G_{21}(f_j) & G_{22}(f_j) & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ G_{p1}(f_j) & G_{p2}(f_j) & \cdots & G_{pp}(f_j) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{P1}(f_j) & G_{P2}(f_j) & \cdots & G_{Pp}(f_j) & \cdots & G_{PP}(f_j) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

La matriz $\mathbf{G}(f_j)$ tomará valores diferentes según la componente de la turbulencia considerada, por lo que se obtendrán tres matrices $\mathbf{G}(f_j)$: longitudinal, lateral y vertical. De esta forma, los valores de la matriz $\mathbf{G}(f_j)$ que se muestran en la ecuación (4.32) serán los usados en la ecuación (4.23) para obtener la historia de velocidades de la componente turbulenta del viento para la dirección considerada.

4.3 GRADO DE AJUSTE DE LA SEÑAL GENERADA

Una vez obtenida la señal de velocidad del viento es interesante calcular una serie de parámetros para valorar el grado de ajuste de la señal con respecto a los parámetros de referencia usados en su definición. En el presente apartado se presentan dichos parámetros.

4.3.1 MEDIDA DE LA TURBULENCIA DE LA SEÑAL

La mejor forma de determinar el grado de turbulencia de una señal es el cálculo de la intensidad de turbulencia asociada a la misma. Una vez determinada la componente de velocidad de la turbulencia del viento deseada (longitudinal u , lateral v , vertical w), el primer paso es la obtención de la desviación típica σ de la señal; obtenida ésta, basta con dividir por la velocidad media del punto en cuestión para la obtención de la intensidad de turbulencia.

Así, de acuerdo a la siguiente expresión, se puede obtener la intensidad de turbulencia de la señal de la velocidad del viento en cada uno de los puntos del dominio de cálculo y para cada componente de la velocidad i :

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\bar{U}(z)} \quad (4.33)$$

Comparando el valor obtenido a partir de la señal con el valor de referencia calculado según se mostró en el apartado 4.1.2.2, se puede determinar el grado de ajuste de la turbulencia de la señal generada.

4.3.2 MEDIDA DE LA DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA DE LA SEÑAL

En la definición del modelo de generación de señales de viento artificiales una de las hipótesis consideradas consiste en que la distribución de probabilidad que sigue el fenómeno del viento es de tipo normal. Es, por ello, aconsejable comprobar que esta hipótesis se cumple para verificar la validez de la señal.

Una de las formas más sencillas de realizar esta comprobación es evaluando el índice o coeficiente de apuntalamiento, también denominado **índice de curtosis k** , que sigue la siguiente expresión:

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4} - 3 \quad (4.34)$$

Dónde μ es la media de x , σ es la desviación típica de x , y $E(t)$ representa la esperanza de t .

El índice de curtosis puede tener los siguientes valores:

- $k < 0$, lo que da lugar a una distribución platicúrtica, la cual presenta una menor altura que la distribución normal en el centro y menores colas en los extremos.
- $k = 0$, lo que arroja una distribución mesocúrtica, la cual presenta una forma acampanada que coincide con la distribución normal.
- $k > 0$, lo que proporciona una distribución leptocúrtica, la cual presenta un abultamiento en el centro, teniendo colas más grandes que la distribución normal.

Otra forma de evaluar el ajuste a una distribución normal es la evaluación de una **medida de simetría**. Una distribución normal es perfectamente simétrica, por lo que si se evalúa la asimetría s de un conjunto de valores, el valor de dicha distribución normal sería cero. La asimetría se puede calcular como:

$$s = \frac{E(x - \mu)^3}{\sigma^3} \quad (4.35)$$

Dónde μ es la media de x , σ es la desviación típica de x , y $E(t)$ representa la esperanza de t .

Se pueden dar las siguientes casuísticas:

- $s < 0$, lo que indica que los datos tienden hacia la izquierda de lo que definiría la distribución normal.
- $s = 0$, lo que indica una distribución normal.
- $s > 0$, lo que indica que los datos tienden hacia la derecha de lo que definiría la distribución normal.

De acuerdo a estas definiciones, cuanto más cercanos a cero sean los valores de los coeficientes de curtosis k y de asimetría s de la señal de viento generada, más cercana estará la misma a una distribución normal (hipótesis de partida).

4.3.3 AJUSTE DEL ESPECTRO DE UN PUNTO Y DE LA CORRELACIÓN ENTRE DOS PUNTOS

Obtenida la señal temporal que define la variación de la velocidad del viento a lo largo del período considerado, una buena forma de obtener el ajuste de la señal consiste en el cálculo del espectro asociado a la misma, y compararlo con el espectro de referencia utilizado como base.

Para ello se ha utilizado el método de Welch, el cual consiste en aplicar una ventana de datos a los diversos segmentos en los que se subdivide la serie original, permitiendo que dichos segmentos puedan solaparse. El objetivo perseguido al utilizar las ventanas de datos es la reducción del sesgo de las estimaciones, aunque ello conlleve un ligero descenso de la resolución frecuencial. El permitir el solapamiento de los segmentos tiene como fin aumentar el número de segmentos a promediar, para así conseguir una mayor reducción de la varianza de las estimaciones espectrales. Además, se utiliza una frecuencia de muestreo que, generalmente, será la inversa del paso de tiempo con el que se ha generado la señal. Las aplicaciones de estas mejoras, conjuntamente con la eficiencia computacional del algoritmo FFT, han permitido que el método de Welch se haya convertido en el procedimiento de estimación espectral más frecuentemente usado en la actualidad. Para más información sobre el método, se remite al lector a (Rodríguez, 1995).

De esta forma, utilizando el método de Welch, es posible obtener el espectro de turbulencia individual de cada punto, y para cada componente del viento, a partir de la señal generada. Dividiendo por la varianza de la velocidad obtenida de la señal y multiplicando por la frecuencia asociada, se puede obtener el espectro adimensional. Comparando el espectro de la señal con el espectro de referencia se puede observar el grado de ajuste de la generación. Como ejemplo, se remite a la **Figura 4.4**, donde se puede apreciar que el espectro asociado a la señal oscila en torno al espectro de referencia.

Además, una vez obtenido el espectro individual asociado a la señal de viento en cada punto, es posible definir la densidad espectral cruzada entre cada uno de los puntos del dominio de cálculo repitiendo el proceso expuesto en el apartado 4.2.1, definiendo la función de coherencia para las frecuencias obtenidas del método de Welch. Obtenidos dichos valores, la comparación

con la densidad espectral cruzada de referencia es inmediata; un ejemplo de comparación es el mostrado en la **Figura 4.4**, comprobándose tendencias similares entre ambos casos.

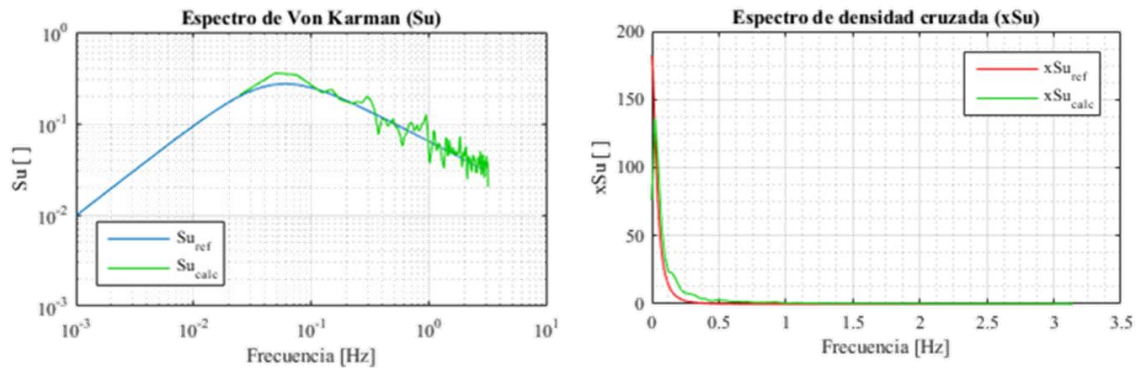


Figura 4.4. Comparación del espectro de la señal y el espectro de referencia (izquierda) y de la correlación cruzada de la señal y de referencia (derecha). Fuente: Elaboración propia.

4.4 DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO IMPLEMENTADO

Todo el procedimiento descrito en el apartado anterior ha sido implementado en el software de cálculo numérico MatLab (versión 2015b), con el objeto final de crear un programa que permita la obtención de señales de viento turbulento para su uso en análisis estructurales que así lo requieran.

En el presente apartado únicamente se muestra un esbozo que ayude al lector a la hora de entender el procedimiento de cálculo del algoritmo.

El código implementado comienza con la petición de una serie de datos de entrada necesarios para los distintos cálculos que realiza. A tal efecto, se piden los datos relativos a:

- La zona en la que se desarrolla el campo de viento y las características asociadas a la misma. Estos datos se corresponden con los definidos en la IAP-11 (Fomento, 2011).
- El período de retorno de cálculo.
- Las coordenadas de los puntos que definen el dominio de cálculo.
- El rango de frecuencias, así como su discretización, para la definición del espectro de turbulencia de referencia.
- Los coeficientes de caída que definen la coherencia entre los puntos del dominio.
- El paso de tiempo con el cual se obtendrá la señal de viento, así como la duración total de la misma.

Introducidos los datos de entrada, el algoritmo sigue los siguientes pasos:

- 1) Cálculo de los parámetros que definen el campo turbulento de viento, los cuales se realizan en la siguiente secuencia:
 - i. Cálculo de la velocidad media del viento en cada punto del dominio (previamente, se obtiene la velocidad básica en la zona donde se enmarca el dominio de cálculo).
 - ii. Cálculo de la intensidad de turbulencia de referencia en cada punto y en cada dirección.
 - iii. Cálculo de la escala de longitud integral de turbulencia en cada punto y en cada dirección.
 - iv. Cálculo de la desviación típica de referencia de la turbulencia del viento.
- 2) Cálculo del espectro de referencia de Von Karman para cada punto y para cada componente de la turbulencia. Paralelamente, se procede al cálculo de la función de coherencia espacial entre cada punto para todas las frecuencias del rango establecido.
- 3) Cálculo de la densidad espectral cruzada para todos los puntos del dominio en función del espectro individual de cada uno de ellos y la función de coherencia.
- 4) Cálculo de la descomposición de Cholesky de cada submatriz de densidad espectral cruzada (una submatriz queda asociada a una determinada frecuencia).
- 5) Cálculo de la historia de velocidad de cada punto para cada componente de la turbulencia.
- 6) Cálculo de los parámetros de la señal para ver el ajuste con los parámetros de referencia y con las hipótesis del método, distinguiéndose entre:
 - i. Intensidad de turbulencia de cada punto en cada dirección.
 - ii. Coeficiente de curtosis para cada punto y dirección.
 - iii. Coeficiente de asimetría para cada punto y dirección.
- 7) Cálculo del espectro de turbulencia asociado a la señal, y de la densidad espectral cruzada asociada, para su comparación con los valores de referencia.

Lo anterior se muestra de forma resumida en el diagrama de flujo de la **Figura 3.3**.

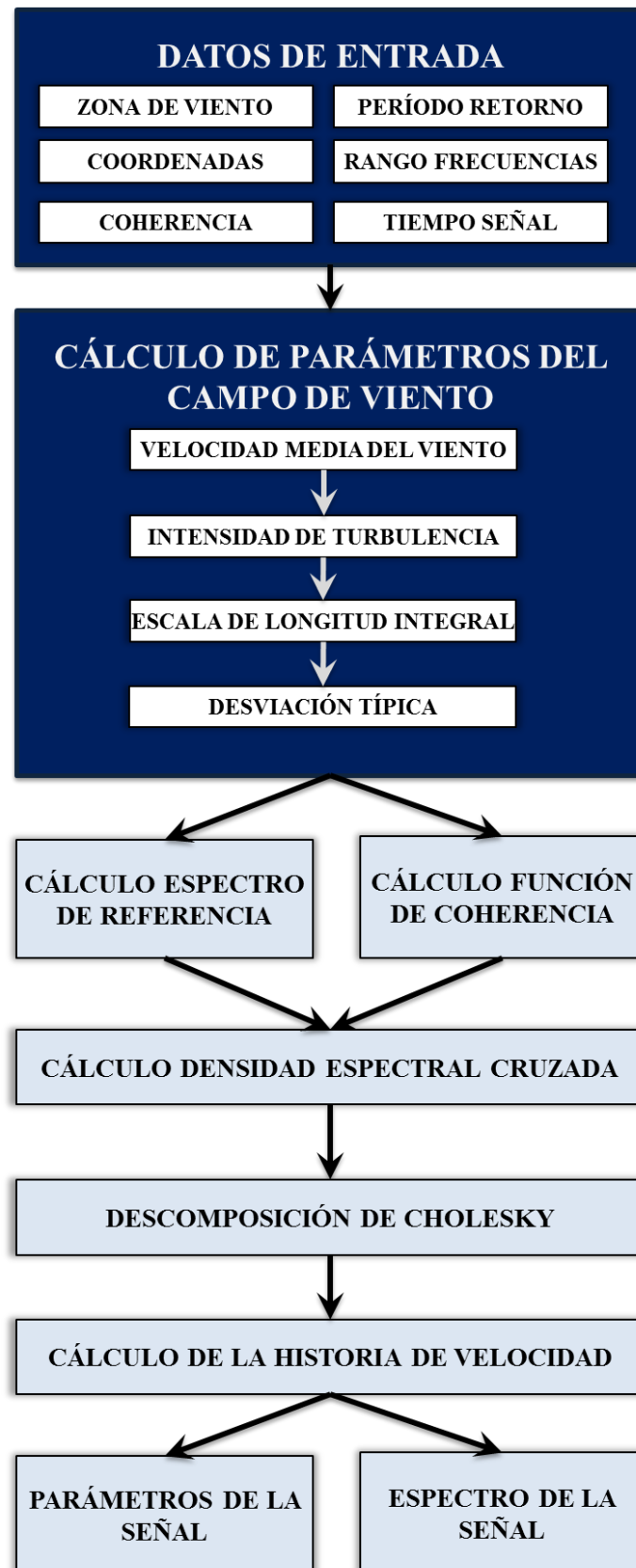


Figura 4.5. Diagrama de flujo del código implementado para la generación de señales de viento turbulento.
Fuente: Elaboración propia.

4.5 IMPLEMENTACIÓN EN UNA INTERFAZ: WINDMAKER©

La metodología de cálculo de historias de velocidades de viento, desarrollada en MatLab siguiendo las pautas recogidas en el apartado anterior, se ha implementado en una interfaz gráfica con el objetivo de disponer de un entorno más atractivo para la generación de señales artificiales de viento. Dicha interfaz ha sido denominada WindMaker© (ver **Figura 4.6**), siendo aportada en el CD adjunto al presente documento junto con un vídeo en el que se muestra un ejemplo de uso del programa; su manual de usuario se puede consultar en el *Anejo B – Manual de Usuario de WindMaker©*.



Figura 4.6. Inicio del programa WindMaker©. Fuente: Elaboración propia.

La estructura de WindMaker© se puede resumir de la siguiente forma:

- **Módulo 1. Definición del campo de viento:** menú para la definición de las características del viento en la región donde se emplaza el estudio a realizar, así como los puntos del dominio en los que se calculará la velocidad del viento.
- **Módulo 2. Definición del espectro de turbulencia:** menú en el que se establecen los controles para generar los espectros de turbulencia del viento. Actualmente el espectro incluido es el de Von Karman, particularizado según la componente del viento considerada.
- **Módulo 3. Cálculo:** menú en el que se procede al cálculo de la componente turbulenta de la velocidad del viento y a la comprobación del grado de ajuste de la señal obtenida respecto a los parámetros de referencia. En este módulo se incluyen gráficas que permiten observar cómo se ajusta el espectro de la señal calculada al espectro de referencia utilizado como base.
- **Módulo 4. Visualización de resultados:** menú para la visualización de los resultados obtenidos y la exportación de los valores requeridos para la realización de análisis dinámicos bajo la acción del viento en estructuras.

Finalmente, mencionar que el programa permite guardar los resultados obtenidos, además de cargar dichos resultados en sesiones posteriores. Por otro lado, existe una zona de exportación de los valores más significativos, los cuales pueden ser usados para la generación de informes y también para su implementación en programas de cálculo de estructuras.

Para más información al respecto, se remite al lector al manual de usuario del programa.

4.6 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL MÉTODO

Tras la implementación de la metodología descrita en apartados anteriores, se ha abordado un estudio de los principales parámetros que intervienen en la generación de historias de viento turbulento, del cual se ha podido concluir que son tres los parámetros a los que la señal generada es más sensible:

- Discretización del dominio de la frecuencia.
- Discretización del dominio del tiempo.
- Tiempo total de la señal.

A continuación se aportan resultados numéricos que permiten estudiar la influencia de dichos parámetros.

4.6.1 DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

La longitud de los segmentos en los que se discretiza el dominio de frecuencias que contendrá la señal afecta directamente a la forma de la historia de la velocidad obtenida. En primera instancia, la elección de un “paso de frecuencia”, Δf , adecuado para la definición del espectro es fundamental para atribuir a la señal todo el contenido de frecuencias deseado; así, a modo de justificación, se muestra en la **Figura 4.7** el espectro de turbulencia longitudinal obtenido para unas mismas características del viento pero para diferentes Δf , de cuyo análisis se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Para un Δf de 0,1 Hz no se aprecia el pico característico del espectro de Von Karman, por lo que claramente este incremento no es suficiente para definir el espectro de referencia de la turbulencia del viento.
- Con un Δf de 0,01 Hz ya se aprecia el pico en el espectro; además, la forma del mismo queda definida con bastante suavidad.
- El Δf de 0,001 Hz, a priori, no supone una mejora en la definición del espectro más allá de considerar valores de frecuencia más bajos.

Para el ejemplo mostrado parecería razonable la elección de un Δf igual a 0,01 Hz, ya que la diferencia respecto al espectro obtenido con un Δf de 0,001 Hz no es significativa; sin embargo, si se analiza la forma de la señal obtenida con ambos espectros (ver **Figura 4.8**), se obtienen conclusiones diferentes:

- Para un Δf de 0,01 Hz se observa periodicidad en la señal generada. En concreto, la señal se repite cada 100 s (inversa de la frecuencia).
- Con un Δf de 0,001 Hz no se observa periodicidad de la señal en el intervalo de tiempo considerado (300 s); sin embargo, esto no indica que la señal no sea periódica, si no que se repetirá cada más tiempo (en concreto cada 1000 s).

Ante el análisis realizado, queda claro que la señal generada va a ser periódica en el tiempo independientemente del Δf elegido, ya que la metodología implementada así lo propicia; sin embargo, esta periodicidad se puede regular con el Δf , lo que permite generar señales no periódicas en el tiempo de simulación del viento que sea necesario para la aplicación estructural que se requiera abordar.

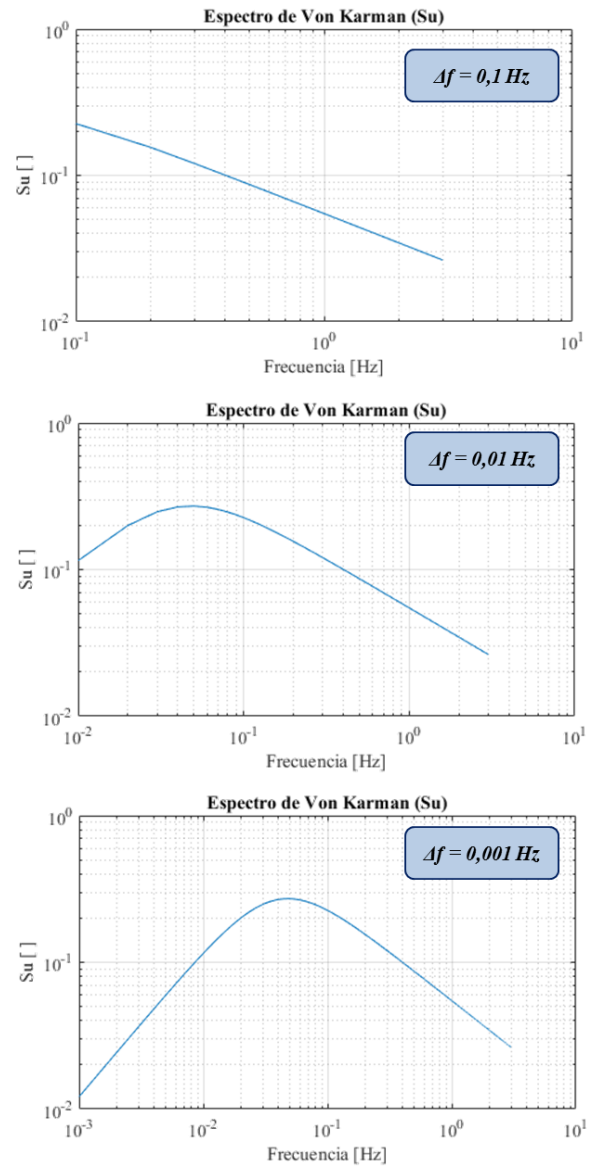


Figura 4.7. Comparación de espectros de referencia para diferentes Δf . Fuente: Elaboración propia.

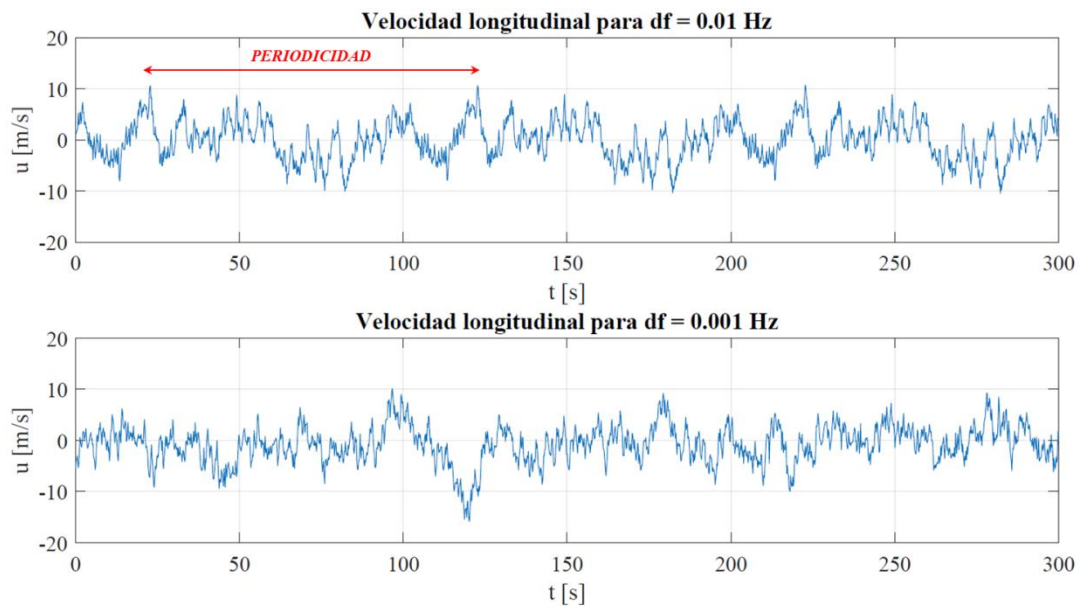


Figura 4.8. Comparación de series de velocidad para diferentes Δf . Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO DEL TIEMPO

El paso de tiempo, Δt , elegido afecta también a la calidad de la señal obtenida, y debe ser consecuente con el rango de frecuencias establecido para la generación de la misma, para lo cual se debe cumplir la siguiente restricción (Aas-Jakobsen and Strommen, n.d.):

$$\Delta t_{\min} = \frac{1}{2 \cdot f_{\max}} \quad (4.36)$$

Dónde $f_{\max}$ es la frecuencia máxima del rango de frecuencias establecido y $\Delta t_{\min}$ es el valor del paso de tiempo mínimo recomendado.

El incremento de tiempo elegido es importante para lograr una correcta definición de la señal artificial generada, que recoja todo el rango de frecuencias incluido en el espectro de referencia. Por ello, es recomendable utilizar valores inferiores al $\Delta t_{\min}$ obtenido según el rango de frecuencias establecido.

4.6.3 TIEMPO TOTAL DE LA SEÑAL

El tiempo total de simulación de la señal de viento turbulento es importante a la hora de reproducir con un grado de ajuste elevado la turbulencia de referencia con la que se está generando la señal estocástica. Así mismo, es importante para lograr cumplir con las hipótesis de la metodología de generación respecto a la distribución normal del fenómeno.

Para justificar numéricamente este hecho se ha simulado un campo de viento con las mismas características y el mismo rango de frecuencias en todos los casos, pero con diferentes tiempos de simulación total; del análisis de los resultados obtenidos se extraen las siguientes conclusiones:

- El error relativo respecto a la intensidad de turbulencia objetivo se reduce a medida que aumenta la duración de la señal (ver **Figura 4.9**). Este hecho se debe a que la mayoría de señales de viento medidas en campo, a partir de las cuales se han obtenido expresiones empíricas para la intensidad de turbulencia, tienen duraciones altas (mínimo 10 minutos).
- El coeficiente de curtosis sigue la misma tendencia que la intensidad de turbulencia: se reduce más a medida que se aumenta el tiempo de simulación. Para el ejemplo con el que se han obtenido los datos del estudio (ver **Figura 4.10**), a partir de 100 s de tiempo de simulación se comienzan a obtener valores del coeficiente de curtosis que indican una distribución normal.
- Los valores obtenidos para el coeficiente de asimetría (ver **Figura 4.11**) no presentan una tendencia clara con respecto al tiempo de simulación elegido. No obstante, se dan valores cercanos a cero, lo que indica que la distribución de la señal generada se aproxima a una distribución normal.

Las conclusiones obtenidas del análisis de estos parámetros deben ser vistas desde un punto de vista tendencial. Esto es así porque la metodología implementada sigue un proceso de generación aleatorio, por lo que en algunos casos se producirán desviaciones en los parámetros respecto a las tendencias marcadas; este hecho se puede contrastar a partir de los valores de intensidad de turbulencia estudiados, donde para un valor 100 s de tiempo de simulación el error absoluto obtenido (2,02%) es menor que el calculado para un tiempo de 300 s (2,32%).

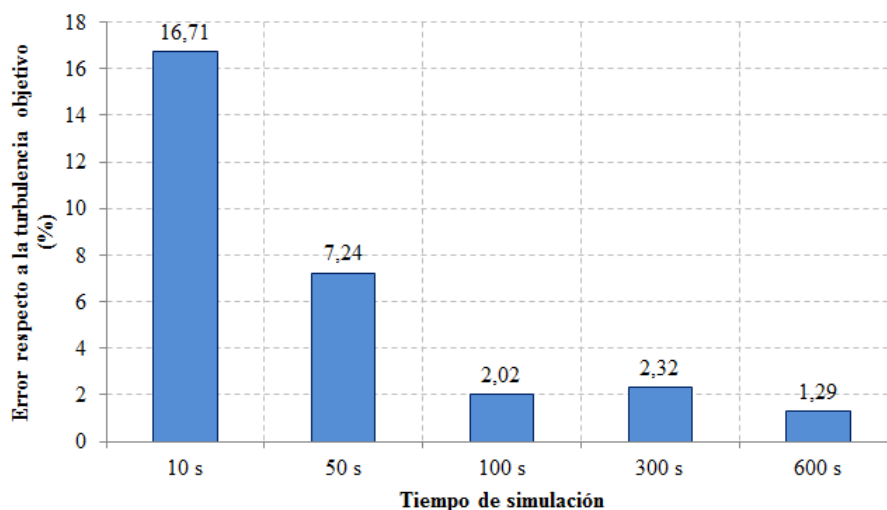


Figura 4.9. Error respecto a la turbulencia objetivo de señales con diferentes tiempos de simulación totales.
Fuente: Elaboración propia.

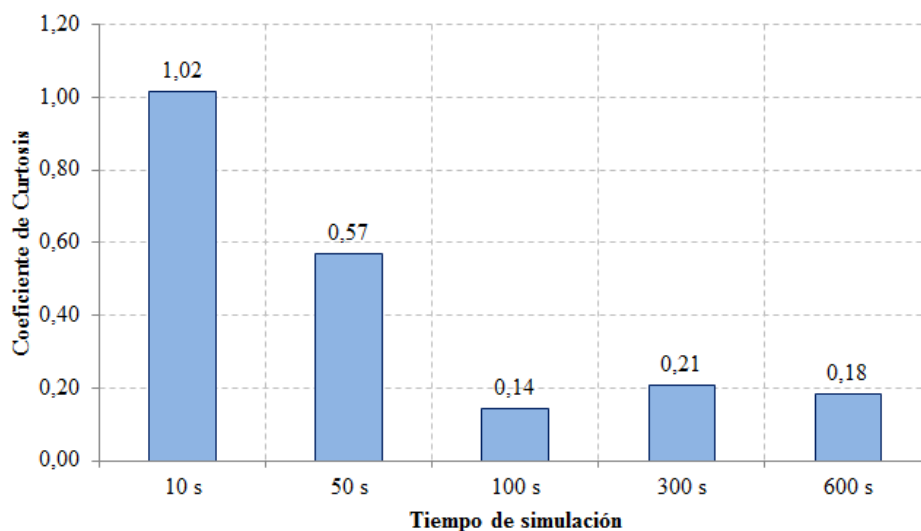


Figura 4.10. Coeficiente de curtosis de la velocidad longitudinal para diferentes tiempos de simulación totales.
Fuente: Elaboración propia.

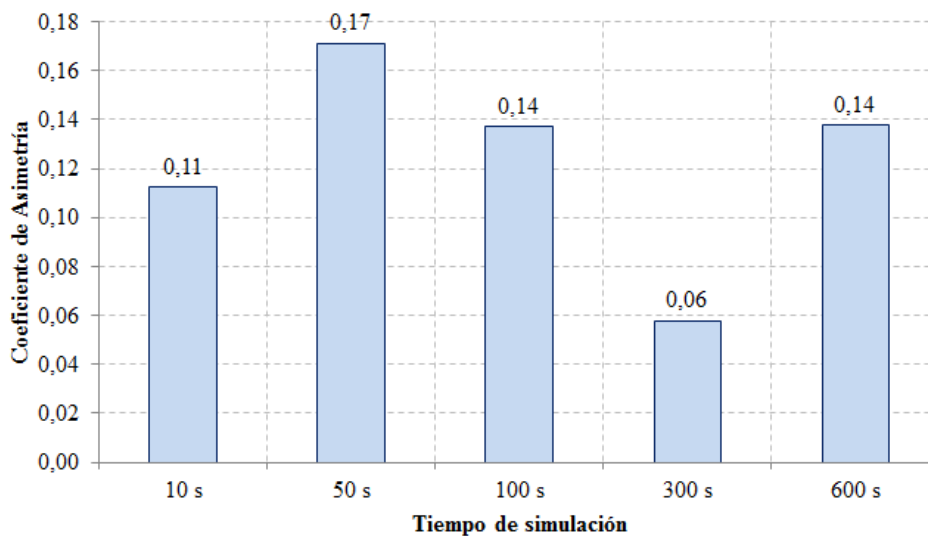


Figura 4.11. Coeficiente de asimetría de la velocidad longitudinal para diferentes tiempos de simulación totales.
Fuente: Elaboración propia.

4.7 EJEMPLOS NUMÉRICOS

En el presente apartado se muestran varios ejemplos de generación de series de velocidad de viento turbulento, con el objetivo de mostrar la utilidad de la metodología implementada y las posibilidades de la interfaz gráfica de usuario WindMaker©. Se muestra un ejemplo unidimensional y otro bidimensional.

4.7.1 EJEMPLO 1: VELOCIDADES DE VIENTO EN UN CASO 1D

El caso de aplicación unidimensional más claro cuando se trata de cargas de viento es una estructura tipo torre, es decir, una estructura cuya dimensión en altura es mucho mayor a sus dimensiones en planta.

Como ejemplo de aplicación, se ha considerado la “Torre Sevilla”, comúnmente conocida como “Torre Pelli” (ver **Figura 4.12**). Una estructura de este tipo se puede simplificar por una barra empotrada en su base cuando se trata de obtener el perfil de velocidades de viento con la altura en la misma, por lo que el esquema del dominio de cálculo de la velocidad del viento consistiría en una serie de puntos que coinciden en planta, y que varían en su altura sobre la superficie; por lo tanto, la función de coherencia tendrá valores debidos únicamente a la diferencia de alturas de los diferentes puntos de la estructura.



Figura 4.12. Esquema para la obtención de velocidades de viento en la “Torre Pelli”. Fuente: Elaboración propia.

La estructura objeto del presente ejemplo tiene una altura aproximada de 180 m; para obtener la velocidad del viento se han considerado 12 puntos, cuya altura se ha marcado en la **Figura 4.12**. La componente de la turbulencia calculada será únicamente, en este caso, la longitudinal.

De acuerdo a la IAP-11 (aunque no sea de aplicación para este tipo de estructura, por simplificación se ha utilizado la metodología que propone para el cálculo de la velocidad media del viento), la velocidad básica fundamental del viento en Sevilla es de 26 m/s. Los factores direccionales, estacionales y de topografía se han tomado igual a 1 para este ejemplo, mientras que el período de retorno considerado ha sido de 50 años; con estos datos, y considerando un entorno Tipo III, la velocidad media del viento en los puntos considerados, así como otros parámetros de los que se han expuesto en el apartado 4.1.2, se muestran en la **Tabla 4.1**. Del análisis de dichos datos se puede concluir lo siguiente:

- La velocidad media del viento aumenta con la altura, tal y como se mostró en el apartado 4.1.2.1.
- La intensidad de la turbulencia se reduce a medida que aumenta la cota del punto considerado, lo que tiene sentido ya que al aumentar la distancia a la superficie de la tierra el efecto de la rugosidad de la misma se atenúa.
- La escala de longitud aumenta conforme lo hace la altura del punto del dominio, por la misma razón expuesta en el punto anterior.

Tabla 4.1. Características del campo de viento turbulento para el ejemplo de aplicación sobre la Torre Pelli.
Fuente: Elaboración propia.

z (m)	v_m (m/s)	I_u (%)	xL_u (m)
15	21,97	25,56	69,46
30	25,86	21,71	88,53
45	28,14	19,96	102,03
60	29,76	18,87	112,84
75	31,01	18,11	122,00
90	32,03	17,53	130,04
105	32,90	17,07	137,25
120	33,65	16,69	143,82
135	34,31	16,37	149,87
150	34,90	16,09	155,50
165	35,44	15,85	160,78
180	35,93	15,63	165,75

Para la definición del espectro de turbulencia se ha utilizado un Δf igual a 0,001 Hz y una frecuencia máxima de cálculo de 3 Hz; así, se ha obtenido el espectro de turbulencia para cada punto del dominio. Como ejemplo, se muestran en la **Figura 4.13** los espectros para los puntos de menor cota (15 m) y mayor cota (180 m) del dominio, pudiéndose comprobar que el pico del espectro se desplaza ligeramente hacia una frecuencia más baja a medida que aumenta la cota del punto, si bien el valor del pico apenas varía.

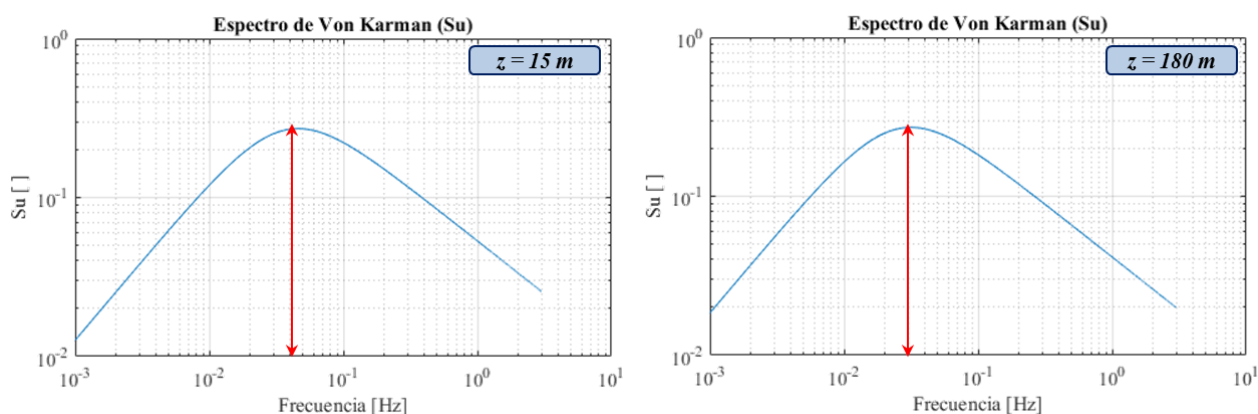


Figura 4.13. Espectro de turbulencia longitudinal en el punto más bajo (izquierda) y más alto (derecha) del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.

Como datos para la función de coherencia se han tomado los valores de $C_x = 8$, $C_y = 16$, $C_z = 10$ (Hong, 2009), si bien se trata de coeficientes experimentales que en casos de cálculo más exhaustivos deberían ser obtenidos a conciencia. A partir de los espectros individuales y la función de coherencia se han obtenido las matrices de densidad espectral cruzada para los puntos del dominio; a modo de ejemplo, se muestran en la **Figura 4.14** los resultados obtenidos para una frecuencia muy baja (0,01 Hz) y para una frecuencia elevada (2 Hz) en forma de representación matricial, comprobándose el efecto que tiene la función de coherencia:

- Para frecuencias bajas la correlación entre los puntos es elevada.
- Para frecuencias altas la correlación entre los puntos se hace despreciable.

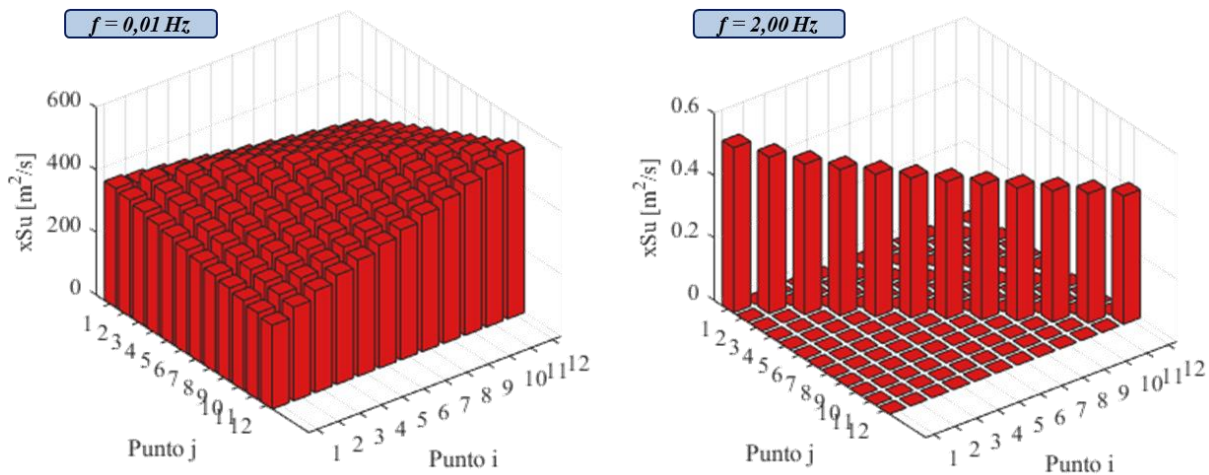


Figura 4.14. Matriz de densidad espectral cruzada para una frecuencia de 0,01 Hz (izquierda) y 2 Hz (derecha) en los puntos del dominio de cálculo del ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.

La señal de viento se ha calculado con un paso de tiempo de 0,01 s y una duración total de 300 s. Con ello, se han conseguido buenos ajustes de la turbulencia, de la curtosis y de la simetría de la señal; prueba de ello es el ajuste del espectro de la señal respecto al de referencia, el cual se muestra en la **Figura 4.15** para los puntos con menor y mayor cota del dominio de cálculo. Las señales de la componente turbulenta de la velocidad del viento para dichos puntos se muestran en la **Figura 4.16**, comprobándose que no se produce periodicidad de la señal dentro del período de tiempo considerado y, además, que los valores obtenidos a mayor altura son ligeramente superiores.

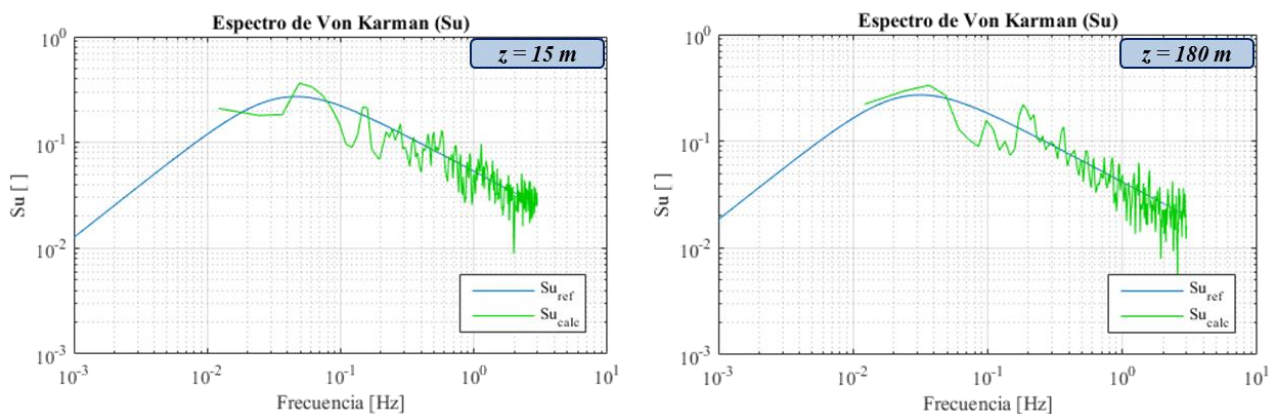


Figura 4.15. Ajuste del espectro de turbulencia longitudinal en el punto más bajo (izquierda) y más alto (derecha) del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.

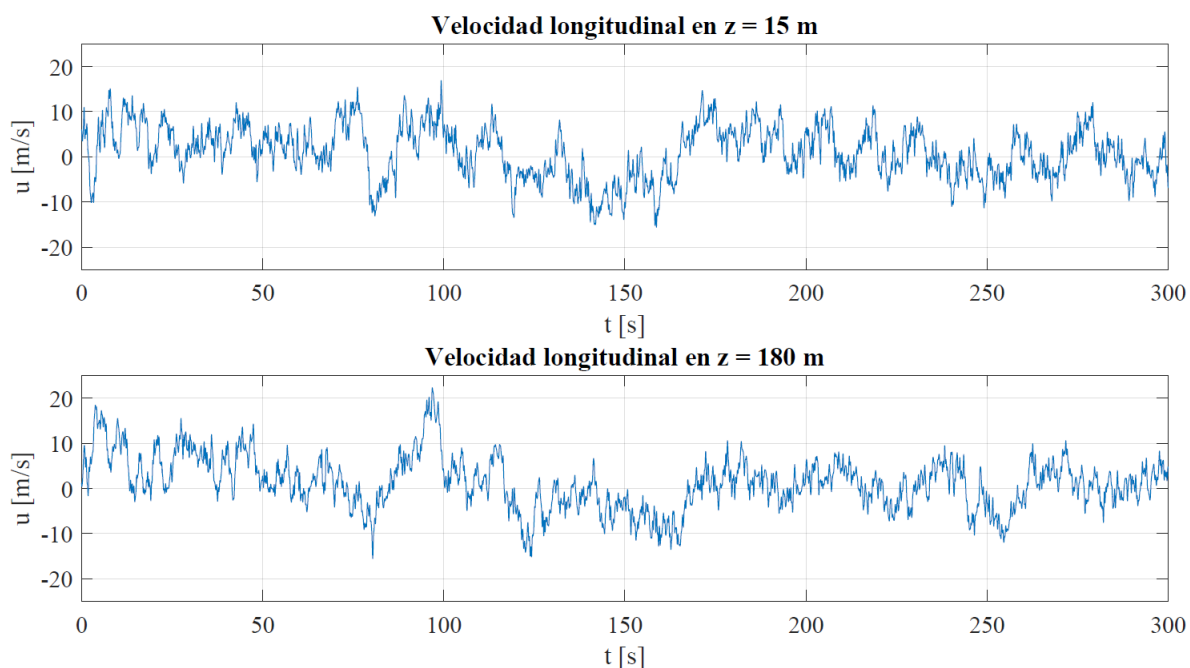


Figura 4.16. Componente de velocidad longitudinal turbulenta en el punto más bajo (arriba) y más alto (abajo) del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en una estructura de este tipo resulta interesante visualizar el perfil de velocidades respecto a la altura. Dicho perfil se ha representado, para distintos instantes de tiempo, en la **Figura 4.17**. Obviamente, a los perfiles obtenidos habría que sumarle la velocidad media del viento para obtener la velocidad total (ya que se está tratando únicamente con la componente longitudinal del viento).

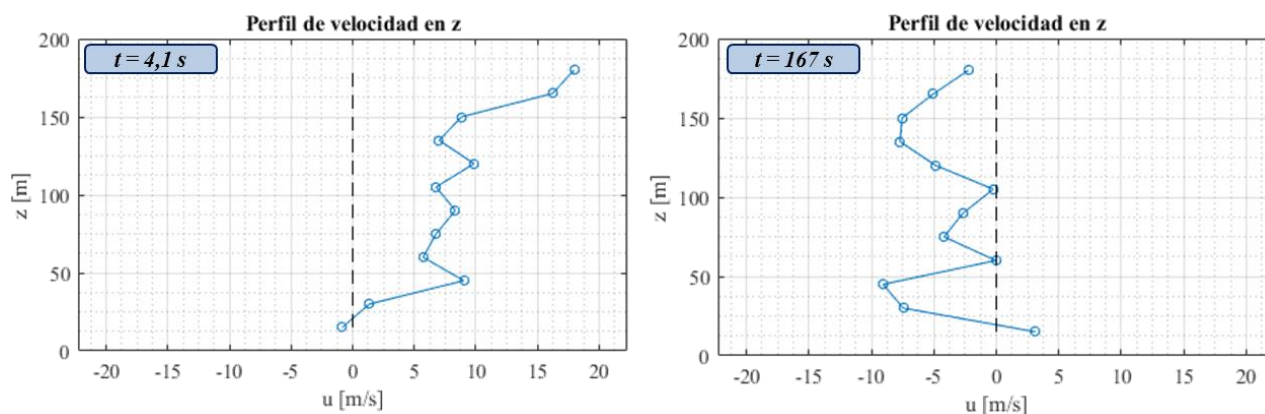


Figura 4.17. Perfiles de velocidad longitudinal turbulenta para $t = 4,1$ s (izquierda) y $t = 167$ s (derecha) en los puntos del dominio de cálculo considerado en el ejemplo sobre la Torre Pelli. Fuente: Elaboración propia.

Con el ejemplo descrito quedan demostrados los datos que maneja WindMaker©, así como los resultados que el programa permite visualizar, para un caso de aplicación unidimensional (en cuanto a las dimensiones características de la estructura analizada). En el apartado siguiente se aborda un caso donde la dimensión característica de la estructura no es única.

4.7.2 EJEMPLO 2: VELOCIDADES DE VIENTO EN UN CASO 2D

Como ejemplo de un caso bidimensional se va a analizar el caso de un puente de vigas cajón ficticio, sobre el que el viento incide de forma perpendicular en uno de sus laterales. El puente posee una altura sobre el terreno variable a lo largo de su longitud, con una pendiente longitudinal del 5%. La viga cajón se ha considerado con un canto constante de 5 m, siendo su forma rectangular. Un ejemplo de estructura de este tipo se muestra en la **Figura 4.18**, sobre la que el viento incidiría de forma perpendicular al eje longitudinal del puente para el caso de aplicación.

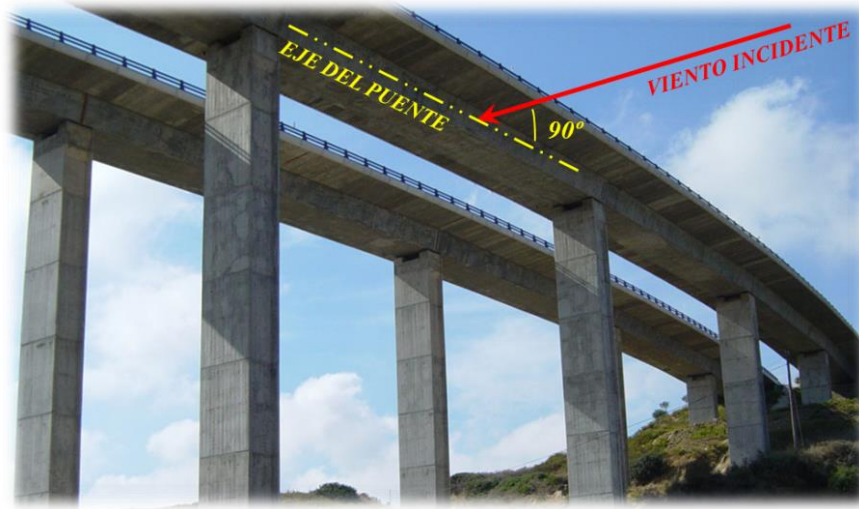


Figura 4.18. Esquema de tipología de puente considerado para ejemplo bidimensional (no se corresponde con las dimensiones introducidas en el ejemplo). Fuente: Elaboración propia a partir de Google Imágenes.

En un caso como éste la obtención de perfiles de velocidad de viento sobre el lateral del tablero se puede simplificar como una placa cuyos puntos poseen distintas coordenadas en lateral (y) y en altura (z), pero la misma coordenada longitudinal (x); así, la función de coherencia entre los distintos puntos se deberá a las diferencias entre la situación lateral y vertical de los puntos. Se han considerado 14 puntos: 7 en la parte superior del tablero y 7 en la parte inferior, en la misma coordenada y y con distinta altura z . En este caso, a diferencia del caso unidimensional donde sólo se ha calculado la componente longitudinal del viento, se calcularán las tres componentes: longitudinal, lateral y vertical, con objeto de visualizar las diferencias entre ellas.

Se ha considerado, de acuerdo a la IAP-11, que el puente se encuentra en la Zona A del mapa de velocidad básica fundamental del viento, lo que aporta un valor de este parámetro de 26 m/s. Los factores direccionales, estacionales y de topografía se han tomado igual a 1 para este ejemplo, mientras que el período de retorno considerado ha sido de 50 años; con estos datos, y considerando un entorno Tipo II, la velocidad media del viento en los puntos del dominio de cálculo, así como otros parámetros de los que se han expuesto en el apartado 4.1.2 que caracterizan la turbulencia del campo de viento, se muestran en la **Tabla 4.2**. Del análisis de dichos datos se puede concluir los mismos aspectos que se comentaron al respecto en el caso de ejemplo unidimensional, si bien las tendencias están menos marcadas al ser la cota de los puntos muy similar.

Tabla 4.2. Características del campo de viento turbulento para el ejemplo de aplicación sobre un puente ficticio.
Fuente: Elaboración propia.

y (m)	z (m)	v _m (m/s)	I _u (%)	I _v (%)	I _w (%)	^x L _u (m)	^x L _v (m)	^x L _w (m)
0,00	100,00	37,55	13,16	11,58	7,24	151,05	60,05	35,00
25,00	98,75	37,49	13,18	11,60	7,25	150,39	59,69	34,56
50,00	97,50	37,42	13,20	11,62	7,26	149,72	59,33	34,13
75,00	96,25	37,36	13,22	11,64	7,27	149,04	58,96	33,69
100,00	95,00	37,30	13,25	11,66	7,29	148,36	58,59	33,25
125,00	93,75	37,23	13,27	11,68	7,30	147,68	58,22	32,81
150,00	92,50	37,16	13,29	11,70	7,31	146,98	57,85	32,38
0,00	105,00	37,79	13,07	11,50	7,19	153,65	61,48	36,75
25,00	103,75	37,73	13,09	11,52	7,20	153,01	61,12	36,31
50,00	102,50	37,67	13,11	11,54	7,21	152,36	60,77	35,88
75,00	101,25	37,61	13,13	11,56	7,22	151,71	60,41	35,44
100,00	100,00	37,55	13,16	11,58	7,24	151,05	60,05	35,00
125,00	98,75	37,49	13,18	11,60	7,25	150,39	59,69	34,56
150,00	97,50	37,42	13,20	11,62	7,26	149,72	59,33	34,13

Los espectros de referencia de los puntos del dominio se han calculado con un Δf igual a 0,001 Hz y una frecuencia máxima de cálculo de 3 Hz. Los datos de la función de coherencia son los mismos utilizados para el caso unidimensional. La señal se ha calculado con un paso de tiempo de 0,01 s y una duración total de 300 s. Los resultados obtenidos en cuanto a la forma del espectro de referencia, la distribución de la densidad espectral cruzada en función de la frecuencia, el ajuste del espectro de la señal y la forma de la misma pueden ser interpretados de la misma forma que en el caso unidimensional, por lo que no se vuelve a realizar un análisis de dicho tipo en este apartado.

Sin embargo, sí se ha realizado un análisis de la distribución espacial de las velocidades turbulentas del viento dentro del dominio de cálculo; en concreto, en el espacio que ocupa el canto de la sección. De acuerdo a las coordenadas introducidas, dicha distribución se podrá visualizar en el plano YZ del espacio, puesto que todas las coordenadas en X son coincidentes.

En primer lugar se ha analizado la distribución de velocidades longitudinales en el plano YZ en el instante de tiempo correspondiente a 150 s, la cual se muestra en la **Figura 4.19**. La interpolación realizada entre los puntos del dominio de cálculo permite obtener una idea de cómo se distribuyen las velocidades en la superficie de la viga, aspecto que puede ayudar al entendimiento de la respuesta estructural que se obtenga del análisis estructural posterior.

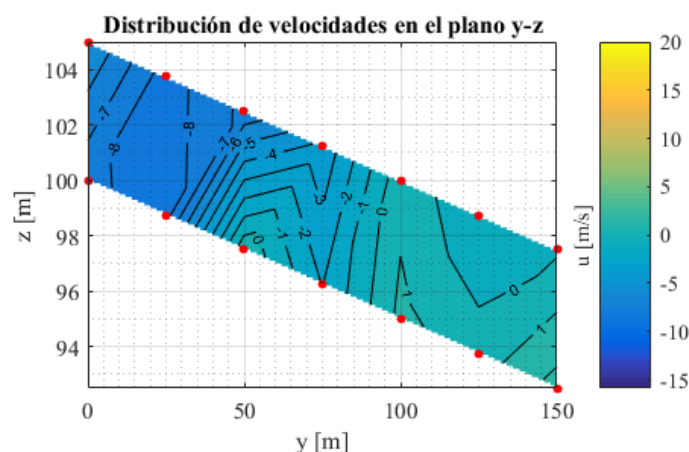


Figura 4.19. Distribución espacial de la velocidad longitudinal sobre el canto del puente en el plano YZ para el instante de tiempo correspondiente a 150 s. Fuente: Elaboración propia.

En segundo lugar, en la **Figura 4.20** se muestra la distribución de velocidad lateral en el mismo instante de tiempo. Se puede comprobar que la forma de la distribución es similar, si bien se dan unos valores ligeramente más reducidos de velocidad.

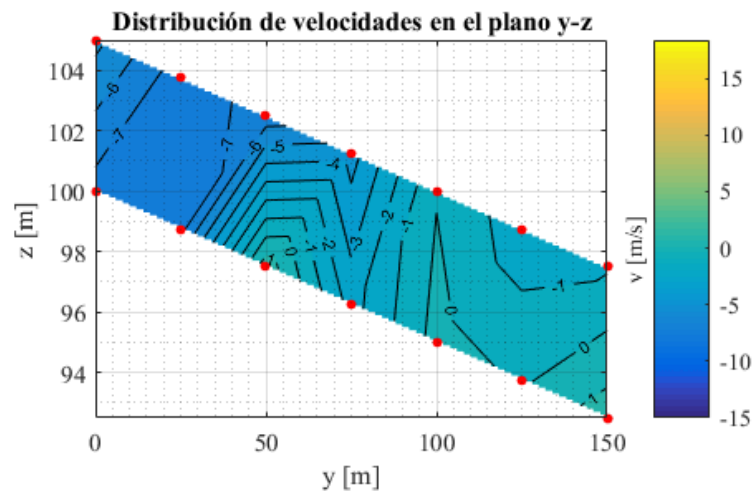


Figura 4.20. Distribución espacial de la velocidad lateral sobre el canto del puente en el plano YZ para el instante de tiempo correspondiente a 150 s. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la distribución de velocidades verticales se muestra en la **Figura 4.21**. En este caso se aprecian valores mucho más reducidos (del orden de la mitad que en los casos anteriores), si bien se sigue manteniendo la forma de la distribución espacial.

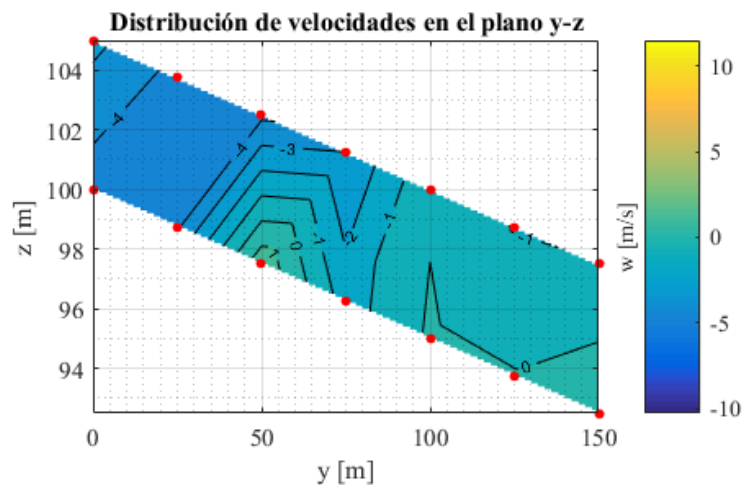


Figura 4.21. Distribución espacial de la velocidad vertical sobre el canto del puente en el plano YZ para el instante de tiempo correspondiente a 150 s. Fuente: Elaboración propia.

Obviamente, las figuras mostradas anteriormente verían incrementada su precisión en la interpolación al incluir más puntos en el dominio de cálculo de la señal; sin embargo, esta mejora se consigue a costa de un importante aumento en el tiempo de computación, por lo cual es recomendable establecer un equilibrio razonable entre los puntos utilizados para la generación de historias de viento y los puntos de la estructura necesarios para garantizar una correcta modelización de la misma.

Con los ejemplos mostrados queda patente la utilidad de la herramienta WindMaker© a la hora de establecer distribuciones estimadas de la velocidad del viento. Esta aplicación puede ser extendida a dominios mayores de viento, en los cuales puede ser interesante la visualización de la distribución espacial de la velocidad del viento.

4.8 FUERZAS DE VIENTO EQUIVALENTES

Una vez generada la señal de velocidad de la componente turbulenta del viento y determinado su grado de validez de acuerdo a lo dispuesto en apartados anteriores, es necesario convertir dicha historia de velocidades en una historia de fuerzas aplicadas sobre la estructura cuyo análisis se aborde. En el presente TFM dicha estructura es una pasarela peatonal suspendida, por lo que las expresiones y descripciones realizadas en este apartado estarán orientadas a dicho tipo de estructura.

Se ha optado por abordar el análisis de la pasarela teniendo en cuenta el movimiento de **bataneo** (*buffeting* en inglés), concretamente el bataneo del tablero de la pasarela. Para definir las expresiones que permiten obtener la carga del viento sobre la estructura en función de la velocidad del viento es necesario considerar, en primer lugar, una sección tipo como la mostrada en la **Figura 4.22**. La sección corresponde a un tablero rígido, el cual se encuentra inmerso en un flujo de viento turbulento con velocidad media U que sigue la dirección x , y ataca a la estructura con un ángulo β respecto al eje x_0 (posición inicial de la estructura); se considera, en este caso, que la dirección longitudinal y de la estructura es perpendicular a la dirección x que sigue el viento.

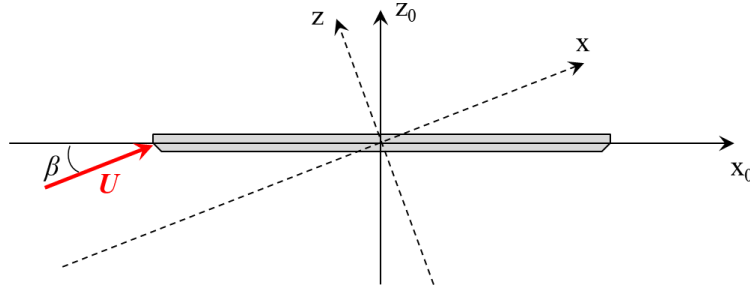


Figura 4.22. Actuación del viento turbulento sobre un tablero rígido esbelto. Fuente: Elaboración propia.

Debido a la acción del viento aparecen presiones en los contornos de la sección. Considerando el caso bidimensional expuesto en la **Figura 4.22**, la fuerza resultante de las mencionadas presiones se puede expresar como un vector con la siguiente forma:

$$F(t) = \begin{bmatrix} D(t) \\ L(t) \\ M(t) \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Dónde:

- D es la fuerza de arrastre.
- L es la fuerza de elevación.
- M es el momento de torsión.

A continuación se exponen, en primer lugar, las hipótesis que llevan a la generación de un método de cálculo cuasiestático, el cual desestima el efecto que tiene la presencia de la estructura sobre la turbulencia; posteriormente se introducen las funciones de admitancia aerodinámica, que sí tienen en cuenta dicho efecto. Para ello se han seguido las indicaciones expuestas en (Hong, 2009).

Como aclaración para la aplicación de las fuerzas de viento que se realizarán sobre la estructura en el apartado 6.3, mencionar que se utilizarán las expresiones derivadas de la teoría cuasiestática, ya que las dimensiones tan reducidas de la pasarela objeto de estudio no supondrán un efecto importante sobre la turbulencia y, por tanto, no es necesario incluir las funciones de admitancia aerodinámica.

4.8.1 HIPÓTESIS CUASIESTÁTICAS EN SECCIONES ESBELTAS

El tablero de un puente puede ser considerado, generalmente, como un cuerpo muy esbelto en relación a su eje longitudinal; en este caso las hipótesis de carga de viento cuasiestáticas son válidas. Estas hipótesis, además, únicamente son válidas cuando:

- El tamaño de la sección es pequeño en comparación con las escalas de turbulencia, lo que permite considerar que los torbellinos turbulentos se adaptan perfectamente sobre el cuerpo.
- El contenido de frecuencia de la componente de la turbulencia afectada por la forma de la sección es muy elevado con respecto al contenido de frecuencias de la turbulencia, por lo que no se superponen ambas.
- La componente turbulenta de la velocidad es pequeña en comparación la componente media.

Bajo estas circunstancias, el vector de fuerzas mostrado en la ecuación (4.37) puede ser dividido en dos partes diferenciadas:

$$F(t) = F_m + F_t(t) \quad (4.38)$$

Dónde:

- F_m es la componente media de la velocidad, independiente del tiempo.
- $F_t(t)$ es la componente turbulenta de la velocidad, variable en función del tiempo.

La **componente media de la fuerza**, que es constante en todo el período de tiempo analizado, es un vector de tres componentes obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot \begin{bmatrix} C_D(\beta) \\ C_L(\beta) \\ B \cdot C_M(\beta) \end{bmatrix} \quad \text{en N/m}^2 \quad (4.39)$$

Siendo:

- ρ es la densidad del aire, en kg/m^3 .
- U es la velocidad media del viento, en m/s .
- B es la anchura del tablero, en m .
- β es el ángulo de ataque del viento sobre el tablero, según se mostró en la **Figura 4.22**.
- C_D , C_L , C_M son los coeficientes de arrastre, de levantamiento y de vuelco, respectivamente, evaluados en función del ángulo β de ataque del viento sobre el tablero. Generalmente, estos coeficientes son obtenidos de ensayos de túnel de viento, si bien existen valores tabulados para secciones típicas.

La expresión (4.39) permite obtener la fuerza actuante sobre la estructura por unidad de superficie. Para obtener la fuerza por unidad de ancho bastaría con multiplicar por la anchura B .

La **componente variable de la fuerza**, debida a la turbulencia, depende del instante de tiempo considerado. Bajo las hipótesis de carga cuasiestática esta componente se puede aproximar teniendo en cuenta que la turbulencia del campo de viento no se ve afectada por la forma de la estructura. Basándose en esta asunción, el vector de tres componentes de fuerzas asociadas a la turbulencia del viento se puede expresar de la siguiente forma:

$$F_t(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U \cdot C_{AC} \cdot V(t) \quad \text{en N/m}^2 \quad (4.40)$$

Siendo:

- C_{AC} la matriz de coeficientes aerodinámicos, con la forma:

$$C_{AC} = \begin{bmatrix} 2 \cdot C_D(\beta) & C'_D(\beta) - C_L(\beta) \\ 2 \cdot C_L(\beta) & C'_L(\beta) + C_D(\beta) \\ 2 \cdot B \cdot C_M(\beta) & B \cdot C'_M(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Con C'_D , C'_L , C'_M las derivadas de los coeficientes C_D , C_L , C_M respecto al ángulo β .

- $V(t)$ el vector con la componente de velocidad turbulenta, con la forma:

$$V_t(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ w(t) \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Con $u(t)$ y $w(t)$ las componentes longitudinal y vertical, respectivamente, de la turbulencia del viento.

La expresión (4.40) permite obtener la fuerza actuante sobre la estructura por unidad de superficie. Para obtener la fuerza por unidad de ancho bastaría con multiplicar por la anchura B .

4.8.2 FUNCIONES DE ADMITANCIA AERODINÁMICA

La asunción anterior de que la forma y tamaño de la sección no afecta al flujo turbulento del viento puede ser válida en algunas ocasiones en las que el elemento estructural tiene un tamaño reducido; sin embargo, en otras aplicaciones con estructuras de mayor dimensión, en las que su tamaño no es pequeño en comparación con la longitud de la turbulencia, este efecto no puede ser despreciado, ya que el flujo turbulento no se adapta perfectamente a la forma de la sección. Además, puede ocurrir que el contenido de frecuencias de la parte de la turbulencia afectada por la forma y tamaño de la sección sobre la que incide se superponga con el contenido de frecuencias de la componente normal de la turbulencia, por lo que ambas deben ser calculadas en consonancia.

Bajo estas circunstancias, la **componente variable de la fuerza** del viento turbulento se puede calcular de la misma forma que se expuso en la ecuación (4.40), pero calculando la matriz de coeficientes aerodinámicos de la siguiente manera:

$$C_{AC} = \begin{bmatrix} \chi_{Du} \cdot 2 \cdot C_D(\beta) & \chi_{Dw} \cdot (C'_D(\beta) - C_L(\beta)) \\ \chi_{Lu} \cdot 2 \cdot C_L(\beta) & \chi_{Lw} \cdot (C'_L(\beta) + C_D(\beta)) \\ \chi_{Mu} \cdot 2 \cdot B \cdot C_M(\beta) & \chi_{Mw} \cdot B \cdot C'_M(\beta) \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Dónde:

- χ_{Du} , χ_{Lu} , χ_{Mu} , χ_{Dw} , χ_{Lw} , χ_{Mw} , son las seis funciones de admitancia aerodinámica complejas. Su valor se obtiene, generalmente, de ensayos específicos en túnel de viento.

Debido a que las características de la estructura objeto de estudio del presente TFM no hacen necesario, a priori, considerar las funciones de admitancia aerodinámica y, puesto que no se dispone de los recursos para obtener los coeficientes asociados en ensayos de túnel de viento, se realizará el cálculo de acuerdo a lo expuesto únicamente en el apartado 4.8.1.

5 CASO DE ESTUDIO: PASARELA SUSPENDIDA EN ZUHEROS (CÓRDOBA)

El presente capítulo persigue la confección de un modelo de cálculo numérico para, posteriormente, realizar un ejemplo de aplicación a una estructura real de las señales sísmicas y de viento generadas de acuerdo a las metodologías expuestas en apartados anteriores. Para ello, se presentan en primer lugar las características que definen a la estructura utilizada como ejemplo para realizar el análisis estructural. En base al estudio de estas características, se ha elaborado un modelo estructural numérico en ANSYS (versión 16) para el análisis de la estructura. Además, aunque no es objetivo directo del presente trabajo, se ha realizado un ensayo de vibración ambiental con la finalidad de ajustar el modelo numérico de la estructura al comportamiento real de la misma; para ello, se aportan las nociones básicas necesarias para la realización de un análisis modal operacional (OMA) a partir de los datos medidos en el ensayo, así como para la actualización del modelo numérico en base a los resultados del OMA. Finalmente, se comparan los resultados experimentales y numéricos tanto antes como después del ajuste con el objetivo de mostrar el grado de mejora conseguido con la actualización.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA

La estructura cuyo análisis se aborda consiste en una pasarela peatonal suspendida situada en el municipio de Zuheros, en la provincia de Córdoba (España). La pasarela se encuentra en el límite de la población, sirviendo como paso para un sendero peatonal que permite el tránsito a lo largo del perímetro del municipio por su parte septentrional; su situación exacta dentro de la senda, justo al pie del castillo de la población, se muestra en la **Figura 5.1**.

La pasarela fue construida por la empresa Metalhergos S.L., una compañía del ámbito de la obra industrial, la edificación y otras áreas afines de la construcción. La estructura está formada por un solo vano suspendido con una longitud total aproximada de 32,50 metros y una anchura del tablero de 1,31 metros, cuyo alzado se muestra en la **Figura 5.2**.

La pasarela está compuesta por cables de acero trenzado plastificados de 24 mm de diámetro en cada lateral, dispuestos tanto en la parte superior como en la inferior, dando lugar a una sección transversal en la que actúan un total de 8 cables (2 arriba y 2 abajo en cada lateral). El tablero está materializado a partir de pequeñas vigas transversales de acero rectangulares que unen la parte inferior de las péndolas de cada lateral; sobre estas vigas se apoyan placas de trámex de 30x3, y sobre éstas se encuentran ancladas tablas de madera sobre las que discurre el tráfico (ver **Figura 5.3**, durante la construcción). En los laterales de la pasarela se encuentra dispuesto un mallazo metálico a modo de protección anticaída del tráfico peatonal. Algunos de los aspectos anteriores se muestran en la imagen de la **Figura 5.4**.



Figura 5.1. Situación de la pasarela respecto al municipio de Zuheros. Fuente: (Google, 2017).

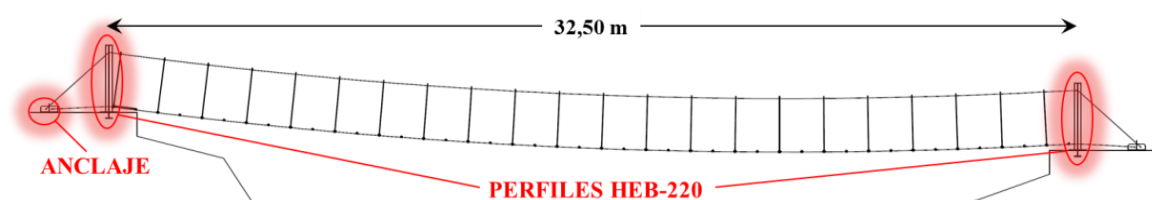


Figura 5.2. Alzado de la pasarela. Fuente: Elaboración propia a partir de planos elaborados por Metalhergos S.L.



Figura 5.3. Colocación de trámex y madera en el tablero de la pasarela. Fuente: Metalhergos S.L.



Figura 5.4. Vista de la pasarela desde el interior. Fuente: Elaboración propia.

Los cables de la parte superior y la inferior se encuentran unidos por péndolas rígidas de acero de 20 mm de diámetro; dicha unión se materializa mediante el detalle expuesto en la **Figura 5.5**.



Figura 5.5. Unión entre cables y péndolas en la parte superior. Fuente: Elaboración propia.

En los extremos los cables se encuentran anclados al suelo sobre una zapata de hormigón que descansa directamente sobre el suelo. Además, éstos pasan a través de perfiles de acero HEB-220, tanto en la parte superior como en la inferior, tal y como se muestra en la **Figura 5.6**.



Figura 5.6. Detalle de unión entre cables y vigas de los extremos de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.

5.2 MODELO DE CÁLCULO NUMÉRICO

En el presente apartado se procede a la descripción de los diferentes elementos que conforman el modelo de elementos finitos de la pasarela objeto de análisis, especificando las principales consideraciones que se han tenido en cuenta a la hora de elaborar la geometría, establecer los materiales, y elegir los tipos de elementos y su mallado. Además, se exponen las condiciones de apoyo de la estructura. Finalmente, se aportan los resultados numéricos del análisis modal realizado con objeto de poder abordar posteriormente la actualización del modelo.

5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo de la pasarela peatonal objeto de estudio se ha implementado en el software ANSYS (versión 16). En la elaboración del modelo se han seguido, a grandes rasgos, los siguientes pasos:

- 1) Definición de la geometría del modelo.
- 2) Definición de los materiales que forman la estructura.
- 3) Elección de los elementos que simulan las diferentes partes de la pasarela.
- 4) Mallado de los elementos.
- 5) Asignación de condiciones de apoyo.

5.2.1.1. Geometría

El modelo elaborado es tridimensional, siendo líneas y áreas la geometría implementada en función del tipo de elemento estructural que se quiera modelizar. Así, las líneas se han utilizado para la definición de cables, péndolas, vigas y uniones entre elementos, mientras que las áreas se han utilizado para la definición de la solera de la pasarela.

5.2.1.2. Materiales

En la elaboración del modelo se han considerado varios tipos de materiales cuyas características serán el principal objetivo de la actualización llevada a cabo posteriormente. Los materiales empleados (lineales en todos los casos), sus características estimadas en una primera aproximación y los elementos donde serán empleados se muestran en la **Tabla 5.1**. La elección de estos materiales se justifica en los siguientes puntos:

- Necesidad de varios tipos de acero según la parte de la estructura, pues el comportamiento de los distintos elementos puede ser muy diferente. Así, es necesario diferenciar entre el acero de los cables trenzados, de las péndolas, de las placas de trámex y de las vigas (tanto verticales de los extremos como transversales de la solera).
- Necesidad del uso de materiales equivalentes para simular algunos aspectos singulares de la estructura, como son los elementos ficticios de unión que materializan la conexión entre solera y cables.

Tabla 5.1. Características iniciales de los materiales implementados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS		OBSERVACIONES
1	Acero de cables trenzados	Tipo:	Isótropo	Se le ha dado al cable una tensión inicial T para establecer el equilibrio inicial de la estructura
		E (MPa)	160.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	7.850	
		T (kg/cm ²)	2	
2	Acero para placas de trámex	Tipo:	Isótropo	Se ha calculado una densidad equivalente como si se tratara de una placa continua de acuerdo a un peso teórico de 29,9 kg/m ²
		E (MPa)	160.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	997	
3	Madera para placas sobre trámex	Tipo:	Ortótropo	Clase resistente C50 de acuerdo a (Fomento, 2009)
		E_0 (MPa)	16.000	
		E_{90} (MPa)	530	
		G (MPa)	1.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	550	
4	Acero para unión solera-cables	Tipo:	Isótropo	Se trata de una unión ficticia para asemejar el comportamiento real, por lo que la densidad se anula
		E (MPa)	21.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	0	
5	Acero de vigas (verticales y transversales)	Tipo:	Isótropo	
		E (MPa)	210.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	7.850	
6	Acero para péndolas	Tipo:	Isótropo	
		E (MPa)	210.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	7.850	
7	Acero parte baja péndolas	Tipo:	Isótropo	La pasarela tiene muy poca rigidez transversal, por lo que se ha disminuido a la sexta parte el módulo E de la parte baja de las péndolas para simular este efecto
		E (MPa)	35.000	
		ν	0,30	
		ρ (kg/m ³)	7.850	

5.2.1.3. Elementos

En el modelo de elementos finitos se han empleado varios tipos de elementos con objeto de modelizar lo más correctamente posible el comportamiento estructural de las diferentes partes de la estructura. A tal efecto, se han empleado los siguientes tipos de elementos de ANSYS (versión 16):

- **LINK180:** elemento uniaxial de dos nodos con tres grados de libertad en cada nodo (traslaciones en las direcciones X, Y, Z). El elemento puede ser asignado para trabajar únicamente a compresión, únicamente a tracción, o ambas. Su forma se muestra en la **Figura 5.7**.

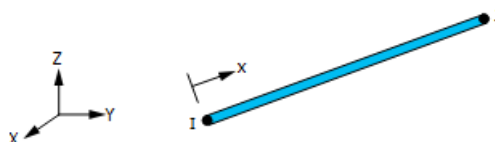


Figura 5.7. Elemento LINK180 de ANSYS (versión 16). Fuente: (ANSYS, 2013).

- **BEAM188:** elemento de dos nodos que tiene seis grados de libertad por nodo (traslaciones en las direcciones X, Y, Z, y rotaciones alrededor de los ejes X, Y, Z) y admite funciones de forma lineales, cuadráticas o cúbicas. El elemento está basado en la teoría de la viga de Timoshenko, la cual incluye los efectos de la deformación por cortante en la sección. La forma del elemento se muestra en la **Figura 5.8**.

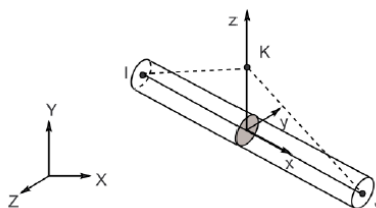


Figura 5.8. Elemento BEAM188 de ANSYS (versión 16). Fuente: (ANSYS, 2013).

- **SHELL181:** adecuado para el análisis de elementos tipo placa delgados y moderadamente gruesos. Se trata de un elemento de cuatro nodos con seis grados de libertad por nodo (traslaciones en las direcciones X, Y, Z, y rotaciones alrededor de los ejes X, Y, Z). El elemento está basado en la teoría de placas de deformación por cortante de primer orden (usualmente conocida como teoría de placas de Mindlin-Reissner). La forma del elemento se muestra en la **Figura 5.9**.

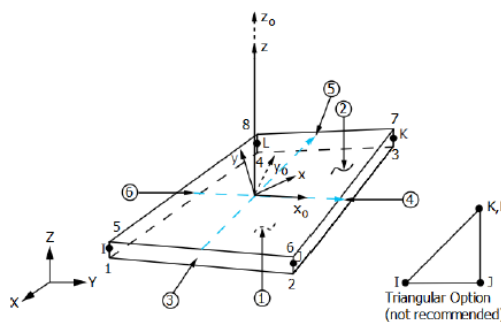


Figura 5.9. Elemento SHELL181 de ANSYS (versión 16). Fuente: (ANSYS, 2013).

Para cada uno de los tipos de elementos descritos, se han definido las secciones que se muestran en la **Tabla 5.2**, junto con los elementos a los que se aplican.

Tabla 5.2. Tipos de elementos y secciones asignados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

ELEMENTO	SECCIÓN	DESCRIPCIÓN
LINK180	Cables trenzados	Sección circular con una sección de área equivalente a dos cables de 24 mm de diámetro. Se ha definido el elemento para que solo trabaje a tracción, dándole una tensión inicial de 2 kg/cm ² .
BEAM188	Vigas verticales	Perfil HEB-220 correspondiente a las vigas verticales de los extremos de la pasarela.
	Vigas transversales	Sección de 8 cm de ancho por 1 cm de canto que se corresponde con las vigas transversales de la solera de la pasarela. La sección está definida en los mismos puntos donde acaban los cables longitudinales, pero con un desfase de 16 mm por encima de ellos.
	Péndolas	Sección circular de 20 mm de diámetro que se corresponde con las péndolas de la pasarela.
	Unión solera-cables	Sección ficticia de diámetro que une la solera con los cables.
SHELL181	Solera	Sección compuesta de dos capas de 3 cm de espesor cada una, la inferior correspondiente al trámex (material 2) y la superior correspondiente a la madera colocada sobre el anterior (material 3).

Por otro lado, resulta de especial importancia comentar la forma en la que se han introducido los elementos de la solera (trámex + madera). Estos elementos se encuentran simplemente apoyados sobre las vigas transversales, sin continuidad longitudinal; por ello, se ha dejado un espacio mínimo de 3 mm entre cada pieza de trámex.

5.2.1.4. Mallado

El mallado de cada tipo de elemento se ha realizado siguiendo las siguientes pautas:

- **Elementos tipo LINK180:** al tratarse de cables, no se han discretizado en elementos más pequeños, pues ello introduciría en el modelo grados de libertad que convertirían la estructura en un mecanismo.
- **Elementos tipo BEAM188:** todos los elementos tipo viga se han dividido en un total de 10 elementos para discretizar el dominio de cálculo.
- **Elementos tipo SHELL181:** para los elementos tipo placa de la solera de la pasarela se ha definido un tamaño máximo de elemento de un cuarto de unidad.

Con todas las indicaciones expuestas hasta aquí, la forma final del modelo es la mostrada en la **Figura 5.10**.

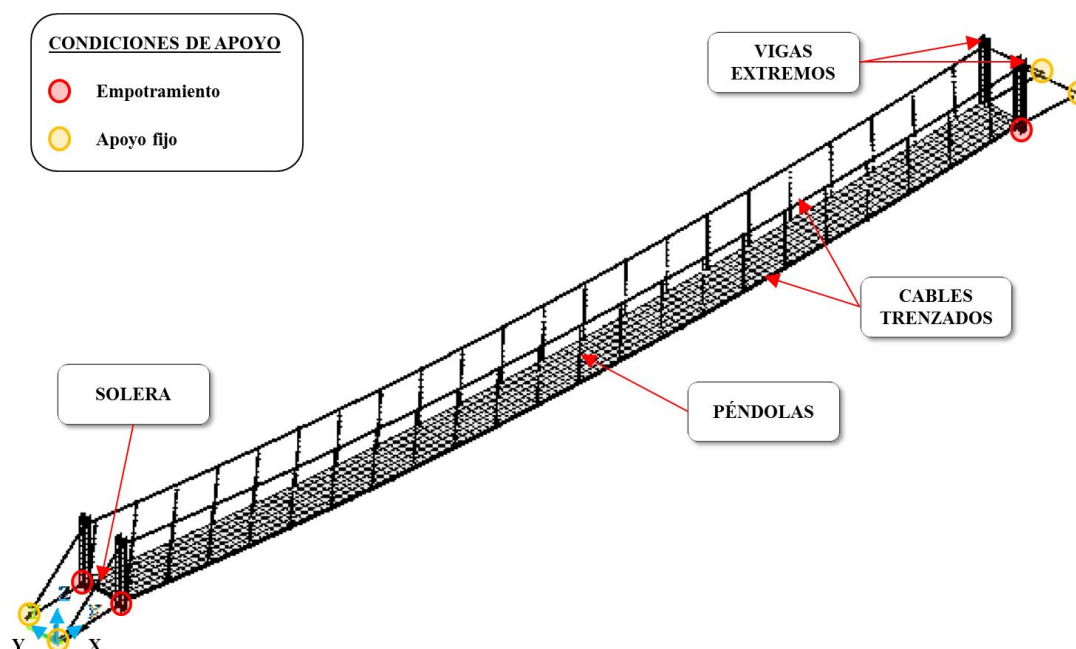


Figura 5.10. Forma del modelo de elementos finitos de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.5. Condiciones de contorno

Las condiciones de apoyo de la pasarela en el terreno sobre el que se ubica se resumen en:

- Condición de empotramiento de las cuatro vigas verticales de los extremos, es decir, restricción de las tres traslaciones y las tres rotaciones.
- Condición de apoyo fijo en los extremos de los cables, es decir, restricción únicamente de las tres traslaciones. En este caso no se restringen las rotaciones pues se supone que los cables no tienen rigidez frente al giro.

Las condiciones descritas se ubican según lo mostrado en la **Figura 5.10**.

5.2.2 ANÁLISIS MODAL NUMÉRICO

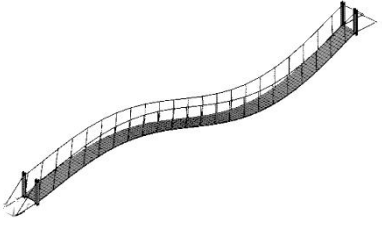
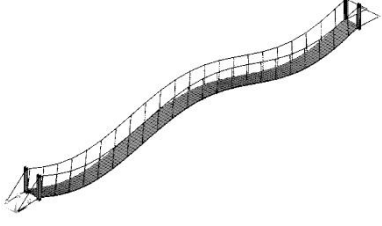
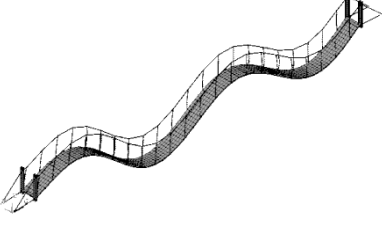
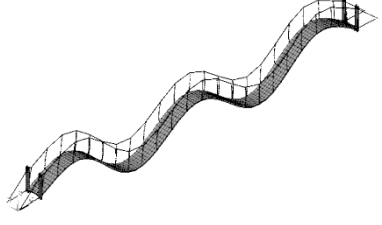
Tras la elaboración del modelo de elementos finitos de la pasarela de acuerdo a lo mostrado en apartados anteriores, el siguiente paso ha sido la ejecución de un análisis modal para la obtención de las frecuencias y modos de vibración naturales de la estructura. El objetivo de este análisis es estimar los parámetros modales para tener una base sobre la que diseñar el ensayo de vibración ambiental.

El análisis modal se ha llevado a cabo en el software ANSYS (versión 16). Previamente al mismo se ha realizado un análisis estático no lineal a peso propio, necesario para establecer el nivel de tensión real en una estructura suspendida en cables, los cuales poseen un comportamiento altamente no lineal. Para la extracción de los modos en el análisis modal se ha aplicado el método *Block Lanczos*, implementado en ANSYS; este método es adecuado para modelos en los que existen elementos tipo *shell*, como es el caso.

Las frecuencias de vibración fundamentales de la estructura, así como sus modos de vibración asociados, se muestran en la **Tabla 5.3**. Se han obtenido los modos de vibración verticales puesto que, como se verá posteriormente, se han identificado más modos verticales en el ensayo de vibración ambiental; así, el modelo de elementos finitos será actualizado para

representar de forma real el comportamiento vertical de la estructura, por lo que la aplicación de las señales sísmicas y de viento generadas con las metodologías expuestas en el presente TFM se realizará en dicha dirección.

Tabla 5.3. Frecuencias y modos propios numéricos estimados inicialmente. Fuente: Elaboración propia.

MODO	f_{NUM} (Hz)	FORMA DEL MODO
1° Vertical	1,229	
2° Vertical	1,683	
3° Vertical	2,496	
4° Vertical	3,196	

5.3 ENSAYO DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

La caracterización experimental del comportamiento dinámico de las pasarelas peatonales puede realizarse según dos niveles de complejidad según sean las características de la estructura y el objeto del estudio. En un primer nivel se identifican los parámetros dinámicos de la estructura, y en un segundo nivel se realizan medidas de la respuesta dinámica de la misma frente a diferentes escenarios de carga de peatones (Casado et al., 2011).

En el **primer nivel** de estudio se suelen identificar las frecuencias naturales, los modos de vibración, el amortiguamiento y las masas modales correspondientes a los modos de vibración de la pasarela teniendo como finalidad: en primer lugar, el ajuste del modelo numérico de la estructura; y en segundo lugar, el diseño óptimo de los sistemas de absorción de vibraciones en el caso de que fueran necesarios. Generalmente, los parámetros dinámicos se identifican a partir de los registros de aceleración en dirección vertical, lateral y longitudinal en puntos clave del tablero, pilas y otros elementos de la estructura en situaciones de respuesta ambiental, libre o forzada.

Para el caso de estudio se ha realizado un ensayo de vibración ambiental con fecha 21 de Abril de 2017, en el que no se fuerza la excitación de la estructura de manera artificial, sino que las mediciones recogidas se llevan a cabo bajo las condiciones de excitación ambiental de la situación de servicio habitual. La vibración de la pasarela puede ser medida en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración o deformación. En el ensayo realizado, la respuesta ha sido medida en términos de aceleraciones mediante una serie de acelerómetros colocados estratégicamente según una serie de configuraciones o *setups*.

Los registros obtenidos del ensayo se tratan posteriormente con técnicas como: el análisis espectral, en el que sólo se calculan las frecuencias naturales; el análisis modal clásico (EMA – *Experimental Modal Analysis*), donde se mide la respuesta de la estructura ante una entrada conocida que se genera por medio de dispositivos mecánicos como martillos instrumentados y excitadores electrodinámicos; o el análisis modal operacional (OMA – *Operational Modal Analysis*), cuya principal ventaja frente al anterior es que no es necesario excitar a la estructura de forma controlada. Las dos últimas técnicas identifican, además de las frecuencias naturales, los modos y amortiguamientos modales de la estructura. En el caso de estudio, los resultados del ensayo han sido procesados mediante la técnica del análisis modal operacional.

En el **segundo nivel** se evalúa el estado de servicio de la estructura y se correlacionan las respuestas experimentales de la estructura con las obtenidas mediante simulación en la etapa de diseño, no habiéndose tratado dicho aspecto en el presente caso.

5.3.1 EQUIPOS UTILIZADOS

Para la realización del ensayo de vibración ambiental se ha utilizado un equipo de instrumentación formado por los dispositivos detallados en los siguientes apartados.

5.3.1.1. Acelerómetros

El registro de las señales o vibraciones durante el ensayo son captadas por los acelerómetros. Se distinguen distintos tipos según el principio físico que emplean: piezoeléctricos, capacitivos o de compensación de fuerzas. Estos últimos son los más adecuados para el uso en ensayos de estructuras de ingeniería civil porque permiten identificar frecuencias muy bajas como las que se detectan en estructuras muy flexibles, mientras que son insensibles a vibraciones de alta frecuencia. Su gran sensibilidad hace que sean capaces de medir pequeños niveles de vibraciones como los que se presentan cuando se realizan ensayos ambientales en los que no hay ninguna excitación artificial de la estructura. Otra de sus características distintivas es si son capaces de registrar mediciones en una sola dirección (uniaxiales) o en varias (triaxiales).

Para el ensayo realizado se dispusieron tres acelerómetros de compensación de fuerzas triaxiales llamados Episensor, de la casa Kinemetrics (ver **Figura 5.11**). Éstos permiten el registro de señales en las tres direcciones perpendiculares del espacio asignadas en tres puntos clave de la pasarela al mismo tiempo.



Figura 5.11. Acelerómetros usados en el ensayo de vibración ambiental. Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.2. Unidad central de adquisición y tratamiento de la señal

La señal eléctrica producida por cada sensor de los acelerómetros es transportada a través de una serie de cables eléctricos a la unidad central, la cual contiene uno o varios convertidores de señal analógica a digital (CAD). Los convertidores transforman las señales continuas en secuencias discretas de números que pueden ser procesadas por un ordenador. En el ensayo se contó con una unidad de Granite, que es una unidad multicanal de Kinometrics (ver **Figura 5.12**).



Figura 5.12. Unidad central de adquisición usada en el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

5.3.1.3. Fuente de generación de energía

Para la realización del ensayo es necesario contar con electricidad para el funcionamiento de los acelerómetros y transmisión de los resultados, por lo que se contó con un grupo electrógeno como el que se muestra en la **Figura 5.13**.



Figura 5.13. Grupo electrógeno usado en el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 DESARROLLO DEL ENSAYO

Con el equipo descrito anteriormente se lleva a cabo el ensayo de vibración ambiental. En primer lugar es necesario establecer las configuraciones del ensayo relativas a los puntos donde se posicionarán los acelerómetros, colocándose dos en puntos de referencia fijos y uno móvil a lo largo de los puntos de medida. El número de puntos en los que se realizan las medidas está condicionado por la resolución necesaria para captar adecuadamente la forma de los modos de vibración de acuerdo con el análisis modal realizado en el modelo de elementos finitos inicial de la pasarela. Además, hay que tener en cuenta que no se deben colocar los puntos de referencia en zonas donde se prevea la existencia de un nodo de alguno de los modos de vibración principales. Siguiendo las directrices comentadas, la configuración establecida para el ensayo de vibración ambiental es la que se muestra en la **Figura 5.14**, dónde los puntos se sitúan en el tablero de la pasarela.

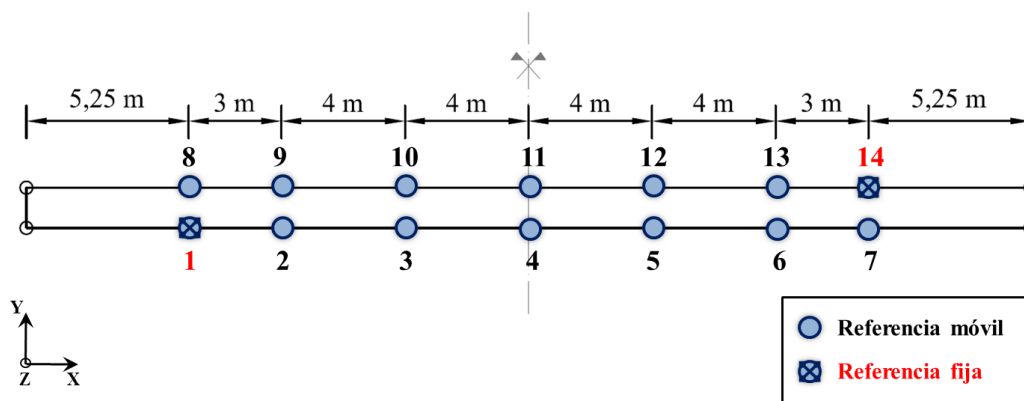


Figura 5.14. Esquema de los puntos de medición del ensayo de vibración ambiental. Fuente: Elaboración propia.

Se trata de un ensayo simétrico, de modo que se registran medidas tanto en el lado derecho como en el izquierdo del tablero con objeto de captar los modos de torsión. Se han definido un total de 14 puntos de medida, todos ellos situados en el tablero. Dos de los puntos son de referencia fija (punto 1 y 14), mientras que el resto son puntos de referencia móvil, distinguiéndose un total de 12 *setups*, es decir: en cada una de las 12 configuraciones hay dos acelerómetros fijos y uno móvil que va cambiándose de posición para cada configuración. Como aclaración adicional, es necesario comentar que no se han considerado los puntos de los extremos del tablero para no introducir ruido a la hora de actualizar el modelo; en el modelo numérico, dichos puntos se consideran, como simplificación, fijos, por lo que la medición de un determinado desplazamiento, por mínimo que sea, podría incurrir en fallos en la actualización.

En segundo lugar se debe decidir la frecuencia de muestreo, que se define como el número de mediciones tomadas por unidad de tiempo de la señal continua para producir una señal discreta que permita ser transformada a digital. Este parámetro está normalmente condicionado por las características técnicas de los equipos. Con el objetivo de evitar distorsión en la señal, la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble que la frecuencia más alta capturada por los sensores (Maia and Silva, 1997). Cabe mencionar que la frecuencia de muestreo condiciona el número de modos que pueden ser identificados, ya que únicamente aquellos cuya frecuencia sea más baja que la mitad de la frecuencia de muestreo podrán ser captados. Para el caso de estudio esto no supone un problema, ya que los sensores tienen un ancho de banda bastante grande: de DC (0 Hz) hasta 200 Hz.

Por último, hay que elegir la longitud de las series temporales que van a registrar los sensores, lo cual influye en la estimación de los parámetros modales. Las simulaciones numéricas demuestran que la longitud óptima de la serie temporal depende de varios factores (de la frecuencia natural más baja, del ratio de ruido en la señal, del algoritmo de identificación de los parámetros modales, etc.) y es difícil de establecer una regla general (Magalhães, n.d.). Una regla general adoptada basada en la experiencia de los investigadores (Cantieni, 2005) sugiere que la longitud del registro debería estar entre 1.000 y 2.000 veces el periodo natural fundamental de la estructura sometida a ensayo.

En el caso de estudio la primera frecuencia natural fundamental (numérica) tiene un valor de $f_n = 1,229$ Hz (primera frecuencia vertical), con lo que el período correspondiente es de $T_n = 0,81$ s. Por lo tanto, la longitud de los registros temporales debería ser de 13 a 27 minutos. Debido al gran número de *setups* en el ensayo se decide finalmente realizar registros con una duración de 15 minutos con la finalidad de no alargar la duración del ensayo, que asciende a 4 horas de grabación de registros más el tiempo necesario para el replanteo de los puntos, el montaje de los equipos y el traslado del acelerómetro móvil a las distintas posiciones de medida.

En la **Figura 5.15** se puede apreciar una fotografía del montaje final del ensayo para el *setup* 13.

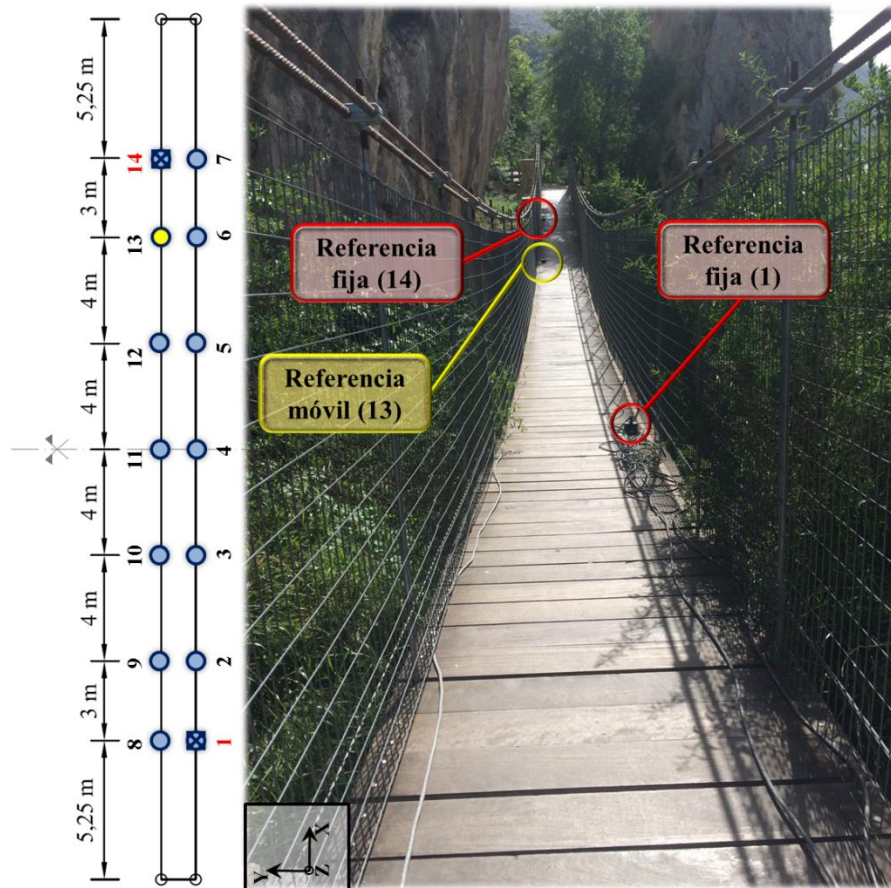


Figura 5.15. Fotografía durante la toma de datos del setup 13 del ensayo. Fuente: Elaboración propia.

5.4 ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL

El objetivo final de un ensayo de vibración ambiental es la realización de un análisis que permita obtener, de forma experimental, los modos y frecuencias de vibración de la estructura. En estructuras civiles una de las técnicas más extendidas es el Análisis Modal Operacional (OMA), pues es mucho más práctico y económico medir la estructura en su estado normal de operación (de ahí el nombre del análisis) que en un estado controlado de excitaciones forzadas (como se tendría en el ámbito del Análisis Modal Experimental). El OMA utiliza como fuente de excitación la ambiental, asumida como un proceso estocástico denominado ruido blanco; por ello, la determinación del modelo que ajusta las medidas experimentales se llama Identificación de Sistemas Estocásticos (SSI, del inglés *Stochastic System Identification*).

En el presente trabajo no se detallan las diferentes técnicas que permiten realizar un análisis modal operacional, puesto que no es objetivo directo del mismo. Para la realización del mencionado análisis se ha recurrido al uso del software ARTEMIS Modal Pro 5.0, en el cual se encuentran implementadas dichas técnicas. El algoritmo utilizado para la estimación de los modos en el ámbito del OMA ha sido el SSI-UPC-Merge (*Stochastic Subspace Identification – Unweighted Principal Component Merged Test Setups*). Dicho algoritmo logra estimar convenientemente los parámetros modales cuando en el ensayo se han realizado varias configuraciones, como es el caso, para lo cual trata previamente la señal para compatibilizar los resultados de los distintos setups (Döhler, Andersen and Mevel, 2010).

Los datos de entrada del análisis son las aceleraciones medidas en los diferentes puntos definidos en la estructura. Se trata de historias de aceleraciones en los tres ejes del espacio (x,y,z) obtenidas mediante los acelerómetros instalados para el ensayo de vibración ambiental. El análisis contempla un total de 12 medidas, en las cuales se incluyen las historias de los dos puntos fijos de referencia y del punto móvil de cada medida; se han eliminado los puntos correspondientes a los extremos puesto que introducían mucho ruido en la señal.

Los resultados obtenidos del OMA son los parámetros modales que definen la dinámica de la estructura, es decir: las frecuencias naturales y los modos de vibración; también se obtienen los ratios de amortiguamiento para cada modo. Para el caso de la pasarela de estudio se han identificado un total de 7 modos, cuyas características se muestran en la **Tabla 5.4**. Del estudio de los modos experimentales se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1) La mayoría de frecuencias han sido obtenidas con un grado de ajuste elevado, es decir, con desviaciones de la media reducidas. La excepción es el quinto modo identificado (tercero vertical), con una desviación de más de 0,6 Hz respecto a la media. Estos resultados se pueden ver gráficamente en la **Figura 5.16**.
- 2) Los amortiguamientos obtenidos son elevados para todos los modos, así como la desviación con respecto a la media. Los valores medios se encuentran en torno al 1-2%, valores mucho más elevados que los típicos en pasarelas de acero en estado de servicio (0,4%, de acuerdo a (Heinemeyer et al., 2009)). Este hecho se puede deber al tránsito de peatones sobre la estructura durante la realización del ensayo de vibración ambiental, lo que puede haber generado un gran amortiguamiento en una estructura con un comportamiento fuertemente no lineal (al ser los elementos estructurales principales cables de acero); también puede deberse al efecto del mallazo lateral concebido como protección anticaídas.
- 3) La forma de los modos mostrada debe ser observada desde un punto de vista aproximado, pues al no medirse todos los puntos de la pasarela es posible que no se haya captado el valor modal máximo de alguno de los modos, especialmente de los más elevados.

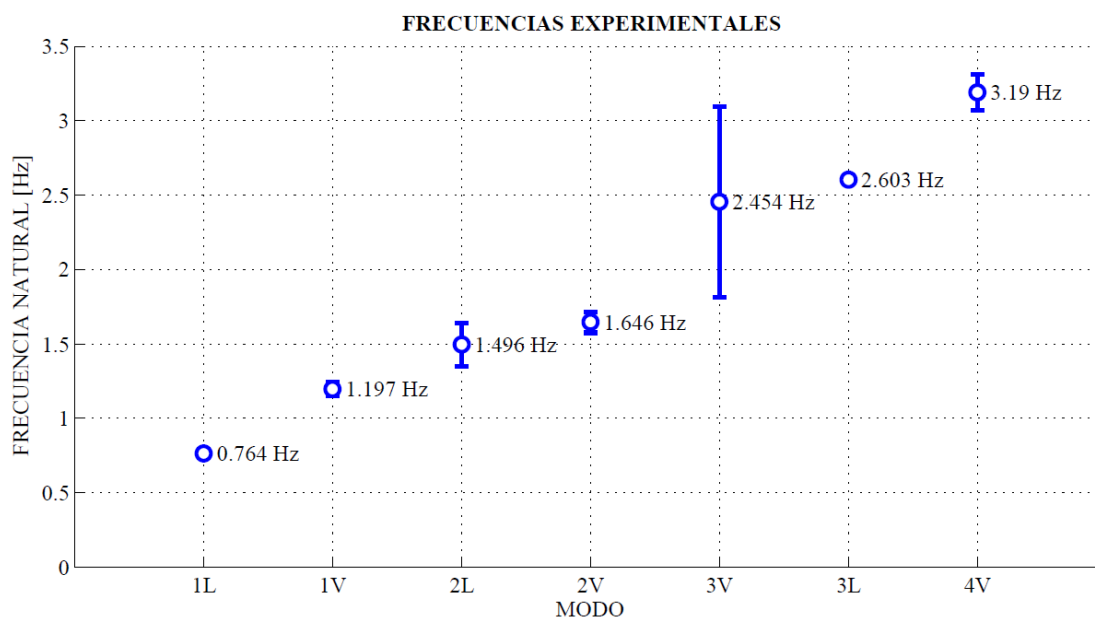
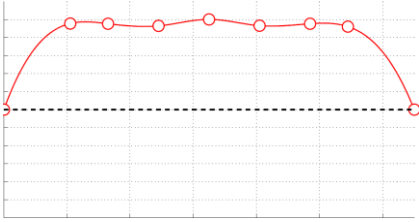
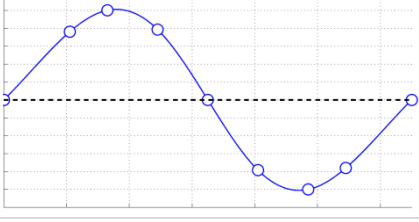
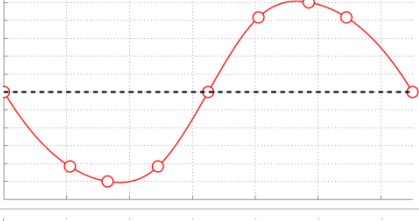
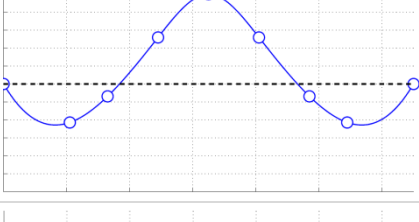
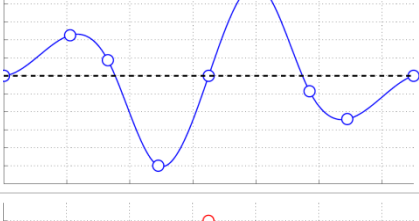
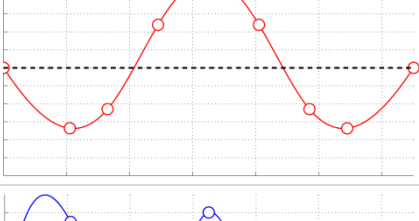
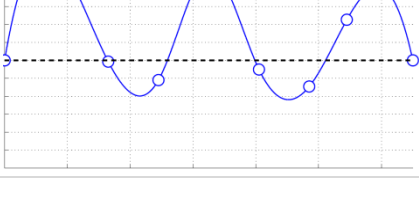


Figura 5.16. Frecuencias experimentales obtenidas y rango de variación. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4. Frecuencias, amortiguamiento y modos experimentales obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

MODO	f_{EXP} (Hz)	Δf_{EXP} (Hz)	ζ_{EXP} (%)	$\Delta \zeta_{EXP}$ (%)	FORMA DEL MODO
1° Lateral	0,764	0,028	1,764	0,977	
1° Vertical	1,197	0,048	2,319	1,078	
2° Lateral	1,496	0,144	1,277	0,868	
2° Vertical	1,646	0,072	1,536	0,767	
3° Vertical	2,454	0,641	2,136	0,934	
3° Lateral	2,603	0,002	2,931	0,086	
4° Vertical	3,190	0,122	1,295	0,531	

Nota: las formas de los modos son orientativas, pues se han obtenido mediante la interpolación cúbica del conjunto de puntos medidos.

5.5 COMPARACIÓN INICIAL DE VALORES MODALES

Tras la elaboración del modelo de elementos finitos de la pasarela y la obtención de los parámetros modales a través de un análisis modal, así como la estimación de dichos parámetros a través de un ensayo de vibración ambiental, se procede a la comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos con objeto de caracterizar el grado de bondad de los resultados proporcionados por el modelo numérico. Esta comparación se realizará únicamente para los modos verticales obtenidos de forma numérica, pues serán los utilizados en la actualización del modelo de elementos finitos utilizado para la aplicación práctica de las señales sísmicas y de viento generadas de acuerdo a la metodología expuesta en el presente TFM.

La comparación inicial entre los valores numéricos (MEF) y los valores experimentales (OMA) se muestra en la **Tabla 5.5**. De su análisis se puede concluir lo siguiente:

- Los cuatro modos verticales identificados en el OMA son reproducidos por el modelo de elementos finitos con bastante precisión.
- Las frecuencias numéricas asociadas a dichos modos presentan una cierta diferencia con respecto a las experimentales; sin embargo, el residuo de las frecuencias (error relativo) es menor al 3% en todos los casos (media de 1,71%), no suponiendo una diferencia excesiva.
- La forma de los modos numéricos presenta más diferencia respecto a los experimentales que en el caso de las frecuencias; sin embargo, se trata de una medición más difícil de obtener con precisión, por lo que la variación existente no conlleva una importancia excesiva. El residuo de los modos es menor del 10% en el peor de los casos (media de 4%).
- Otra forma de medir la similitud entre la forma de los modos numéricos y experimentales es el valor MAC. Los valores obtenidos en este sentido varían de un 99,42% para el primer modo identificado (el de menor frecuencia), reduciéndose hasta un 85,23% para el cuarto modo considerado (el de mayor frecuencia).

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se procede a la realización de un proceso de actualización del modelo de elementos finitos que permita el ajuste de los resultados numéricos a los experimentales de una forma más exacta.

Tabla 5.5. Comparación pre-actualización entre valores experimentales y numéricos. Fuente: Elaboración propia.

MODO	f_{EXP} (Hz)	f_{NUM} (Hz)	r^f (%)	MAC (%)	r^m (%)
1º Vertical	1,197	1,229	2,66	99,42	0,29
2º Vertical	1,646	1,683	2,27	97,69	1,17
3º Vertical	2,454	2,496	1,73	88,46	6,32
4º Vertical	3,190	3,196	0,19	85,23	8,32

Nota: los valores r^f y r^m hacen referencia a los residuos de las frecuencias y los modos de vibración, respectivamente; a su vez, el parámetro MAC aporta una idea de la similitud entre las coordenadas modales. La expresión que permite calcular todos estos parámetros se explica posteriormente en el apartado 5.6.2.

5.6 ACTUALIZACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Después de la comparación de los resultados experimentales y numéricos, se ha procedido a la realización de una actualización del modelo de elementos finitos para así caracterizar adecuadamente el comportamiento dinámico de la estructura según los resultados del ensayo. En la aplicación práctica realizada sobre la pasarela de Zuheros se ha desarrollado un algoritmo que emplea un método iterativo de actualización para ajustar los resultados numéricos a los experimentales modificando varios parámetros físicos del modelo de la estructura. Se trata de un problema de optimización de una función objetivo que caracteriza las diferencias entre los resultados modales numéricos y experimentales y que depende de los parámetros de ajuste seleccionados, siendo el objetivo que se persigue la minimización del error o residuo de los parámetros modales.

En el presente apartado se describe el proceso realizado para la selección de los parámetros de actualización y la función objetivo empleada. Para la resolución del problema se ha empleado un algoritmo de tipo genético, cuyo funcionamiento se expone posteriormente, junto con los resultados obtenidos de la actualización y una comparativa final con los valores experimentales.

5.6.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS

A la hora de elegir los parámetros de actualización del modelo existen dos opciones:

- 1) Elección de parámetros atendiendo a su sentido físico, su incertidumbre y en base a la experiencia.
- 2) Realización de un estudio de sensibilidad de la solución ante cambios en los diferentes parámetros.

En el caso de estudio se han tenido en cuenta ambos criterios de manera conjunta, es decir: se ha llevado a cabo un estudio de sensibilidad de la solución según diferentes parámetros y a su vez, se han incluido en el estudio variables que pueden presentar una gran variabilidad o incertidumbre como pueden ser la tensión de los cables trenzados o la rigidez de las uniones.

Para realizar el estudio de sensibilidad se ha seguido la formulación de Fox y Kapoor (Fox and Kapoor, 1968), la cual establece que la sensibilidad de la frecuencia de vibración natural de un modo j , $\lambda_{NUM,j}$, es proporcional a la energía de deformación modal:

$$\frac{\partial \lambda_{NUM,j}}{\partial a^e} = \sum_{e=1}^{ne} \frac{-2 \cdot MSE_j^e}{(1 - a^e)} \quad (5.1)$$

Dónde:

- a^e es el factor de corrección adimensional que tiene en cuenta el error relativo entre el valor del parámetro actualizado y su valor inicial para el modo de vibración j .
- MSE_j^e es la energía de deformación modal del elemento e relativa al modo j .
- ne es el número de elementos cuyas propiedades son actualizadas al modificar algún parámetro concreto de la actualización.

En base a lo expuesto, se puede realizar el estudio de sensibilidad mediante la evaluación de la energía de deformación modal de los elementos, ya que puede calcularse en el análisis modal en ANSYS del modelo de elementos finitos. Para poder realizar la comparativa entre los distintos parámetros, se puede considerar la energía modal que movilizan los elementos que tienen en común un parámetro respecto del total que movilizan todos los elementos del modelo

para cada modo vibración. De esta forma se puede obtener una relación en porcentaje de la influencia de cada conjunto de elementos que tienen en común un parámetro en las frecuencias naturales. Lo descrito puede expresarse en forma de una matriz de sensibilidad según la siguiente expresión:

$$M_{ij} = \frac{\sum_{e=1}^{ne} MSE_i^e}{\sum_{e=1}^N MSE_j^e} \cdot 100 \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, m_\theta \\ j = 1, 2, \dots, m_f \end{matrix} \quad (5.2)$$

Dónde:

- M_{ij} es el valor de la matriz de sensibilidad para el parámetro i en el modo de vibración j .
- ne es el número de elementos cuyas propiedades son actualizadas al modificar algún parámetro concreto de la actualización.
- N es el número de elementos totales del modelo.
- m_θ es el número de parámetros de considerados.
- m_f es el número de modos de vibración considerados.

En la **Figura 5.17** se puede apreciar la representación gráfica de los valores de la matriz de sensibilidad en la que se ha discretizado el valor de la energía de deformación modal según los distintos elementos que componen el modelo de elementos finitos. De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- La contribución de las **vigas tanto transversales como extremas** es prácticamente nula. Es por ello que, a priori, se descarta cualquier propiedad física de estos elementos como parámetro de actualización.
- Las **péndolas** apenas poseen influencia (tanto el total de las péndolas como la parte baja de las mismas). Sin embargo, puesto que son elementos que unen entre sí los cables superiores y los inferiores, se ha incluido en la actualización el módulo de elasticidad de las péndolas, diferenciando el módulo de la parte de la unión inferior.
- La **unión ficticia que se ha realizado entre la solera y los cables** mediante elementos rígidos tiene una contribución creciente a medida que aumenta la frecuencia del modo, llegando hasta un 7% en el cuarto modo vertical. Este hecho y la incertidumbre del módulo de elasticidad de dichos elementos resultan en su inclusión en la actualización.
- La contribución de la **solera** formada por el trámex y la madera es constante para todos los modos, con un valor en el entorno del 9%. Para tener en cuenta la influencia del tablero se ha incluido como parámetro el módulo de elasticidad del trámex.
- Los **cables trenzados de acero** presentan la mayor influencia de todos los elementos de la estructura, con valores mayores al 80% para todos los modos evaluados. Es por ello que se conforman como los elementos principales de la estructura, por lo que se incluirá en el ajuste su módulo de elasticidad y la tensión inicial de los mismos.

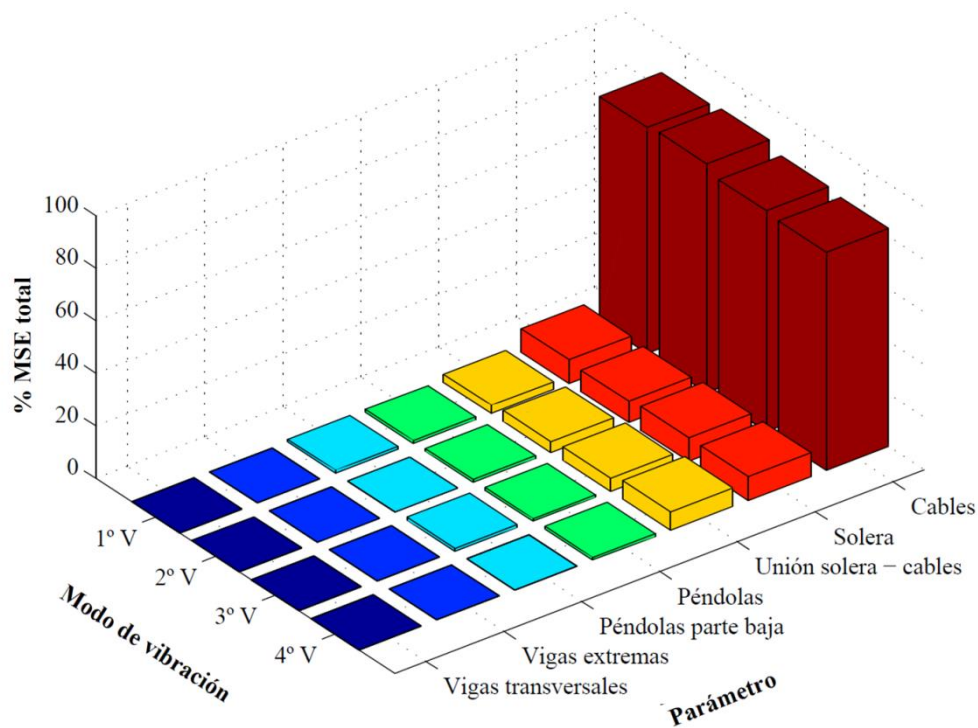


Figura 5.17. Representación de la matriz de sensibilidad. Fuente: Elaboración propia.

5.6.2 FUNCIÓN OBJETIVO

El proceso de actualización se ha llevado a cabo analizando la respuesta modal del modelo tras aplicar modificaciones en los valores de los parámetros físicos definidos en el apartado anterior. Los parámetros de actualización no están relacionados linealmente con los parámetros modales (frecuencias naturales y modos de vibración), por lo que el proceso de actualización requiere el uso de un algoritmo de actualización iterativo.

Para la resolución se ha empleado un algoritmo de único objetivo, cuya función objetivo se ha definido de la forma más general usada, esto es, definiendo la función como un problema de mínimos cuadrados entre los parámetros modales numéricos y experimentales. De esta forma la **función objetivo** se formula como la semisuma de las diferencias al cuadrado, entendiéndose dichas diferencias como residuos (Jin et al., 2014):

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m w_j \cdot r_j(\theta)^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m_f} w_j^f \cdot r_j^f(\theta)^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{m_m} w_j^m \cdot r_j^m(\theta)^2 \quad (5.3)$$

$$\square \quad m = m_f + m_m$$

$$\square \quad \theta_l \leq \theta \leq \theta_u$$

$$\square \quad \sum w_j = \sum (w_j^f + w_j^m) = 1 \quad w_j \geq 0$$

Dónde:

- w_j es el valor de los pesos positivos establecidos para cada tipo de residuo para tener en cuenta la distinta fiabilidad a la hora de identificar los parámetros modales (frecuencias naturales y modos de vibración).
- $r_j(\theta)$ es el valor de los residuos que caracteriza las diferencias entre los parámetros modales numéricos y experimentales.
- m_f es el número de frecuencias naturales consideradas.
- m_m es el número de modos de vibración considerados.
- θ es el vector de parámetros de la actualización.
- θ_l es el vector de límite inferior para cada parámetro de la actualización.
- θ_u es el vector de límite superior para cada parámetro de la actualización.

Es importante señalar que el **número de parámetros de actualización** (m_θ) a elegir debe ser menor que el número de residuos identificados (m) para evitar tener un sistema incompleto o mal condicionado (Nocental and Wright, 1999). En el caso de estudio se han elegido $m_\theta = 6 < m = 8$, por lo que el sistema es compatible.

Como se puede observar en la formulación expuesta, se han establecido dos tipos de **residuos** $r_j(\theta)$: uno relativo a las frecuencias naturales, $r_j^f(\theta)$, y otro relativo a la forma de los modos de vibración, $r_j^m(\theta)$. El residuo relativo a la frecuencia natural, $r_j^f(\theta)$, se define según la siguiente expresión:

$$r_j^f(\theta) = \frac{f_{NUM,j}(\theta) - f_{EXP,j}}{f_{EXP,j}} \quad j = 1, 2, \dots, m_f \quad (5.4)$$

Dónde $f_{NUM,j}(\theta)$ y $f_{EXP,j}$ representan la frecuencia natural j numérica y experimental, respectivamente.

El residuo relativo a la forma del modo de vibración, $r_j^m(\theta)$, se define según la siguiente expresión:

$$r_j^m(\theta) = \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{MAC_j(\theta)})^2}{MAC_j(\theta)}} \quad j = 1, 2, \dots, m_m \quad (5.5)$$

Dónde el MAC (*Modal Assurance Criterion*) es un criterio para establecer la similitud de la forma de los modos desarrollado por (Allemang and Brown, 1982) con la siguiente expresión:

$$MAC_j(\theta) = \frac{(\varphi_{NUM,j}^T(\theta) \cdot \varphi_{EXP,j})^2}{(\varphi_{NUM,j}^T(\theta) \cdot \varphi_{NUM,j}(\theta))(\varphi_{EXP,j}^T \cdot \varphi_{EXP,j})} \quad j = 1, 2, \dots, m_m \quad (5.6)$$

Los parámetros modales, frecuencias naturales y modos de vibración, constituyen la forma de comprobar el ajuste realizado y la influencia de la fiabilidad de cada una de ellas se establece según unos **pesos**, w_j^f y w_j^m , respectivamente. Para la actualización realizada, se ha establecido que los residuos parciales relativos a las frecuencias contribuyen con el mismo peso en la función objetivo ($w_j^f = w^f$) y en el caso de los modos también se ha considerado que influyen de manera equivalente ($w_j^m = w^m$). De esta forma, solo restaría establecer qué ponderación se otorga a las frecuencias y a los modos.

En principio, las frecuencias naturales experimentales pueden ser medidas con una precisión bastante alta y además, son un buen indicador del daño de una estructura. Por ello son los

parámetros más indicados para su uso en la expresión del residuo a minimizar en las actualizaciones de modelos. Sin embargo, es complicado detectar incongruencias locales del modelo de elementos finitos comparando únicamente las frecuencias naturales. A tal efecto, como se acaba de explicar, se utiliza también información acerca de las coordenadas modales al definir la función objetivo. El problema es que el ruido y la precisión en las medidas afecta más a la identificación de las coordenadas modales, de modo que la fiabilidad de las mismas es menor. Por lo general, los parámetros modales, especialmente las frecuencias naturales, de los modos más bajos se miden con una mayor precisión que los de los modos más altos (Jaishi and Ren, 1994). De esta forma, se puede afirmar que la incertidumbre es diferente para los distintos parámetros modales identificados.

La cuestión es entonces de qué manera y con qué criterio determinar el valor de los factores de pesos para los diferentes residuos, w^f y w^m . Un método estadístico de aplicación sería aquel que define los pesos como la inversa de la matriz de covarianza de los errores experimentales, de acuerdo con el teorema de Gauss-Markov (Beck and Arnold, 1997). Sin embargo, esta información en muchas ocasiones no está disponible, de modo que los pesos se establecen de acuerdo al juicio del ingeniero. Otra forma de definirlos pasaría por realizar una resolución iterativa de los pesos hasta llegar a una definición adecuada de los mismos para el problema particular. Al no ser objetivo principal de este proyecto el definir los pesos y con objeto de no incurrir en altos tiempos de computación, se han seguido las recomendaciones de varios autores (Jiménez and Sáez, 2016) tomándose los valores de los pesos que se muestran a continuación, quedando patente la mayor fiabilidad de las frecuencias naturales:

$$w^f = 0,9 \quad w^m = 0,1 \quad (5.7)$$

Estos valores son consistentes con lo observado en el ensayo ambiental debido a que el paso de varios peatones durante el ensayo pudo haber influido en la precisión de las coordenadas modales dada la gran sensibilidad de la estructura frente al paso peatonal.

Como ya se ha comentado, el vector con los valores de **los parámetros, θ , está acotado superior e inferiormente**, restricción definida mediante los vectores θ_u y θ_l , respectivamente. Dichos valores se observan en la **Tabla 5.6**.

Tabla 5.6. Valores mínimos y máximos establecidos para los parámetros de la actualización del modelo de elementos finitos. Fuente: Elaboración propia.

PARÁMETRO	VALOR INICIAL	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	FACTOR MÍNIMO	FACTOR MÁXIMO
E_{CABLES} (MPa)	160.000	144.000	208.000	0,900	1,300
E_{PÉNDOLAS} (MPa)	210.000	189.000	231.000	0,900	1,100
E_{PÉND, BAJO} (MPa)	35.000	28.000	42.000	0,800	1,200
E_{TRÁMEX} (MPa)	160.000	160.000	192.000	1,000	1,200
E_{UNIÓN, SOLERA} (MPa)	21.000	14.700	27.300	0,700	1,300
T_{CABLES} (kg/cm²)	2	2	4	1,000	2,000

5.6.3 PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DE OBJETIVO ÚNICO

Una vez definida la función objetivo y sus componentes solo resta por explicar el tipo de algoritmo a utilizar en el proceso. El algoritmo empleado es de tipo **genético**, siendo una de las técnicas metaheurísticas con más difusión y aplicación en diversos campos.

El algoritmo se basa en un planteamiento probabilístico que además realiza la búsqueda por poblaciones. Su importancia radica en que es un método capaz de converger con muy alta probabilidad en un óptimo global, a diferencia de los métodos basados en gradientes que eran los que más se utilizaban hasta la aparición de estos nuevos algoritmos. Su patrón de búsqueda trata de reproducir los principios de la evolución biológica, es decir, intenta imitar el mecanismo de la teoría de la evolución de Darwin en la que los miembros de una población compiten para sobrevivir y se reproducen, mientras los más débiles mueren. De esta forma, en los algoritmos genéticos se producen nuevas soluciones más evolucionadas (que optimizan la función objetivo del problema) en cada iteración gracias a las operaciones de selección y combinación, de forma análoga a como los genes se transfieren a los nuevos individuos. Con objeto de comprender su funcionamiento se describen a continuación los pasos básicos que se ejecutan al emplear un algoritmo genético:

1) Inicialización:

Al iniciarse el algoritmo se establecen los parámetros del mismo, además de la función objetivo del problema y los límites superiores e inferiores de las soluciones. A continuación se generan de forma aleatoria un determinado número de individuos (soluciones) que forman la población inicial. El número de individuos de la población dependerá de la entidad del problema de modo que constituyan una buena representación de todo el espacio de soluciones.

2) Evaluación de las soluciones de la primera generación:

En este inicio del algoritmo se evalúa también el valor de la función objetivo para cada individuo y a continuación se ejecuta el bucle principal para generar otras poblaciones más evolucionadas usando los tres operadores siguientes de inspiración biológica: selección, cruce o reproducción y mutación.

3) Selección de los mejores individuos:

En cada iteración se selecciona una proporción de la población anterior para crear una nueva generación. Esta selección se realiza en función de la aptitud de los individuos para optimizar la función objetivo, eligiéndose los mejores con una mayor probabilidad. Muchas funciones de selección son de naturaleza estocástica y están diseñadas de modo que también se considere una pequeña proporción de individuos no tan buenos para mantener la diversidad de la población y evitar converger en soluciones incorrectas o locales.

4) Producción de una nueva generación usando los operadores genéticos de cruce o reproducción (*crossover*) y mutación:

El primero de los mecanismos es el de *crossover*, que representa la reproducción. Para generar un nuevo hijo (solución) se agrupan dos padres (un par de soluciones) de los seleccionados previamente. Así la nueva solución se forma a partir de una mezcla de dos de las mejores soluciones anteriores.

En este proceso de reproducción también entra en juego con una cierta probabilidad el mecanismo de la mutación, por el que alguna de las características de la nueva solución es modificada al azar. Así se pueden alcanzar zonas del espacio de búsqueda que no estaban cubiertas por los individuos de la población anterior. La probabilidad con la que actúa este mecanismo puede ser constante o no uniforme, de forma, por ejemplo, que vaya disminuyendo y acercándose a cero a medida que vaya aumentando el número de generaciones. Esto ayudaría a que el algoritmo no se

quedara atascado en óptimos locales en el inicio, mientras que al final permitiría refinar la solución.

La reproducción con sus dos mecanismos continúa hasta que se genera una nueva población de un tamaño apropiado, generalmente del mismo que la primera.

5) Evaluación de la nueva generación:

Después de generar la nueva población, se evalúa la función objetivo para cada individuo de la misma.

6) Finalización:

Los pasos 3º, 4º y 5º se repiten hasta que se cumpla algún criterio de parada. Los criterios de parada suelen ser alcanzar un máximo número de generaciones o generar varias poblaciones seguidas con diferencias por debajo de una cierta tolerancia. Otros criterios pueden ser ejecutar el algoritmo un tiempo máximo u obtener alguna solución para la que el valor de la función objetivo sea menor que un cierto límite que se considera óptimo.

Los pasos descritos, junto con algunas condiciones empleadas en la resolución del problema, se presentan en la **Figura 5.18**.

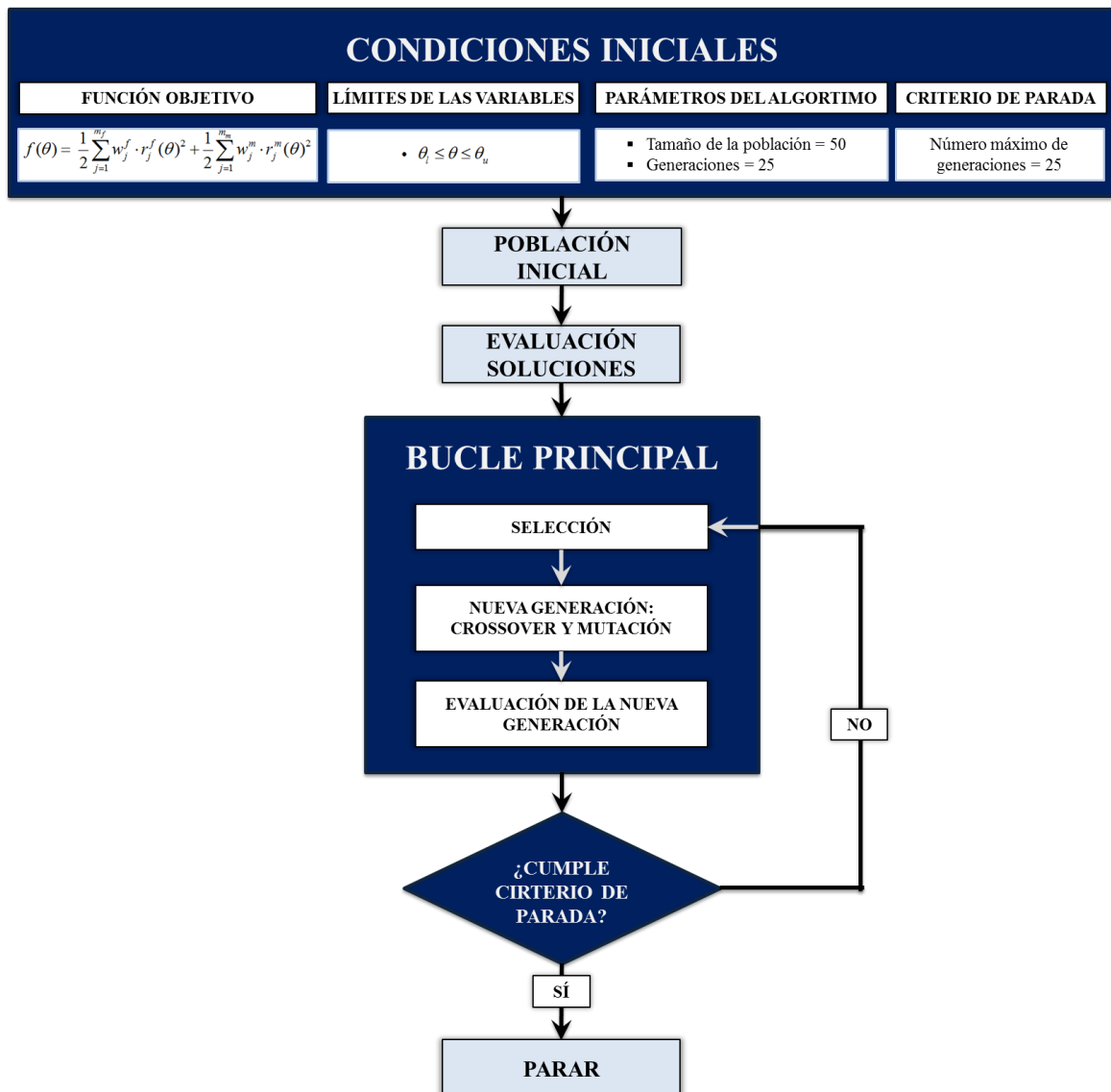


Figura 5.18. Diagrama de flujo del algoritmo genético empleado. Fuente: Elaboración propia.

5.6.4 RESULTADOS DE LA ACTUALIZACIÓN

Tras haber realizado la actualización del modelo de elementos finitos de acuerdo a lo mostrado en apartados anteriores, se obtienen los resultados mostrados en la **Tabla 5.7**.

Tabla 5.7. Parámetros finales obtenidos tras la actualización del modelo. Fuente: Elaboración propia.

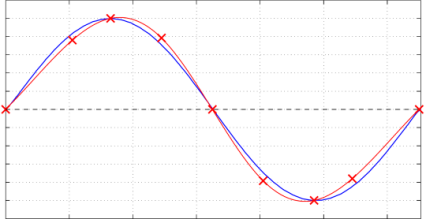
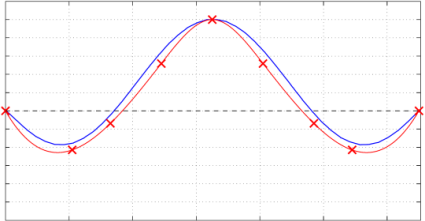
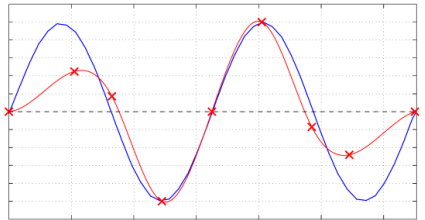
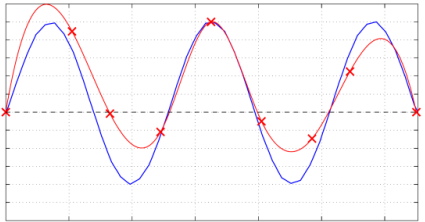
PARÁMETRO	VALOR INICIAL	VALOR FINAL	FACTOR
E_{CABLES} (MPa)	160.000	150.240	0,939
$E_{\text{PÉNDOLAS}}$ (MPa)	210.000	190.260	0,906
$E_{\text{PÉND, BAJO}}$ (MPa)	35.000	28.000	0,800
$E_{\text{TRÁMEX}}$ (MPa)	160.000	172.800	1,080
$E_{\text{UNIÓN, SOLERA}}$ (MPa)	21.000	14.700	0,700
T_{CABLES} (kg/cm ²)	2	2	1,000

5.6.5 COMPARACIÓN FINAL ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

De igual forma que se realizó anteriormente para los valores obtenidos antes de la actualización del modelo numérico, se aborda ahora la comparación entre resultados numéricos y experimentales una vez finalizado el proceso de actualización. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 5.8**, llegándose a las siguientes conclusiones:

- Todos los modos considerados en la actualización del modelo ven mejorado el ajuste de frecuencias naturales asociadas con respecto a la situación antes de la actualización; la excepción es el 4º modo vertical, que ve empeorado su ajuste, pero sin llegar a valores inadmisibles (error del 1,31%). El error medio de las cuatro frecuencias ha bajado, gracias a la actualización, a un valor de 1,11% (por 1,71% antes de la actualización).
- La forma de los modos obtenida numéricamente se ajusta bastante a la forma obtenida del OMA, coincidiendo los puntos de máximo valor modal tanto en los modos numéricos como experimentales. Sin embargo, el ajuste de los valores modales no ha tenido el mayor peso dentro del algoritmo de actualización, por lo que la forma de los modos no se ve mejorada respecto a la situación previa a la actualización (residuo medio de 4,33% después de la actualización por un 4% antes de la actualización). No obstante, dado que el mayor peso de la actualización ha sido dado a las frecuencias (las cuales han visto mejorado su ajuste) y, puesto que la obtención precisa por medios experimentales de la forma modal es complicada, se consideran satisfactorios los resultados de la actualización.
- Los valores del MAC reflejan lo mismo que los residuos de las coordenadas modales, mostrando una ligera disminución en la similitud entre la forma de los modos numéricos y experimentales con respecto a la situación previa a la actualización.

Tabla 5.8. Comparación después de la actualización del modelo numérico entre valores experimentales (rojo) y numéricos (azul). Fuente: Elaboración propia.

MODO	f_{EXP} (HZ)	f_{NUM} (HZ)	r^f (%)	MAC (%)	r^m (%)	FORMA DEL MODO
1° Vertical	1,197	1,219	1,80	99,38	0,31	
2° Vertical	1,646	1,659	0,80	96,75	1,67	
3° Vertical	2,454	2,467	0,53	88,38	6,37	
4° Vertical	3,190	3,148	1,31	84,22	8,97	

Ante los resultados obtenidos, se puede concluir que la actualización ha cumplido los objetivos buscados, pudiendo disponer ahora de un modelo numérico cuyo comportamiento se ajusta al observado a través del ensayo de vibración ambiental.

6 ANÁLISIS DE LA PASARELA PEATONAL SUSPENDIDA DE ZUHEROS

El presente capítulo se concibe como un caso de aplicación de las señales artificiales generadas, tanto de sismo como de viento, a la pasarela suspendida situada en la localidad de Zuheros cuyo modelo numérico de cálculo se actualizó en el capítulo anterior.

En primer lugar se aportan las nociones básicas del tipo de análisis realizado: un análisis transitorio no lineal en el dominio del tiempo. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de fuerzas sísmicas y de viento a la pasarela, respectivamente.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS EMPLEADO

En el presente apartado se detallan las características del tipo de análisis estructural empleado para estudiar la pasarela suspendida en Zuheros de acuerdo a las señales sísmicas y de viento generadas. A tal efecto, se muestran las características básicas del análisis realizado, haciendo hincapié en la definición del paso de tiempo y del amortiguamiento de la estructura.

6.1.1 TIPO DE ANÁLISIS REALIZADO: ANÁLISIS TRANSITORIO NO LINEAL

La aproximación más genérica para la solución de la respuesta dinámica en estructuras es la integración numérica directa de la ecuación de equilibrio, que en el caso de estudio es la siguiente:

$$M \cdot \ddot{x}_{i+1} + C \cdot \dot{x}_{i+1} + K \cdot x_{i+1} = F_{i+1} \quad (6.1)$$

Dónde:

- M, C, K son la masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente.
- F es la fuerza aplicada sobre la estructura.
- $x, \dot{x}, \ddot{x}$ son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura, respectivamente.

Esta ecuación se debe cumplir para todo tiempo t , luego también es válida en el tiempo $t + dt$ y para resolverla se empleará el Método de Newmark (1959) consistente en la integración numérica en el tiempo de las soluciones. De esta forma, se pretenden conocer los valores del movimiento referentes a posición, velocidad y aceleración en un paso de tiempo $n+1$ a partir de los valores conocidos del movimiento en el paso de tiempo anterior, n .

Las ecuaciones del movimiento en el instante $n+1$ según el método de Newmark son las siguientes:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \Delta t^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{x}_n + \beta \ddot{x}_{n+1} \right] \quad (6.2)$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \Delta t \cdot \left[(1 - \gamma) \ddot{x}_n + \gamma \ddot{x}_{n+1} \right] \quad (6.3)$$

A partir de las ecuaciones (6.2) y (6.3) se agrupan en dos variables, x^* y $\dot{x}^*$, los datos de las ecuaciones que se conocen del paso de tiempo n para así obtener las ecuaciones del movimiento del paso $n+1$ en función de la aceleración de dicho paso:

$$x^* = x_n + \Delta t \cdot \dot{x}_n + \Delta t^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{x}_n \longrightarrow x_{n+1} = x^* + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot \ddot{x}_{n+1} \quad (6.4)$$

$$\dot{x}^* = \dot{x}_n + \Delta t \cdot (1 - \gamma) \ddot{x}_n \longrightarrow \dot{x}_{n+1} = \dot{x}^* + \Delta t \cdot \gamma \cdot \ddot{x}_{n+1} \quad (6.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (6.4) y (6.5) en la ecuación (6.1) se obtiene la ecuación de la aceleración para el paso de tiempo $n+1$:

$$\begin{aligned} M \cdot \ddot{x}_{n+1} + C \cdot \left(\dot{x}^* + \Delta t \cdot \gamma \cdot \ddot{x}_{n+1} \right) + K \cdot \left(x^* + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot \ddot{x}_{n+1} \right) &= f_{n+1} \\ [M + \Delta t \cdot \gamma \cdot C + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot K] \cdot \ddot{x}_{n+1} &= f_{n+1} - C \cdot \dot{x}^* - K \cdot x^* = b_{n+1} \\ \ddot{x}_{n+1} &= [M + \Delta t \cdot \gamma \cdot C + \Delta t^2 \cdot \beta \cdot K]^{-1} \cdot b_{n+1} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Una vez obtenida la aceleración en el paso $n+1$ según la ecuación (6.6), se pueden obtener los valores de posición y velocidad en el paso de tiempo $n+1$ de acuerdo a las ecuaciones (6.4) y (6.5).

Los coeficientes β y γ , que condicionan el método de Newmark, tienen una serie de valores que determinan la estabilidad del método. En ANSYS el valor utilizado para dichos coeficientes es el siguiente, pudiendo considerar el método como incondicionalmente estable:

$$\beta = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi)^2 = 0,2525 \quad \gamma = \frac{1}{2} + \xi = 0,505$$

Dónde ξ representa un amortiguamiento numérico tomado con un valor de 0,005.

Por otro lado, el análisis transitorio se ha llevado a cabo teniendo en cuenta la condición de no linealidad de la estructura. A tal efecto, se realiza un cálculo no lineal en cada paso de tiempo, habiendo establecido un número máximo de iteraciones por paso de tiempo de 100. Además, se ha definido la carga de forma que únicamente actúe el peso propio de la estructura durante 0,5 segundos al inicio de la simulación (con objeto de estabilizar el modelo) y posteriormente actúe la carga sísmica o de viento, según proceda, durante el resto de la simulación. Al ser un caso estructural altamente no lineal, es necesario hacer que el peso propio de la estructura actúe de forma simultánea con el resto de cargas aplicadas sobre la estructura.

6.1.2 ELECCIÓN DEL PASO DE TIEMPO

A la hora de elegir el paso de tiempo con el que se realizará el análisis transitorio hay que tener en cuenta varios aspectos. En primer lugar, que el paso de tiempo sea consecuente con los períodos de oscilación de la estructura, siendo necesariamente menor a los mismos para captar adecuadamente los movimientos. En segundo lugar, debe ser coherente con la definición de la carga, siendo capaz de recoger todos los valores calculados.

A tal efecto, la recomendación para captar adecuadamente la oscilación de los modos es la siguiente (ANSYS, 2013):

$$\Delta t = \frac{1}{20 \cdot f_{RESPONSE}} \quad (6.7)$$

Dónde:

- $f_{RESPONSE} \rightarrow$ Valor de frecuencia (en Hz) del mayor modo con contribución significativa al movimiento de la estructura.

De esta forma se obtiene un valor de paso de tiempo que es capaz de captar el movimiento de la estructura. El cuarto modo vertical de la pasarela peatonal objeto de estudio ya moviliza una masa acumulada del 99%, por lo que es suficiente su consideración para captar todos los movimientos verticales de la misma. Así, considerando el valor de frecuencia de dicho modo obtenido en la actualización del modelo numérico de elementos finitos (3,148 Hz), el paso de tiempo mínimo recomendado es de 0,016 s; para quedar del lado de la seguridad, el paso de tiempo finalmente elegido para el análisis (con el cual se definirá la carga actuante sobre la pasarela) es:

$$\Delta t = 0,01 \text{ s}$$

6.1.3 DEFINICIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Para caracterizar el amortiguamiento de la estructura se ha utilizado un modelo de amortiguamiento clásico de Rayleigh, para el cual se necesita un análisis modal previo. La experiencia comprueba que la obtención de los modos de vibración naturales de la estructura es prácticamente independiente del grado de amortiguamiento, por lo que es posible realizar el análisis modal previamente a la definición del amortiguamiento.

El amortiguamiento de Rayleigh es una superposición lineal de las características de masa y rigidez de la estructura, de la forma:

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K \quad (6.8)$$

Dónde:

- M, K , son la masa y rigidez de la estructura, respectivamente.
- α, β , son los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh.

Los coeficientes de amortiguamiento se definen a partir del factor de amortiguamiento ζ contemplado para la estructura (4% en el presente estudio, de acuerdo a (Fomento, 2008)) y de dos frecuencias naturales de vibración ω de la estructura (obtenidas en el análisis modal). La relación entre todos los términos mencionados es la siguiente:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \cdot \omega_i} + \frac{\beta \cdot \omega_i}{2} \quad (6.9)$$

Despejando los coeficientes buscados del sistema de ecuaciones obtenido a partir de las dos frecuencias consideradas (ω_i y ω_j) se obtiene:

$$\alpha = \left[\xi - \frac{\beta \cdot \omega_j}{2} \right] \cdot 2 \cdot \omega_j \quad (6.10)$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \xi \cdot (\omega_i - \omega_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (6.11)$$

Esta forma de caracterización del amortiguamiento representa bien el valor considerado para los dos modos de vibración empleados en el ajuste, siendo necesario un análisis del grado de amortiguamiento para el resto de modos.

Del análisis modal realizado sobre la pasarela peatonal objeto de estudio se han obtenido un total de cuatro frecuencias asociadas a modos verticales, habiéndose determinado que el último de estos cuatro modos moviliza el 99% de la masa de la estructura. Puesto que el análisis realizado sobre la pasarela se hará en dirección vertical, se han ajustado los coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh de forma que éstos representen el valor de amortiguamiento definido (factor de amortiguamiento de 4%) para dichas cuatro frecuencias. Para ello se ha realizado un ajuste que permite determinar el par de frecuencias que minimiza la diferencia entre el valor objetivo de 4% y el valor calculado para cada frecuencia. Así, eligiendo las dos frecuencias extremas (máxima de 3,148 Hz y mínima de 1,219 Hz) se han obtenido resultados satisfactorios para el resto de frecuencias a partir de los siguientes coeficientes del amortiguamiento de Rayleigh:

$$\alpha = 0,4416$$

$$\beta = 0,0029$$

De esta forma, el amortiguamiento definido para la estructura para cada frecuencia de vibración es el mostrado en la **Figura 6.1**. Se comprueba que el amortiguamiento es el esperado para las dos frecuencias consideradas en el ajuste (4%), siendo el amortiguamiento para el resto de frecuencias el mostrado en la **Tabla 6.1**. Ante lo expuesto, se puede decir que el amortiguamiento de la estructura queda definido de forma adecuada.

Tabla 6.1. Valores de amortiguamiento para cada frecuencia afectada. Fuente: Elaboración propia.

MODO	f (Hz)	ω (rad/s)	ξ (%)
1º Vertical	1,219	7,657	4,000
2º Vertical	1,659	10,245	3,638
3º Vertical	2,467	15,500	3,684
4º Vertical	3,148	19,780	4,000

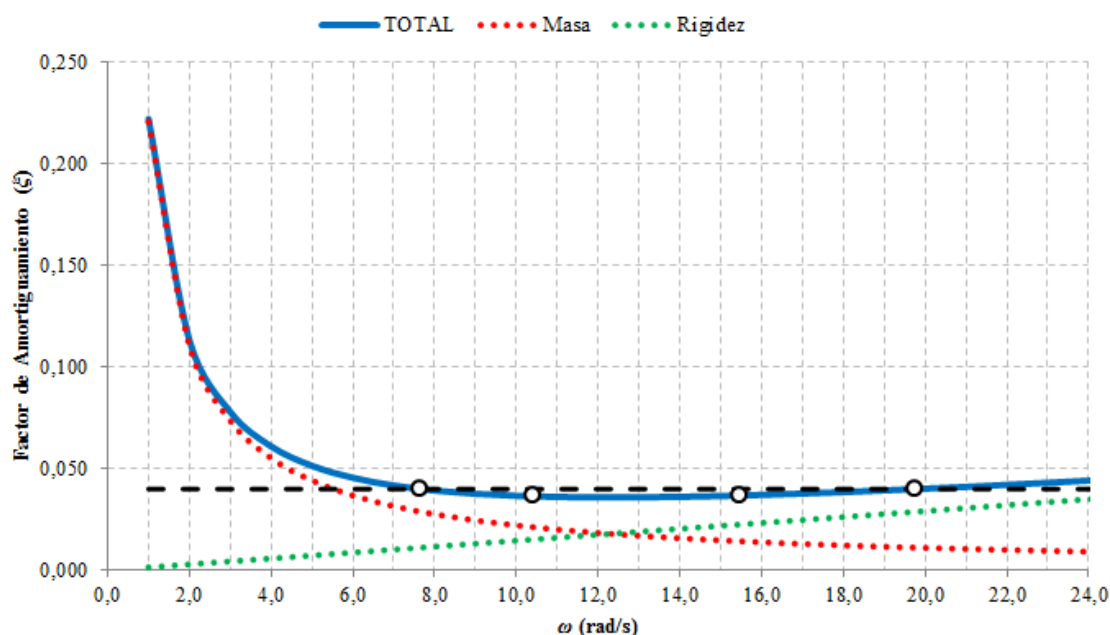


Figura 6.1. Función de amortiguamiento de Rayleigh definida. Fuente: Elaboración propia.

6.2 ANÁLISIS DE LA PASARELA FRENTE A UN SISMO

En el presente apartado se describen las claves de la generación de la señal sísmica a través del programa desarrollado en el presente TFM, SimulAcel©, así como la descripción de la señal generada para el análisis. Posteriormente, se abordan los aspectos necesarios para definir el tipo de análisis comentado en el apartado anterior. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos tras la aplicación de la carga sísmica a la estructura.

6.2.1 GENERACIÓN DEL ACELEROGRAMA SÍSMICO

La señal sísmica a partir de la cual se realizará el estudio se ha obtenido a partir del programa SimulAcel©, programa desarrollado en el presente TFM con el objetivo de establecer una herramienta rápida y sencilla para la generación de señales sísmicas artificiales.

Para la definición del acelerograma que caracteriza el sismo de cálculo se ha partido del espectro de respuesta definido en la NCSP-07. La pasarela suspendida se encuentra ubicada en el municipio de Zuheros, en el cual se da una aceleración sísmica básica a_b de $0,07 \cdot g$ y un coeficiente de uniformidad K de 1 (ver **Figura 6.2**). Al tratarse de una construcción de importancia normal, el factor de importancia γ_i toma un valor de 1, habiéndose elegido un período de retorno P_r de 500 años y un tipo de sismo último. Para el terreno, a falta de datos contrastados se ha considerado que es de Tipo I, con lo que el coeficiente de terreno adopta un valor de 1. Finalmente, el factor de amortiguamiento ζ de la estructura se ha tomado igual al 4% (de acuerdo a la NCSP-07 para puentes de acero bajo la acción del sismo último de cálculo). Con todos estos datos, se ha obtenido el espectro en aceleraciones que se muestra en la **Figura 6.3** y un valor de la aceleración máxima o aceleración de cálculo a_c igual a $0,38 \text{ m/s}^2$. Estos valores se corresponden con la componente vertical del sismo, que será la analizada en el presente caso práctico por estar el modelo de cálculo mejor calibrado en dirección vertical.



Figura 6.2. Situación de la pasarela en el mapa sísmico de España. Fuente: (Fomento, 2008).

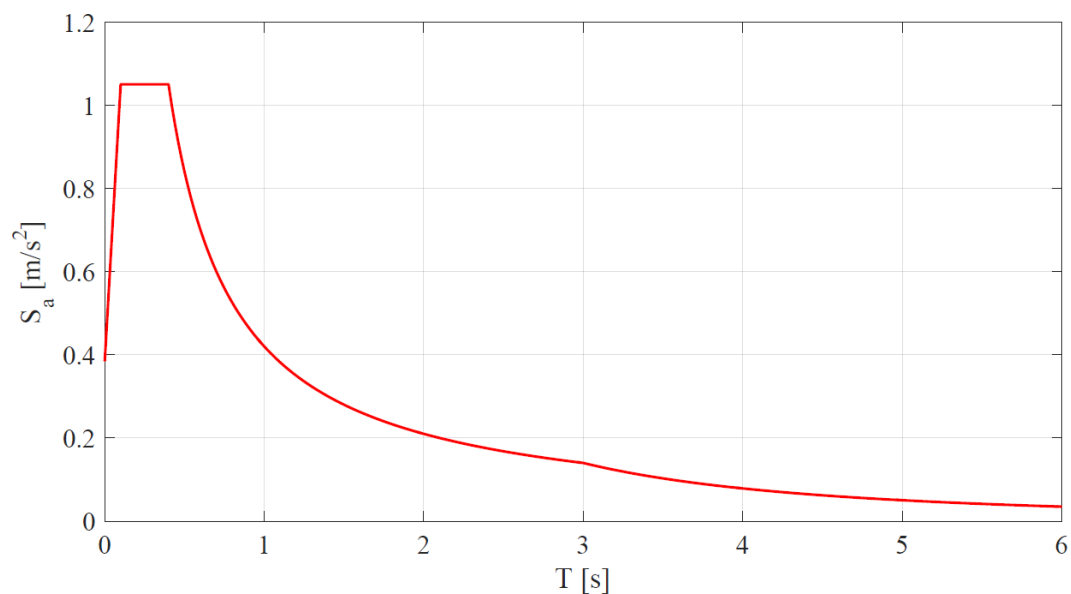


Figura 6.3. Espectro en aceleraciones obtenido en la localización de la pasarela peatonal objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para la generación de la señal artificial se ha adoptado una duración s de 30 segundos, y un incremento de tiempo dt de 0,01 segundos, lo que determina un total de 3000 valores de aceleración. La función de intensidad elegida, a falta de datos contrastados sobre la forma de los sismos que se dan en la zona, ha sido de tipo exponencial ($\alpha = 0,1$ y $\beta = 0,2$), según se muestra en la **Figura 6.4**. Finalmente, la simulación se ha realizado estipulando un número máximo de 10 iteraciones y un error relativo máximo admisible del 10%, aplicando los ajustes de línea de base, de pico del acelerograma y de la respuesta espectral.

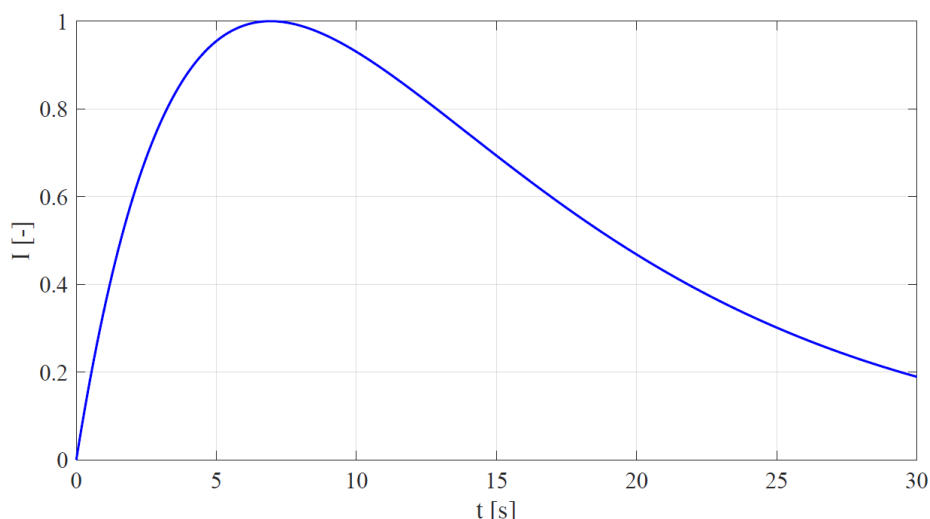


Figura 6.4. Función de intensidad utilizada para la modulación de la señal sísmica empleada en el análisis de la pasarela suspendida en Zuheros. Fuente: Elaboración propia.

El acelerograma finalmente generado es el mostrado en la **Figura 6.5**. En él se ha obtenido una aceleración máxima de $0,38 \text{ m/s}^2$, lo que se ajusta al valor de cálculo definido en el espectro de referencia. Por otro lado, la duración significativa de la señal es de 20,36 s, valor por encima del límite establecido en la NCSP-07 para un sismo último de cálculo en Andalucía y un coeficiente K igual a 1 (como mínimo, 20 s de duración significativa).

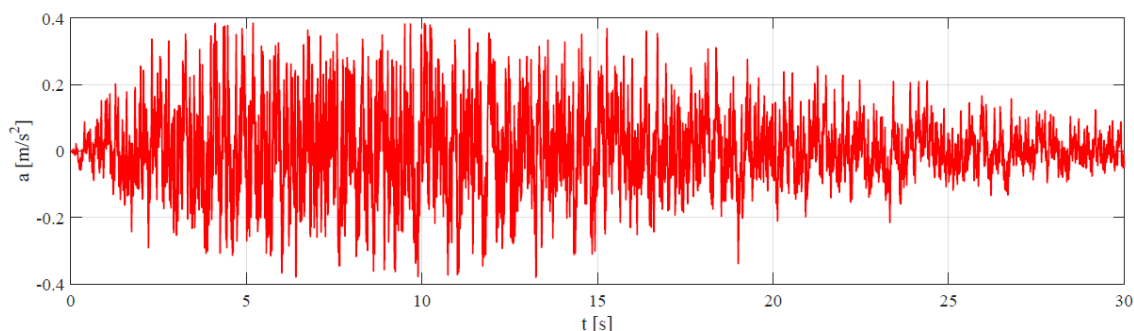


Figura 6.5. Acelerograma sísmico en dirección vertical obtenido para el análisis de la pasarela suspendida en Zuheros. Fuente: Elaboración propia.

El ajuste de la respuesta espectral se ha conseguido en 4 iteraciones, alcanzando un error relativo medio de 9,62% (por debajo del límite establecido de 10%). La bondad de dicho ajuste se puede observar en la **Figura 6.6**.

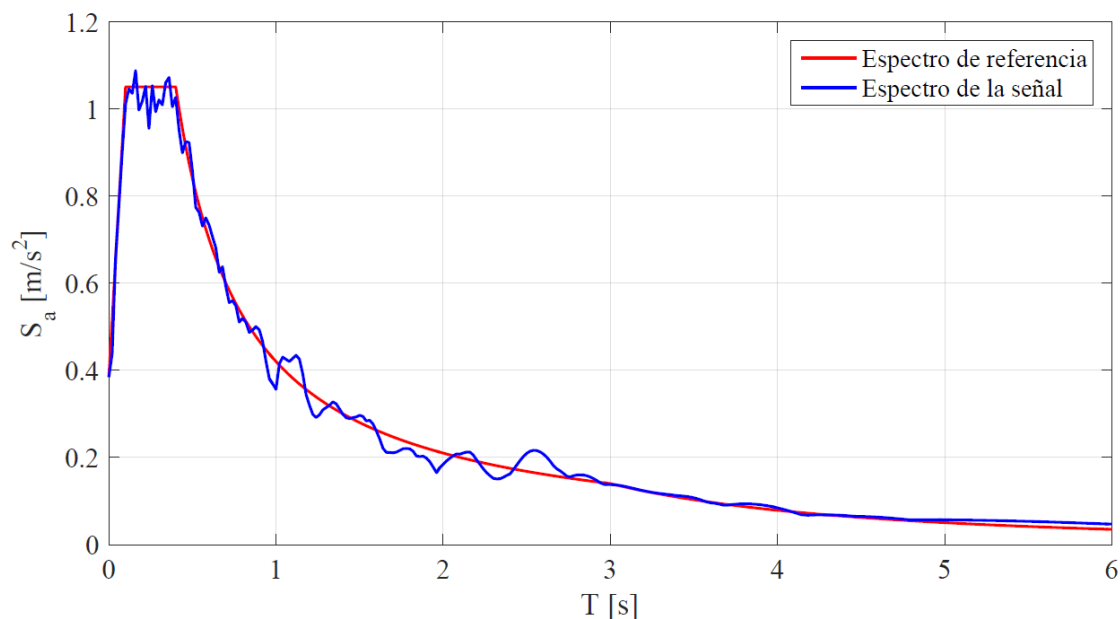


Figura 6.6. Ajuste de la respuesta espectral del acelerograma sísmico obtenido para el análisis de la pasarela suspendida en Zuheros. Fuente: Elaboración propia.

6.2.2 MODELIZACIÓN DEL SISMO EN ANSYS

Obtenido el acelerograma que caracteriza el sismo al que será sometida la pasarela objeto de análisis, el siguiente paso es la introducción de dicha carga sísmica en el modelo numérico de elementos finitos elaborado en ANSYS.

La forma elegida en la presente aplicación ha sido la introducción de los valores de aceleración en los puntos de apoyo de la estructura sobre el terreno. En total, se tienen 12 puntos en los que se tendrá una aceleración prescrita de acuerdo a la señal generada (ver **Figura 6.7**): apoyo de vigas verticales de los extremos (4 puntos) y anclaje de cables longitudinales (8 puntos). Debido al tamaño de la estructura, y a su situación sobre el mismo tipo de terreno, no se ha planteado necesario la definición de acelerogramas diferentes para cada extremo de la pasarela.

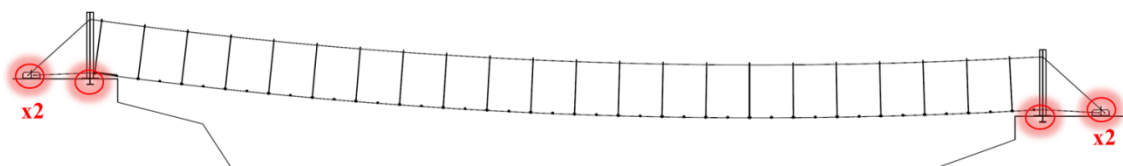


Figura 6.7. Puntos de introducción del acelerograma sísmico en la pasarela en un lateral (simétrico para el otro lateral). Fuente: Elaboración propia.

6.2.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos de la aplicación del acelerograma sísmico a la pasarela objeto de estudio se han analizado desde dos puntos de vista diferentes. Por un lado, se ha evaluado el comportamiento dinámico de la pasarela, con objeto de ver el tipo de movimiento que ésta desarrolla durante el episodio sísmico y los modos de vibración de la misma que se ven excitados. Por otro lado, se ha realizado una comprobación resistente de los elementos más representativos de la pasarela: los cables de acero.

6.2.3.1. Análisis dinámico

Tras la aplicación de la carga sísmica a la pasarela objeto de estudio, el primer paso ha consistido en el análisis del movimiento que ésta desarrolla a lo largo del tiempo que dura el terremoto. A tal efecto, se han obtenido las aceleraciones verticales de los puntos centrales del tablero de la pasarela a lo largo de toda su longitud, las cuales se representan gráficamente, en función del tiempo y de la situación, en la **Figura 6.8**. Del análisis de dicha figura se puede concluir lo siguiente:

- Las máximas aceleraciones, tanto positivas como negativas, se dan en los puntos del tablero situados entre 5 m y 10 m desde las vigas verticales de los extremos.
- Estos valores máximos se dan en el período de tiempo comprendido entre los 3 s y los 12 s, aproximadamente, desde el inicio del sismo. Esto se corresponde con el momento en el que el sismo desarrolla una mayor intensidad, tal y como se estableció mediante la función de intensidad (ver **Figura 6.4**).

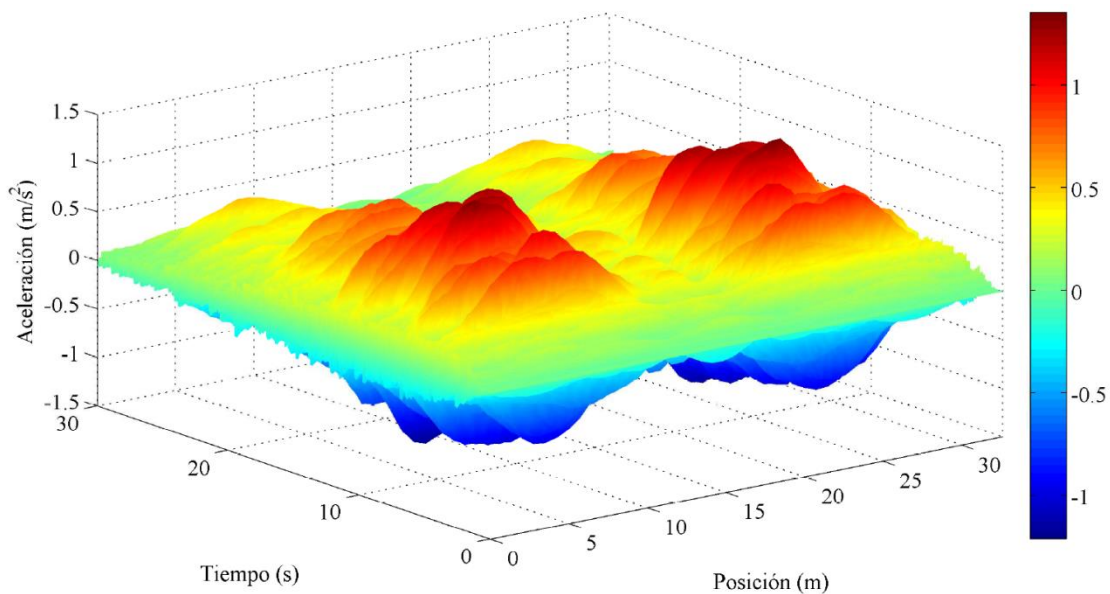


Figura 6.8. Aceleraciones verticales del tablero según la posición y el tiempo debidas a la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.

Analizando los valores obtenidos en el centro de vano (ver **Figura 6.9**), se comprueba que se produce una cierta amplificación de la aceleración con respecto al valor que marca el acelerograma, mostrado anteriormente en la **Figura 6.5**. Así, la aceleración máxima absoluta en el centro de vano es de $0,76 \text{ m/s}^2$, mientras que el acelerograma del terreno marca una aceleración máxima de $0,38 \text{ m/s}^2$.

Si se realiza el mismo análisis, pero en este caso para uno de los puntos en los que se producen los picos de aceleración (ver **Figura 6.10**), la amplificación de la aceleración llega hasta valores absolutos de $1,28 \text{ m/s}^2$.

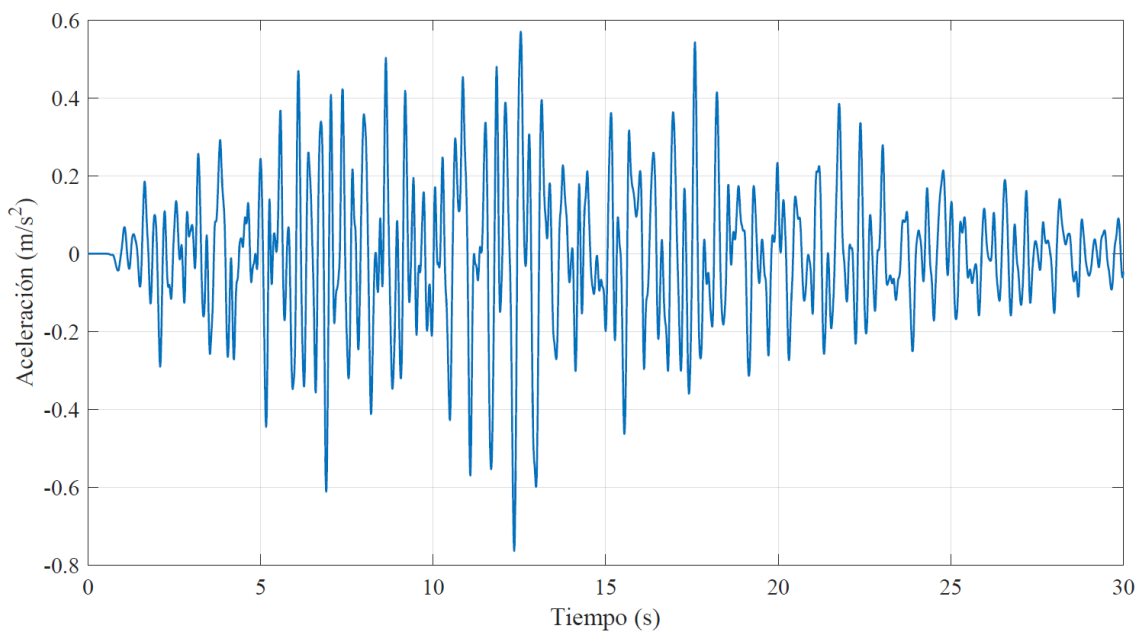


Figura 6.9. Evolución de la aceleración con el tiempo en el centro de la pasarela bajo la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.

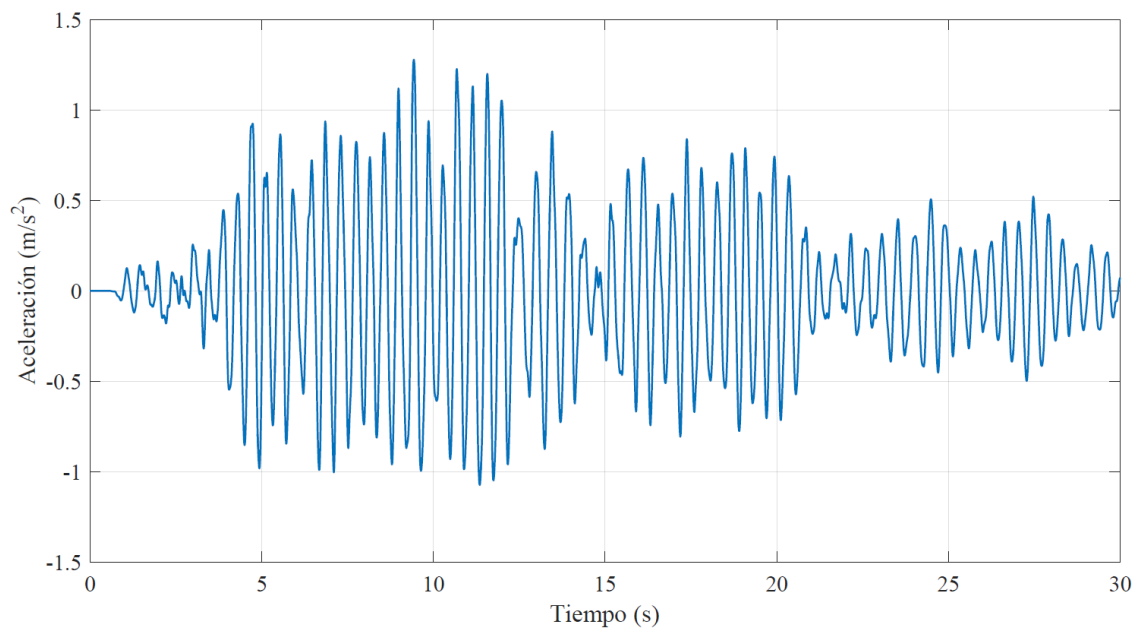


Figura 6.10. Evolución de la aceleración con el tiempo en el punto de máxima aceleración bajo la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, resulta interesante realizar un estudio sobre los modos de vibración de la pasarela que se ven excitados durante el episodio sísmico. Para ello, se ha realizado la transformada de Fourier (FFT) de los registros de aceleración mostrados en las dos gráficas anteriores. Del estudio de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- En centro de vano se excitan, prioritariamente, el 2º y el 4º modo vertical, con frecuencias de 1,66 Hz y 3,15 Hz, respectivamente (ver **Figura 6.11**). En ambos casos, se trata de modos donde el punto de centro de vano se corresponde con el punto de mayor valor modal.

- En la zona donde se producen los mayores valores de aceleración el modo excitado de forma prioritaria es el 3° vertical, con una frecuencia de 2,47 Hz (ver **Figura 6.12**). Este modo posee un valor modal nulo en centro de vano, por lo que es lógico que no se vea excitado en dicho punto.

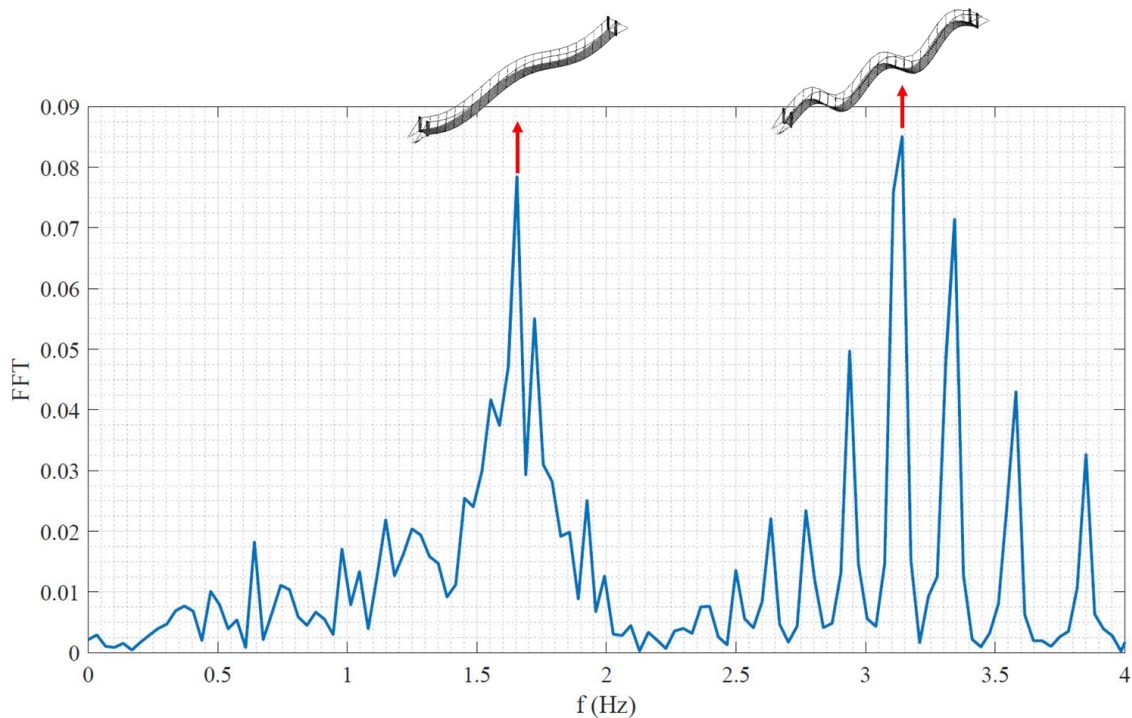


Figura 6.11. Transformada de Fourier del registro de aceleraciones debidas a la acción sísmica en el punto correspondiente al centro de vano. Fuente: Elaboración propia.

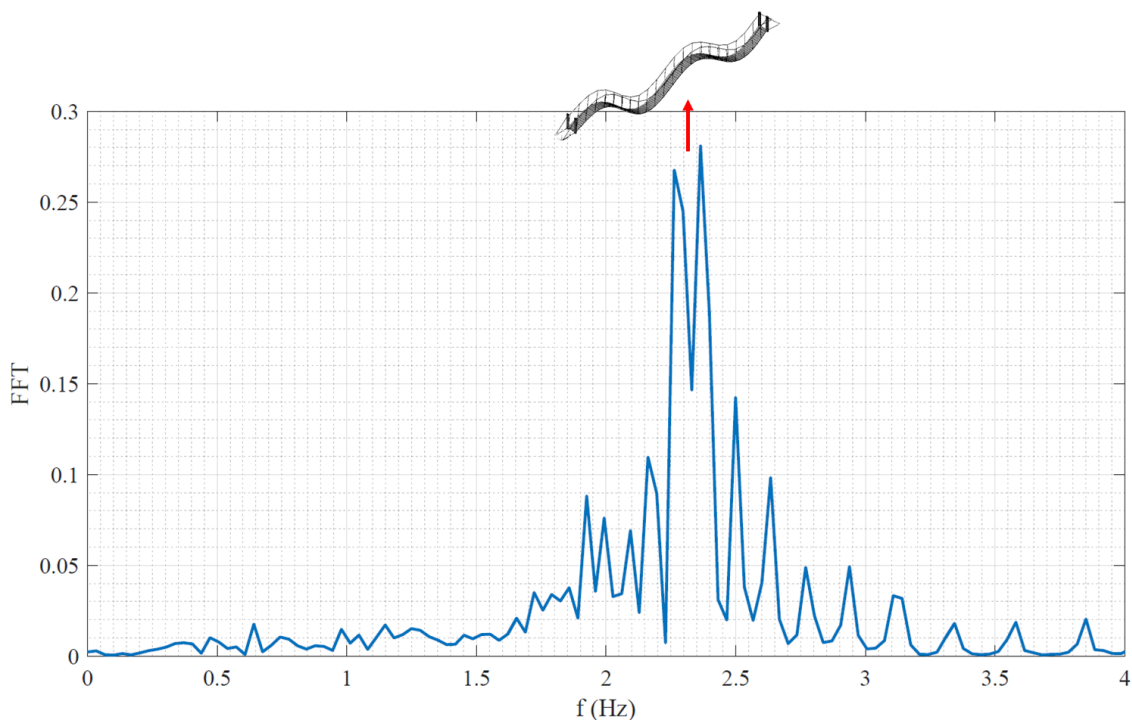


Figura 6.12. Transformada de Fourier del registro de aceleraciones debidas a la acción sísmica en el punto correspondiente al máximo valor de aceleración. Fuente: Elaboración propia.

6.2.3.2. Análisis resistente

Después del análisis del movimiento de la pasarela durante el terremoto, también resulta de interés la comprobación resistente de los elementos principales de la pasarela: los cables. Para ello, será necesario obtener la carga en los mismos de acuerdo a la combinación de cálculo que establezca la normativa pertinente.

Para el caso de pasarelas peatonales, es de aplicación la IAP-11 (Fomento, 2011), en la cual se establece, para comprobaciones resistentes en estado límite último y en situación sísmica, la siguiente combinación de cargas:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} G_{k,m}^* + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + A_{Ed} \quad (6.12)$$

Dónde:

- $G_{k,j}$ es el valor representativo de cada acción permanente.
- $G_{k,m}^*$ es el valor representativo de cada acción permanente de valor no constante.
- $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ es el valor casi-permanente de la sobrecarga de uso.
- A_{Ed} es el valor de cálculo de la acción sísmica.

En el presente caso de aplicación la única acción permanente sobre la pasarela es el peso propio de la misma. Por otro lado, la NCSP-07 (Fomento, 2008) establece que en pasarelas peatonales se puede despreciar la acción de la sobrecarga de uso en situación sísmica. Finalmente, a modo de simplificación, no se considerarán acciones permanentes de valor no constante.

Por lo tanto, la combinación de carga para la comprobación de los cables de la pasarela se obtiene como suma de la acción del peso propio y de la acción sísmica, sin coeficientes amplificadores. Esta es, justamente, la forma de cálculo que se ha establecido en el modelo, puesto que al tratarse de un caso estructural no lineal es necesario considerar las diferentes acciones de forma conjunta.

Los cables son elementos concebidos para que desarrollen un comportamiento estructural únicamente a tracción (no a compresión ni a flexión); a tal efecto, el esfuerzo predominante en los mismos es el axil. En primer lugar se ha obtenido el estado tensional de los cables de la pasarela antes de la aplicación de la acción sísmica, es decir, únicamente ante la acción del peso propio; los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 6.13**, donde se observa que todos los cables se encuentra en tracción y que los valores máximos se dan en los cables de la parte baja. Por otro lado, el valor máximo de axil obtenido es de 42.420,8 N (para la sección del modelo, que es equivalente a dos cables de 24 mm), valor que varía según la parte del cable considerada.

Posteriormente se ha comprobado que los cables permanecen en tracción durante todo el episodio de carga sísmica, asegurando así que la estructura no pierde su estado de equilibrio; la comprobación a tal efecto ha sido satisfactoria, mostrándose un ejemplo justificativo en la **Figura 6.14**, en la que aparece el esfuerzo axil en uno de los cables de la parte baja de la pasarela (siempre positivo, es decir, siempre en tracción).

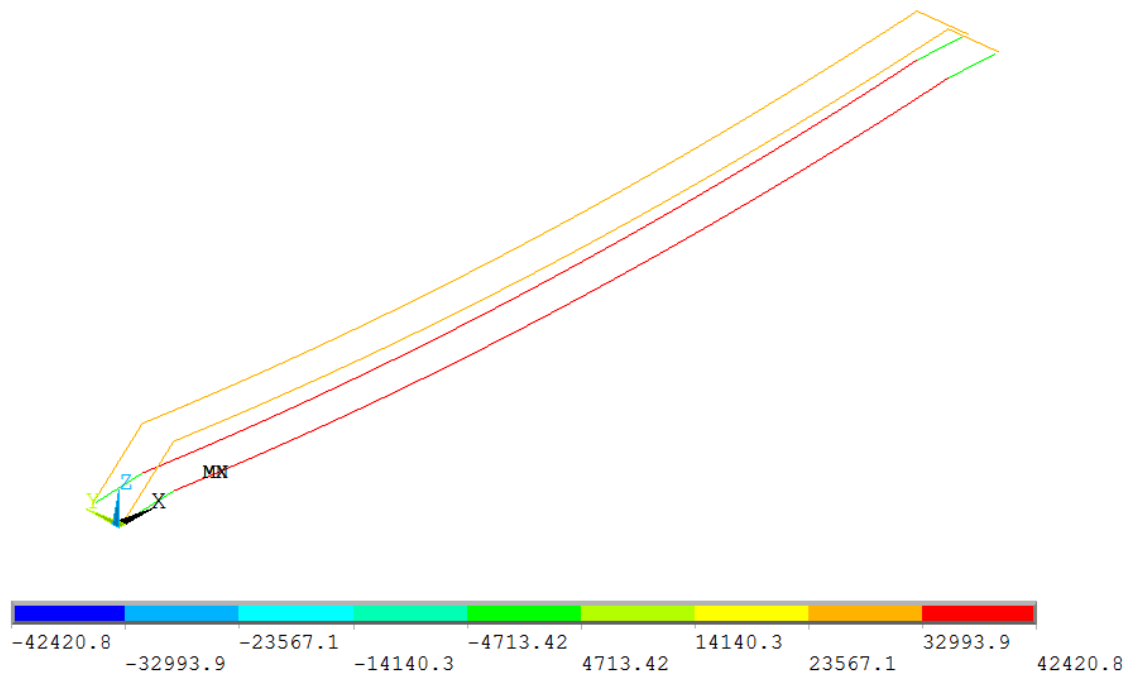


Figura 6.13. Axiles en los cables para peso propio (unidades en N). Fuente: Elaboración propia.

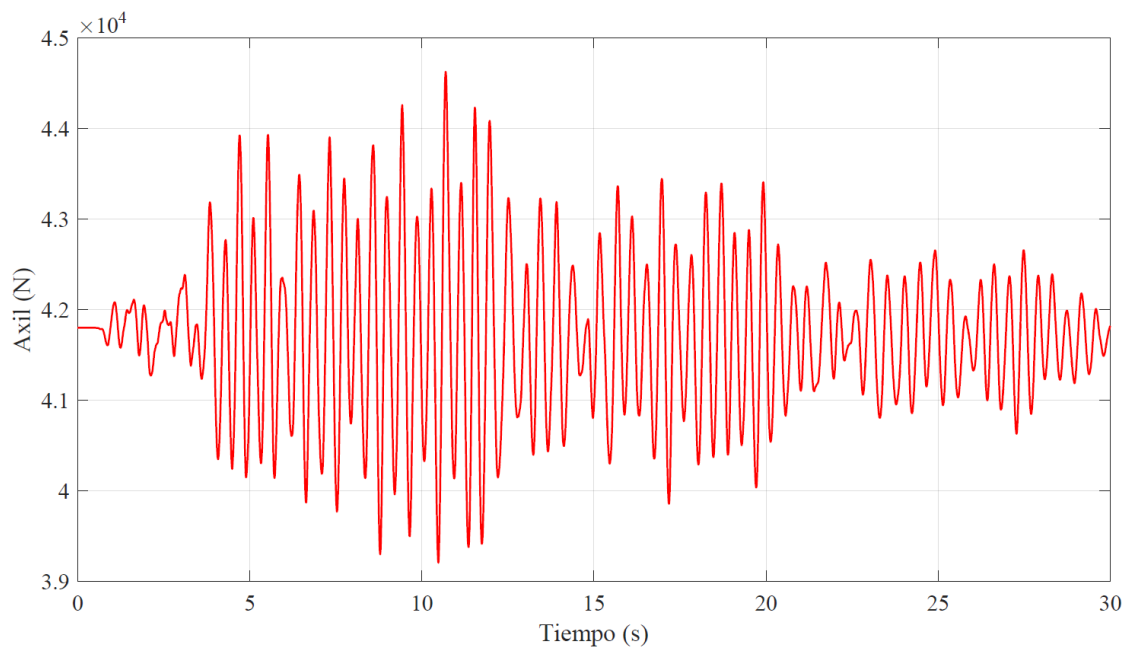


Figura 6.14. Historia de axiles en uno de los cables de la pasarela debida a la acción sísmica. Fuente: Elaboración propia.

El valor de axil máximo obtenido afecta, en el modelo estructural desarrollado, a una sección en la que se modelizan, como simplificación, dos cables; así, el valor que deberá resistir cada cable será la mitad del obtenido en el modelo de cálculo. En la **Tabla 6.2** se muestran los axiles máximos y mínimos obtenidos tras la aplicación del sismo, comprobándose que los valores no son demasiado elevados en comparación con el axil asociado al peso propio de la estructura (en torno a 20.000 N por cable, según la zona considerada).

Tabla 6.2. Valores extremos de axil en un único cable de la parte baja de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.

AXIL (N)	Sólo Peso Propio	Peso Propio + Sismo
Máximo	22.608	21.067
Mínimo	18.151	19.458

Conocido el esfuerzo en el cable, y puesto que el diámetro del mismo es de 24 mm, es inmediato conocer la tensión σ en el mismo según la siguiente expresión:

$$\sigma_{CABLE} = \frac{N}{A} \quad (6.13)$$

Dónde N es el axil calculado y A es el área de la sección.

De esta forma, considerando el axil máximo (22.608 N) para realizar la comprobación resistente de la sección, la tensión obtenida es de **50 N/mm²**, valor mucho menor a la tensión típica admisible en este tipo de cables (1.400 – 1.800 N/mm²). Así, de acuerdo a los resultados obtenidos, **la pasarela tiene capacidad resistente suficiente para resistir la acción del sismo vertical utilizada en el análisis.**

6.3 ANÁLISIS DE LA PASARELA FRENTE A FUERZAS DE VIENTO

En el presente apartado se describen las claves de la generación de la señal de velocidad de viento turbulento a través del programa desarrollado en el presente TFM, WindMaker©, así como la descripción de la señal generada para el análisis. Posteriormente, se abordan los aspectos necesarios para definir el análisis transitorio no lineal comentado anteriormente. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos tras la aplicación de la carga de viento a la estructura.

6.3.1 GENERACIÓN DE LA HISTORIA DE VELOCIDADES DE VIENTO

La señal de viento a partir de la cual se realizará el estudio se ha obtenido mediante el programa WindMaker©, programa desarrollado en el presente TFM con el objetivo de establecer una herramienta rápida y sencilla para la generación de señales de viento turbulento aleatorias.

La definición de las características del campo de viento se ha realizado de acuerdo a la IAP-11 (Fomento, 2011). A tal efecto, la pasarela objeto de estudio se encuentra situada en la Zona A establecida por la IAP-11 (ver **Figura 6.15**), con lo que la velocidad básica fundamental del viento en el entorno es de 26 m/s; tomando el factor direccional y el factor estacional igual a 1, así como un período de retorno de 20 años, la velocidad básica del viento en la zona es de 24,6 m/s. El entorno elegido se corresponde con el entorno Tipo II según la IAP-11, con lo que se obtienen los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} k_r &= 0,190 \\ z_0 &= 0,05 \text{ m} \\ z_{min} &= 2 \text{ m} \end{aligned}$$

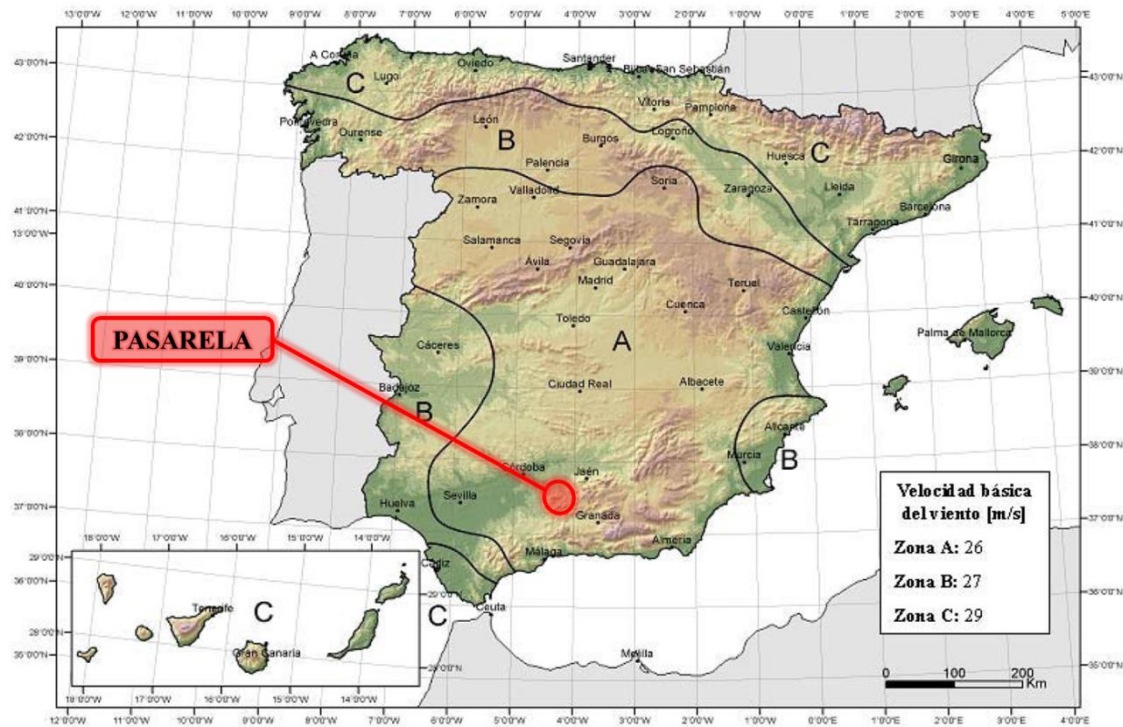


Figura 6.15. Situación de la pasarela en el mapa de zonas de viento de la IAP-11. Fuente: (Fomento, 2011).

Para la realización del análisis se supondrá que la dirección media del viento es perpendicular al eje longitudinal de la pasarela, según lo mostrado en la **Figura 6.16**. Con objeto de no crear un dominio de cálculo complicado en el que fuera necesaria la utilización de un software de dinámica de fluidos, se ha considerado que no existen obstáculos que afecten al campo de viento en las inmediaciones de la misma, definiendo el dominio mostrado en la **Figura 6.16**; en dicha figura también aparecen los puntos considerados para el cálculo de la señal (10 puntos, con objeto de dividir la pasarela en dicho número de tramos), todos ellos correspondientes al punto medio de la solera de la pasarela.

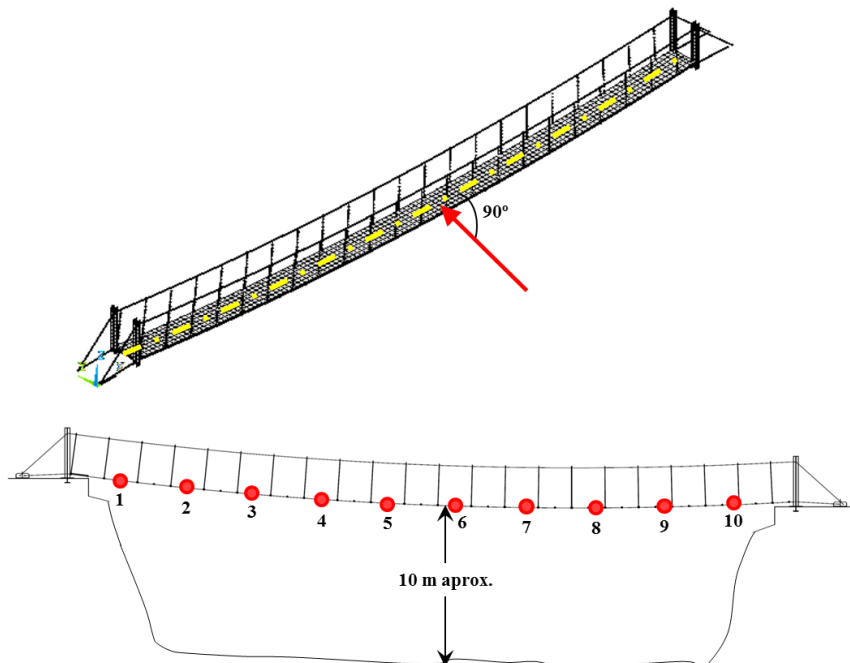


Figura 6.16. Incidencia del viento sobre la pasarela (arriba) y puntos considerados en el cálculo de la velocidad del viento (abajo). Fuente: Elaboración propia.

Con las consideraciones expuestas y en los puntos señalados, se han obtenido los parámetros mostrados en la **Tabla 6.3**, los cuales marcan las características del campo de viento turbulento en la zona de estudio. Se puede comprobar que los parámetros expuestos son muy similares para todos los puntos, fundamentalmente porque la altura de los mismos es similar.

Tabla 6.3. Características del campo de viento turbulento en las inmediaciones de la pasarela. Fuente: Elaboración propia.

PUNTO	y (m)	z (m)	v _m (m/s)	I _u (%)	I _v (%)	I _w (%)	^x L _u (m)	^x L _v (m)	^x L _w (m)
1	3,93	9,98	24,76	18,88	16,61	10,38	67,43	19,87	3,49
2	7,20	9,64	24,59	19,01	16,73	10,45	66,60	19,53	3,37
3	10,46	9,28	24,41	19,15	16,85	10,53	65,72	19,18	3,25
4	13,72	9,05	24,30	19,24	16,93	10,58	65,15	18,95	3,17
5	16,99	8,87	24,21	19,31	16,99	10,62	64,70	18,78	3,11
6	20,25	8,73	24,13	19,37	17,05	10,65	64,33	18,63	3,05
7	23,51	8,67	24,10	19,40	17,07	10,67	64,18	18,57	3,03
8	26,78	8,67	24,10	19,40	17,07	10,67	64,19	18,57	3,03
9	30,04	8,73	24,13	19,37	17,05	10,65	64,34	18,63	3,06
10	33,30	8,85	24,19	19,32	17,00	10,63	64,63	18,75	3,10

Tras la definición de las características básicas del campo de viento, se ha definido el espectro de referencia de la turbulencia del mismo; para ello se ha elegido un Δf de 0,001 Hz y una frecuencia máxima de 3 Hz. De esta forma se generan 30 espectros diferentes (tres para cada punto, uno por componente); debido a las características del dominio de cálculo, los espectros obtenidos son muy similares. Como datos para la función de coherencia se han tomado los valores de $C_x = 8$, $C_y = 16$ y $C_z = 10$ (Hong, 2009), si bien se trata de coeficientes experimentales que en casos de cálculo más exhaustivos deberían ser obtenidos mediante ensayos.

Para la generación de la señal de viento turbulento se ha utilizado un Δt de 0,01 s, valor consecuente con las necesidades del cálculo dinámico que se expusieron en el apartado 6.1.2. El tiempo total de la señal simulada es de 600 s. Con objeto de ilustrar el buen grado de ajuste obtenido en la generación respecto a los espectros de referencia, se muestra en la **Figura 6.17**, a modo de ejemplo, el ajuste de los espectros de la señal generada en el punto 1.

Para el resto de parámetros que marcan la bondad de las señales generadas se han obtenido, de forma tendencial, los siguientes valores:

- **Intensidad de turbulencia:** para las componentes longitudinal y lateral se han obtenido aproximaciones con un error menor al 1% en todos los casos (normalmente errores del 0,5%); sin embargo, la componente vertical posee un grado de error algo superior al 1%.
- **Curtosis:** adquiere valores, en la mayoría de los casos, inferiores a 0,10 (muy cercano a la distribución normal), si bien existen valores puntuales que superan la cifra de 0,20, llegando incluso a 0,50.
- **Asimetría:** aporta valores similares a los obtenidos para el coeficiente de curtosis, por lo que muestra una cercanía a la distribución normal tomada como hipótesis.

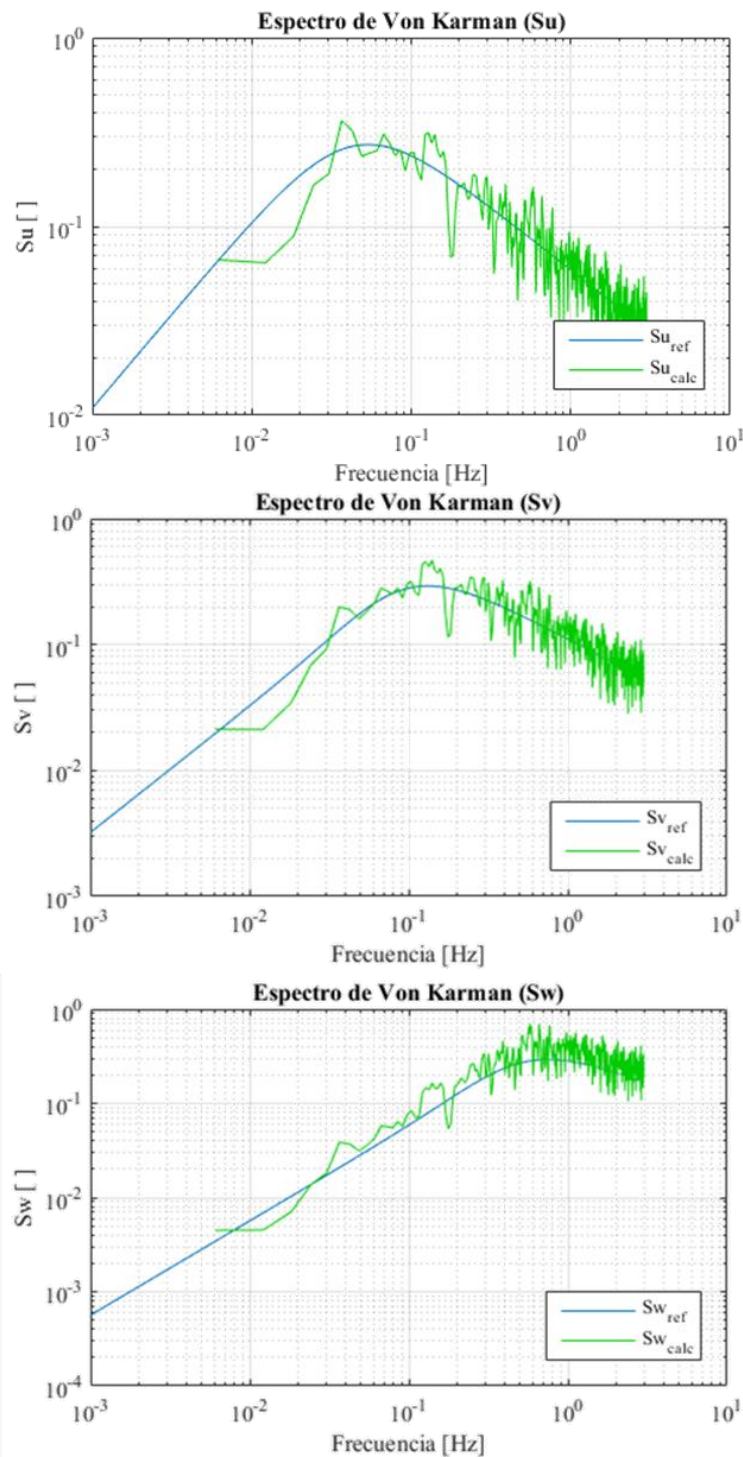


Figura 6.17. Ajuste de los espectros obtenidos para la señal de viento generada en el punto 1 del dominio de cálculo establecido para la pasarela. Fuente: Elaboración propia.

Como se verá posteriormente en el apartado 6.3.2, las hipótesis que se han tomado para la realización del análisis dinámico de la pasarela frente a la acción del viento implican que solo sea necesaria la serie de viento turbulento en la componente longitudinal. A tal efecto, en la **Figura 6.18** se muestran las series obtenidas para dicha componente en los puntos del dominio.

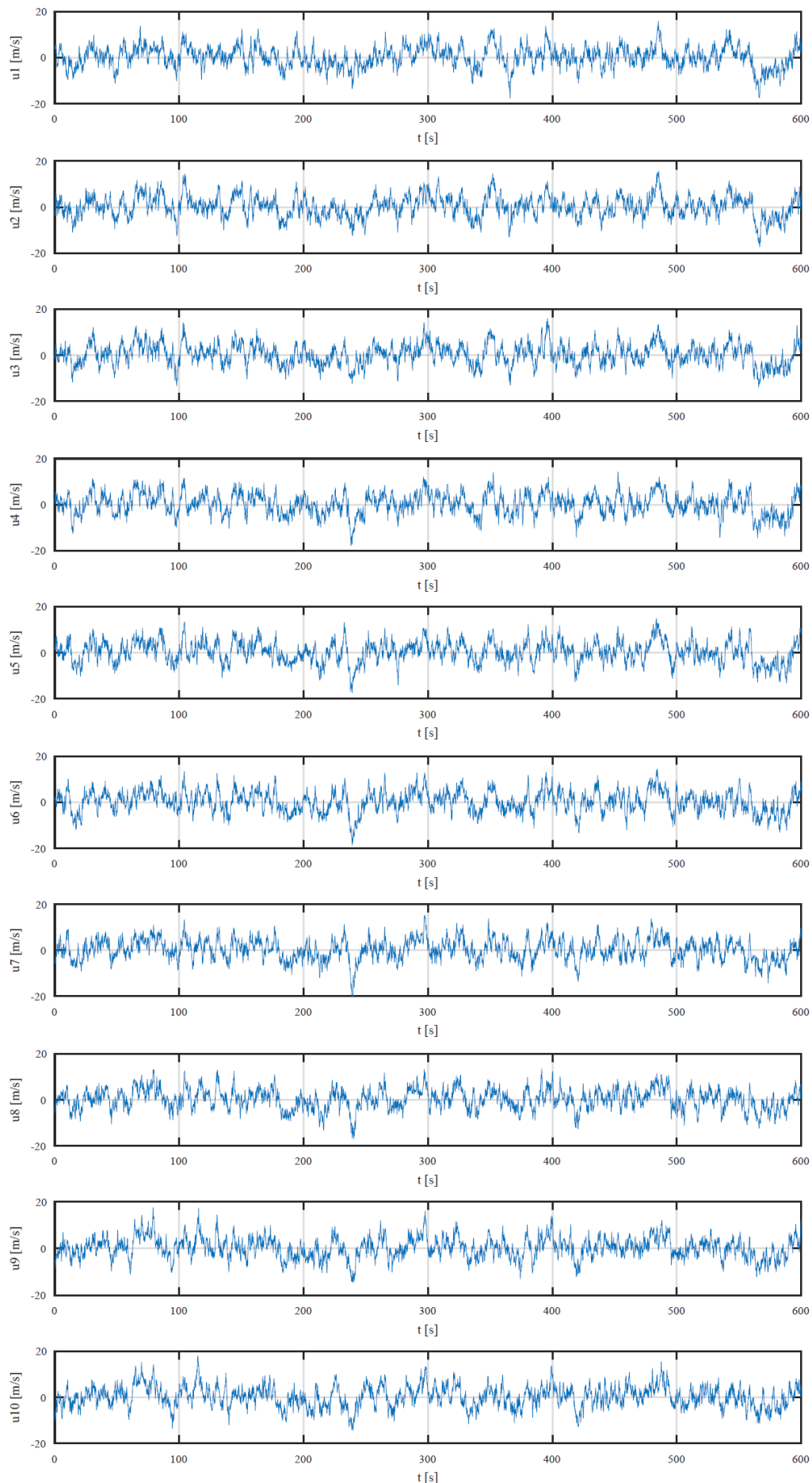


Figura 6.18. Series de velocidad longitudinal turbulenta en los puntos del dominio. Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 TRANSFORMACIÓN EN CARGAS EQUIVALENTES DE VIENTO

Para la definición de las cargas equivalentes de viento una vez se ha obtenido la historia de viento turbulento en distintos puntos de la estructura se ha utilizado lo expuesto en el apartado 4.8.1. Puesto que únicamente se utilizará la carga de levantamiento del viento en este caso de aplicación, el coeficiente necesario para el cálculo es el coeficiente de levantamiento, C_L , el cual se ha tomado con un valor de 0,9 (Fomento, 2011). Dicho coeficiente se ha tomado, a modo de simplificación, constante con respecto al ángulo de incidencia del viento, puesto que definir la función del mismo requeriría la realización de ensayos en túnel de viento (aspecto totalmente fuera del ámbito del presente proyecto); esta consideración supone que la derivada de dicho coeficiente sea nula, por lo que el cálculo se simplifica a lo mostrado en la siguiente expresión, que únicamente depende de la componente longitudinal del viento turbulento:

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot C_L + \rho \cdot U \cdot C_L \cdot u(t) \quad \text{en N/m}^2 \quad (6.14)$$

Dónde:

- ρ es la densidad del aire, igual a $1,25 \text{ kg/m}^3$ (Castro et al., 2015).
- U es la velocidad media del viento, en m/s.
- $u(t)$ es la componente longitudinal de la turbulencia del viento, en m/s.
- C_L es el coeficiente de levantamiento descrito anteriormente.

Así, se ha obtenido una historia de fuerzas de viento asociadas a cada punto, las cuales se pueden ver en la **Figura 6.20**.

6.3.3 MODELIZACIÓN DEL VIENTO EN ANSYS

La carga de viento obtenida en el apartado anterior se ha introducido en el tablero de la pasarela como carga aplicada por unidad de superficie. El área de influencia de cada uno de los puntos considerados y, por tanto, el área sobre la que se aplica la carga calculada, es la mostrada en la **Figura 6.19**.

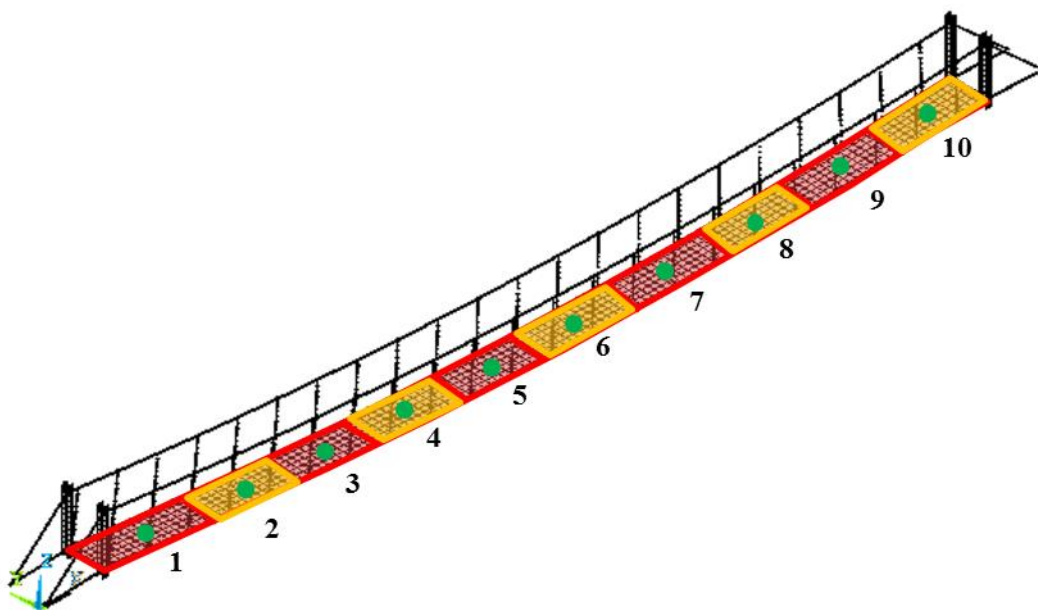


Figura 6.19. Puntos utilizados para el cálculo del viento y zona de influencia de los mismos en la pasarela.
Fuente: Elaboración propia.

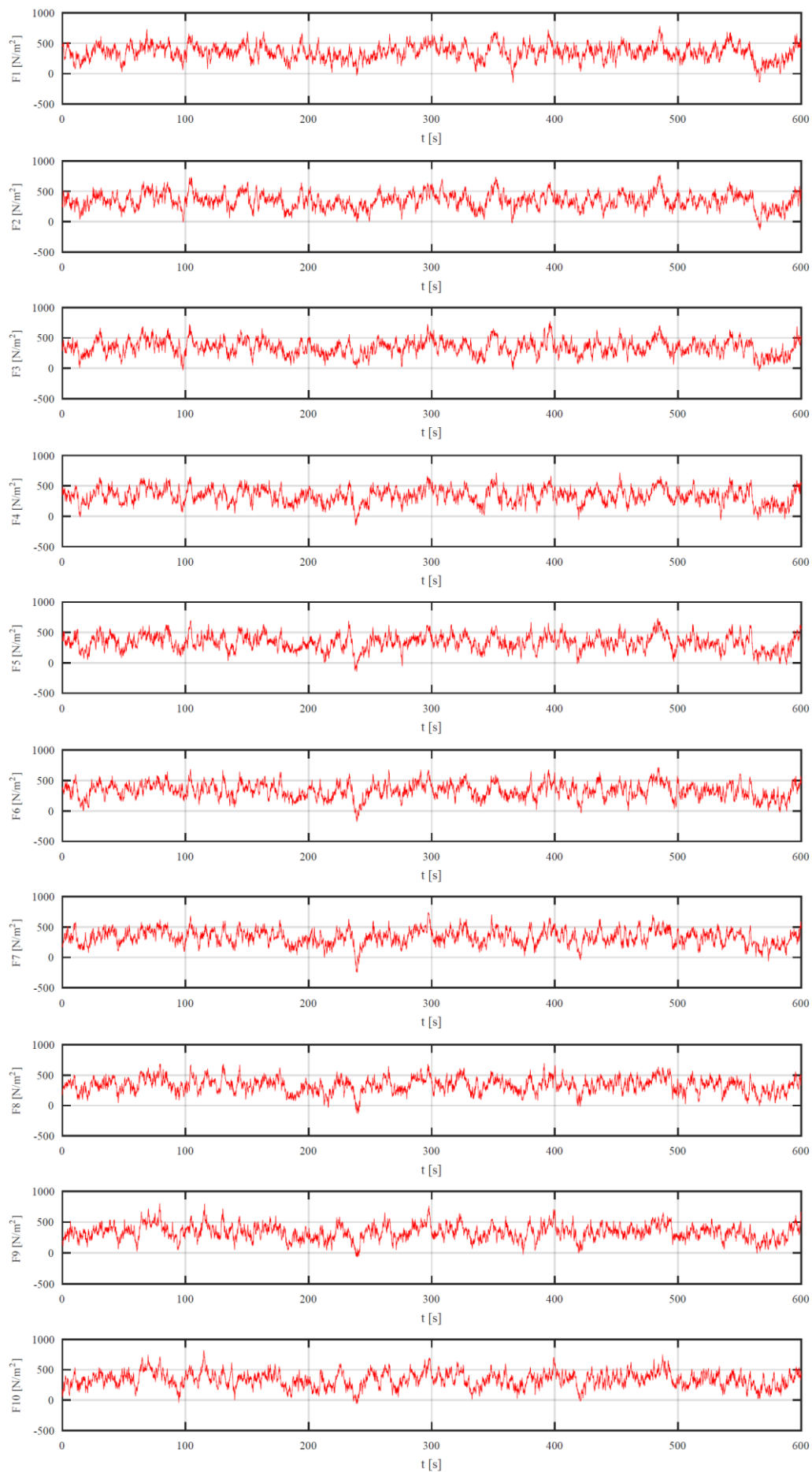


Figura 6.20. Series de fuerza del viento vertical sobre los puntos del dominio. Fuente: Elaboración propia.

6.3.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos de la aplicación de fuerzas de viento turbulento a la pasarela objeto de estudio se han analizado desde dos puntos de vista diferentes. Por un lado, se ha evaluado el comportamiento dinámico de la pasarela, con objeto de ver el tipo de movimiento que ésta desarrolla durante la acción del viento y los modos de vibración de la misma que se ven excitados. Por otro lado, se ha realizado una comprobación del tipo de confort que se tendría en la pasarela para los peatones que circulen por la misma durante el episodio de viento.

6.3.4.1. Análisis dinámico

De igual forma que se hizo en el análisis de los resultados tras someter la pasarela a la acción sísmica, se ha estudiado el movimiento de la pasarela tras la aplicación de las fuerzas de viento. A tal efecto, se han obtenido las aceleraciones verticales de los puntos centrales del tablero de la pasarela, las cuales se representan gráficamente, en función del tiempo y según su posición, en la **Figura 6.21**. Del análisis de dicha figura se puede concluir lo siguiente:

- El valor de aceleración máxima se produce en los primeros instantes de la simulación, en el cual se llega a una aceleración de 6 m/s^2 en algunos puntos de la pasarela.
- Durante el resto del episodio de viento, los valores de aceleración oscilan entre valores de 4 m/s^2 y -4 m/s^2 , aproximadamente.
- Los valores de aceleración obtenidos son similares en todos los puntos de la pasarela, dándose valores ligeramente superiores en la parte derecha de la misma, probablemente debido a la mayor turbulencia existente dada su menor cota.

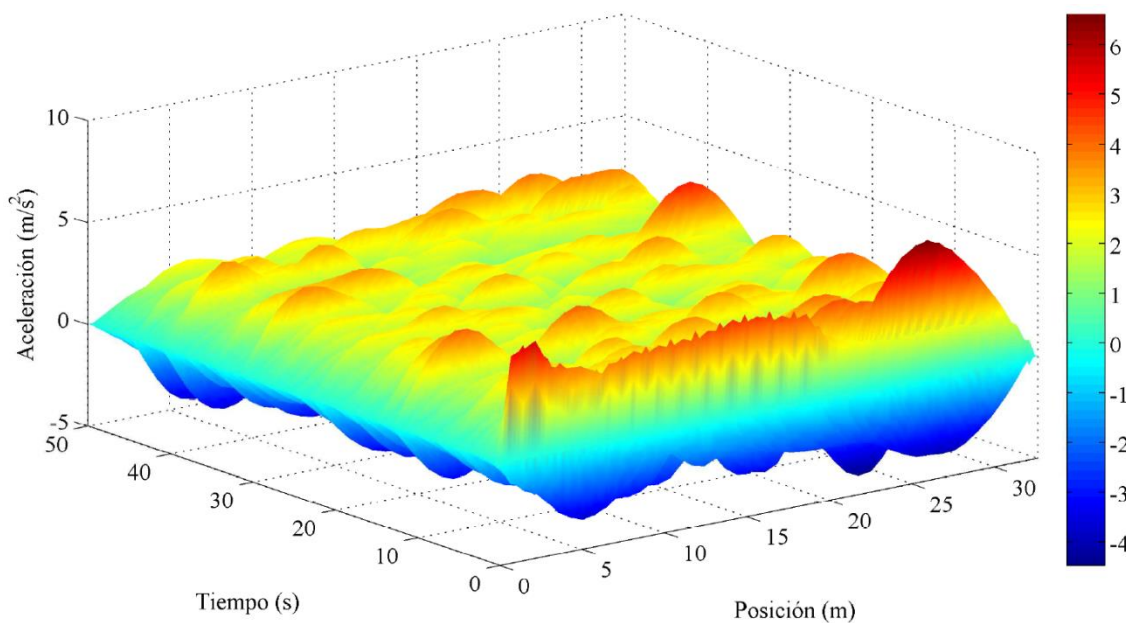


Figura 6.21. Aceleraciones verticales del tablero según la posición y el tiempo debidas a la acción del viento.
Fuente: Elaboración propia.

Analizando los valores de aceleración únicamente respecto al tiempo, se puede comprobar fácilmente lo expuesto en los dos primeros puntos de los tres descritos anteriormente. Para ello, se muestra en la **Figura 6.22** la envolvente de aceleraciones de todos los puntos de la pasarela respecto al tiempo.

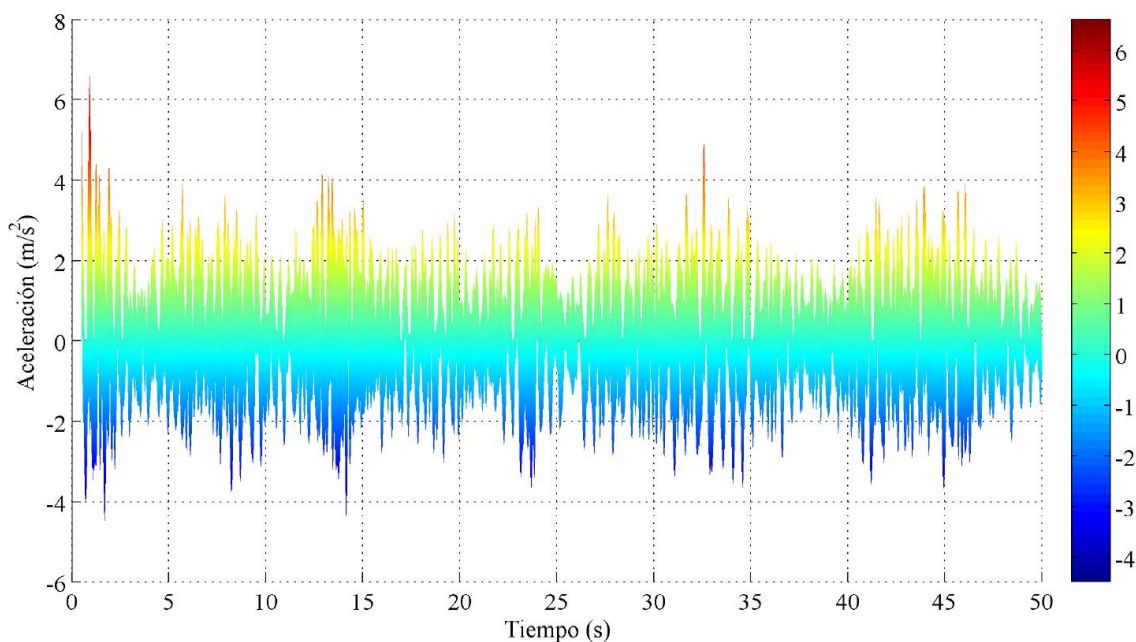


Figura 6.22. *Envolve de aceleraciones en el tablero de la pasarela respecto al tiempo debidas a la acción del viento. Fuente: Elaboración propia.*

Por otro lado, resulta interesante realizar un estudio sobre los modos de vibración de la pasarela que se ven excitados durante el episodio de viento. Para ello, se ha realizado la transformada de Fourier (FFT) de los registros de aceleración, comprobándose que no hay un modo de vibración de la estructura original (sin carga aplicada, únicamente a peso propio) que se vea excitado de forma predominante. Este hecho se debe a la naturaleza no lineal de la estructura, en la cual las frecuencias de vibración naturales de la pasarela son sensibles a los cambios de tensión de la misma; en definitiva, la acción del viento puede provocar un cambio en las características dinámicas de la pasarela. En la **Figura 6.23** se muestra la transformada de Fourier del registro de aceleraciones para el punto central de la pasarela, así como la zona en la que se encontrarían los modos originales de la estructura, los cuales pueden haber cambiado ligeramente como consecuencia de la acción del viento.

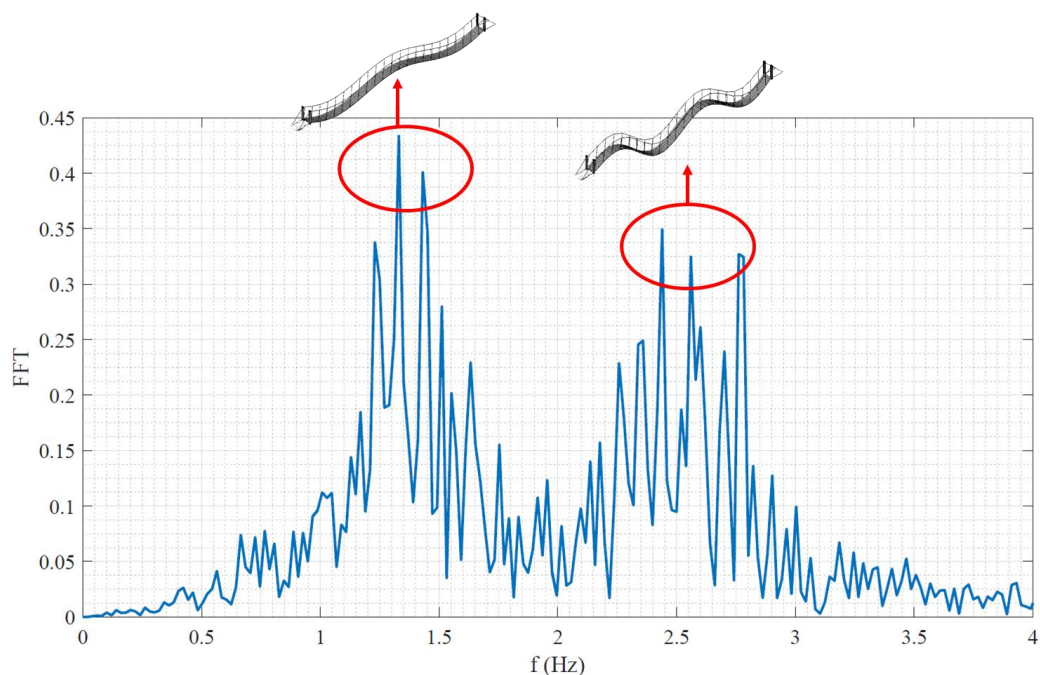


Figura 6.23. *Transformada de Fourier del registro de aceleraciones debido a la acción del viento en el punto correspondiente al centro de vano. Fuente: Elaboración propia.*

6.3.4.2. Estudio del confort de los peatones

Un episodio de viento turbulento puede ocasionar vibraciones excesivas que den lugar a una disminución del grado de confort de los peatones que circulen por la pasarela en dicho momento.

La percepción de las vibraciones por los seres humanos es un tema muy complicado, pues no se puede establecer un estándar fijo al depender de forma importante de las características de cada persona. En este aspecto, la psicología humana tiene un rol fundamental, ya que cada persona percibe las vibraciones de forma diferente; pero no es solo este hecho el que marca la percepción, puesto que también depende del momento en el que se producen las vibraciones, o de los sonidos que pueda producir la estructura en su movimiento.

En este punto cabe distinguir entre dos tipos de vibraciones: verticales y horizontales. Generalmente, los peatones son menos sensibles a las primeras que a las segundas.

Con respecto a las **vibraciones verticales**, la experiencia demuestra que el cuerpo humano es más sensible a ellas en una posición estática que en movimiento. Los criterios de confort en este caso se establecen a partir de la definición de un límite máximo de la aceleración vertical de la estructura; las clases de confort establecidas se muestran en la **Tabla 6.4**.

En cuanto a las **vibraciones horizontales**, los peatones son mucho más sensibles, más en la dirección lateral de la pasarela que en la longitudinal. El origen de este fenómeno es la mayor facilidad de desestabilizar a una persona con vibraciones horizontales que con verticales. De igual forma que con las vibraciones verticales, una forma de definir las clases de confort es mediante la limitación de las aceleraciones, tal y como se muestra en la **Tabla 6.4**, pero en este caso con valores menores.

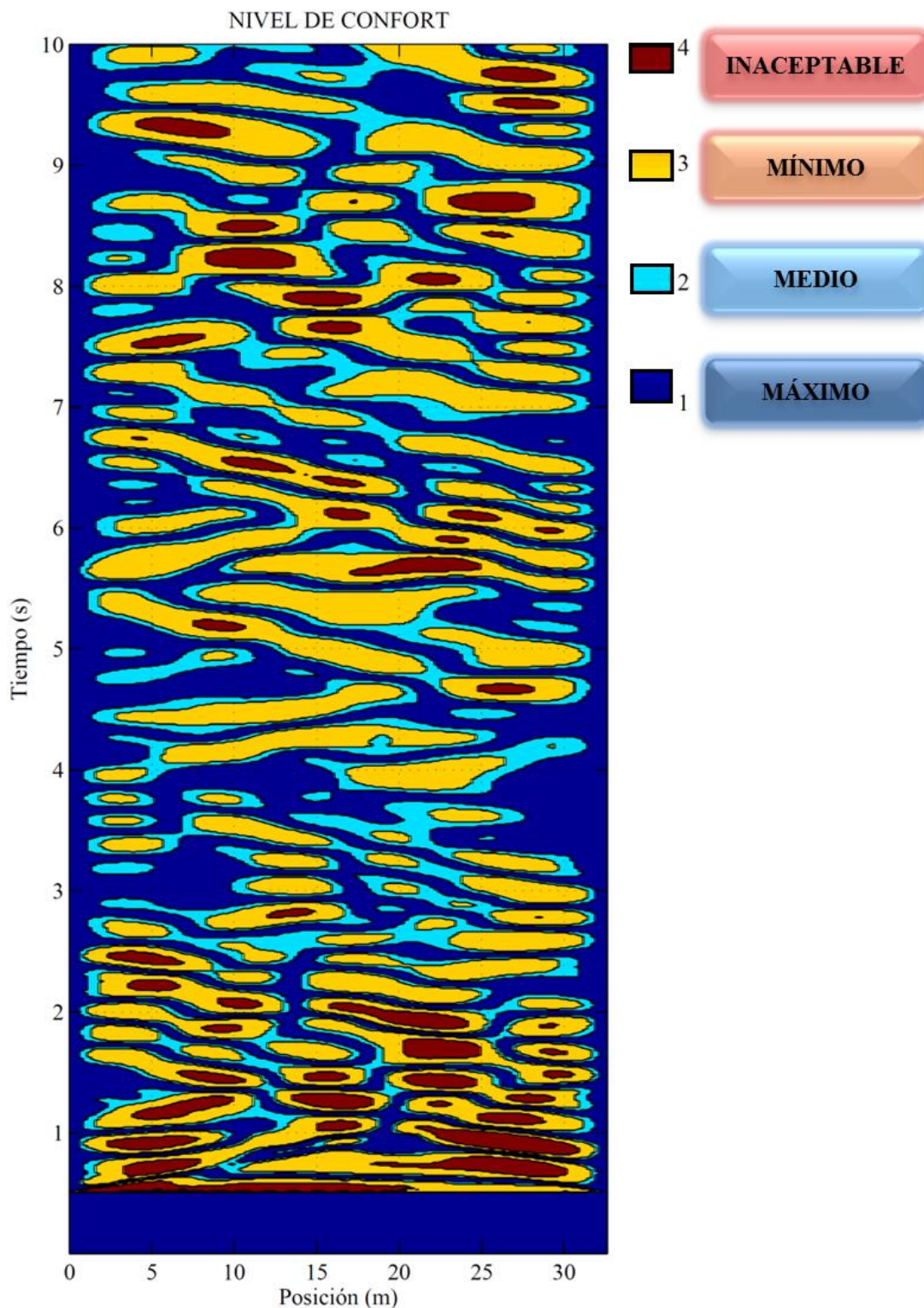
Tabla 6.4. Clases de confort en pasarelas. Fuente: (Heinemeyer et al., 2009).

CLASE DE CONFORT	GRADO DE CONFORT	Aceleración Máxima	
		Vertical	Horizontal
CL 1	Máximo	$< 0,5 \text{ m/s}^2$	$< 0,1 \text{ m/s}^2$
CL 2	Medio	$0,5 - 1,0 \text{ m/s}^2$	$0,1 - 0,3 \text{ m/s}^2$
CL 3	Mínimo	$1,0 - 2,5 \text{ m/s}^2$	$0,3 - 0,8 \text{ m/s}^2$
CL 4	Inaceptable	$> 2,5 \text{ m/s}^2$	$> 0,8 \text{ m/s}^2$

Puesto que en el presente caso de aplicación se ha sometido la pasarela a la acción del viento turbulento en dirección vertical, únicamente se analizará la aceleración vertical y, por tanto, el confort de los peatones respecto a las vibraciones verticales. A tal efecto, se parte del estudio de aceleraciones realizado anteriormente en el apartado 6.3.4.1; a los valores de aceleración obtenidos en los diferentes puntos considerados del tablero de la pasarela se les ha aplicado un filtro mediante los límites establecidos en la **Tabla 6.4**, lo que ha permitido obtener el grado de confort en cada punto de la pasarela y en cada momento de la simulación realizada. Los resultados obtenidos a tal efecto se muestran, para los 10 primeros segundos de la simulación, en la **Figura 6.24**, de la cual se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El momento más crítico en cuanto a grado de confort se da en los dos primeros segundos, durante los cuales la mayoría de la pasarela posee un nivel de confort inaceptable.

- Posteriormente, el confort tiende a oscilar entre un valor mínimo y un valor medio, si bien se dan valores puntuales en los que el confort en algunas partes de la pasarela es inaceptable.



*Figura 6.24. Nivel de confort en la pasarela durante los 10 primeros segundos de aplicación de la carga de viento.
Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados, en definitiva, muestran que, durante el episodio de viento, **el confort en la pasarela es entre mínimo e inaceptable, de forma general.**

7 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En el presente capítulo se procede a exponer las conclusiones obtenidas sobre los distintos aspectos desarrollados en el presente TFM. Además, se aportan ciertas ideas sobre los caminos a seguir para la realización de futuros trabajos y mejoras sobre los programas desarrollados: SimulAcel© y WindMaker©.

7.1 CONCLUSIONES

La elaboración del trabajo ha permitido obtener una serie de conclusiones, las cuales se exponen en el presente apartado según la temática a la que afectan.

Respecto al estudio de las diferentes **metodologías que permiten la generación estocástica de señales**, se ha podido concluir que existen dos metodologías fundamentales: una basada en espectros de referencia del fenómeno estudiado, y otra basada en filtros digitales. Aparte de las concepciones particulares de cada familia, fundamentalmente se ha concluido que las primeras tienden a necesitar tiempos de computación más elevados que las segundas.

En cuanto a la **generación de señales sísmicas**, la metodología implementada al respecto en el software MatLab, creando una interfaz gráfica, ha permitido disponer de una herramienta competente para la generación de este tipo de señales: SimulAcel©. La utilización de dicho programa ha permitido la definición de acelerogramas sintéticos artificiales consecuentes con la normativa sísmica de España de una forma relativamente rápida y sencilla, lo que demuestra la potencialidad del programa.

De igual forma, la implementación de una metodología para la **generación de señales de velocidad de viento** en el mismo software ha permitido el desarrollo del programa WindMaker©. Dicho programa supone una gran ayuda en la obtención, visualización e interpretación de datos relativos a campos de viento turbulento, tareas que pueden llegar a ser difíciles de realizar en dominios de cálculo con muchos puntos si no se dispone de una herramienta adecuada.

La principal hipótesis de partida que sirve de justificación para el desarrollo de las mencionadas herramientas informáticas es la necesidad de uso de señales temporales en el cálculo dinámico de estructuras con comportamiento no lineal. La utilidad de las señales generadas con SimulAcel© y WindMaker© se ha corroborado mediante su uso en el análisis estructural de una pasarela suspendida por cables, un tipo de estructura que posee dicho comportamiento no lineal, habiéndose obtenido resultados razonables y satisfactorios.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Las ideas de trabajos futuros se han orientado a los dos programas desarrollados en lenguaje de MatLab para la simulación estocástica de cargas para análisis dinámicos de estructuras, pues ha sido el objetivo principal del trabajo en todo momento. Se ha conseguido que ambas aplicaciones aporten gran versatilidad a la hora de definir las acciones de sismo (SimulAcel©) y viento (WindMaker©), si bien puede hacerse hincapié en su mejora a través de la implementación de los aspectos que se tratan a continuación.

En primer lugar, para el programa **SimulAcel©**, un programa para la generación de señales sísmicas artificiales, se podría trabajar en los siguientes aspectos:

- Dentro del apartado de la definición del espectro de referencia de la señal:
 - Posibilidad de definir una mayor gama de espectros normativos, con objeto de poder realizar análisis de estructuras de acuerdo a las normativas de un mayor número de países.
 - Posibilidad de obtener el espectro de referencia a partir de una señal sísmica medida en una determinada localización; de esta forma se podrían realizar análisis basándose en mediciones reales de una determinada localización, o también incluir espectros de zonas en las que no exista una normativa de aplicación que los defina.
 - Posibilidad de introducir manualmente los valores de un espectro de referencia, lo que aportaría una gran versatilidad en la definición de la señal.
- Con respecto a la definición de las funciones de intensidad que modulan la señal sísmica, las ideas son similares a las expuestas anteriormente:
 - Posibilidad de obtener la función envolvente de acuerdo a un acelerograma medido en campo, pudiendo así obtener acelerogramas con formas similares a las que se dan en una determinada localización.
 - Posibilidad de introducir las funciones de intensidad de forma manual, lo que permitiría la obtención de señales con cualquier tipo de forma.
- Finalmente, otra posible mejora del programa pasaría por la implementación de un módulo de generación de informes; es decir, un módulo que permita la creación de un informe técnico sobre la señal generada, con las imágenes y datos más representativos del proceso, para la documentación de proyectos.

En segundo lugar, para el programa **WindMaker©**, un programa para la generación de historias de velocidad de viento, se podría trabajar en los siguientes aspectos:

- Respecto a la definición del espectro de turbulencia usado como base en la generación, se plantea la posibilidad de utilizar otros espectros de referencia. En la elaboración del trabajo se han mencionado varios espectros: Von Karman, Kaimal y Eurocódigo 1; el objetivo consistiría en incluir dichos espectros, así como otros presentes en normativas de diversos países.
- En el caso de los métodos de cálculo, se ha empleado un método basado en superposición de ondas sinusoidales. Se plantea la inclusión en el programa de métodos basados en filtros digitales (como el método ARMA, introducido en el presente trabajo) o la utilización de métodos mejorados de ondas sinusoidales para

reducir el tiempo de computación, el cual puede ser muy elevado si se simulan períodos largos de tiempo y se incluye un gran número de puntos para definir el dominio de cálculo.

- Se podría valorar la opción de incluir un módulo adicional en el programa que permita la obtención de las cargas de viento asociadas a la velocidad del viento que serán utilizadas para el análisis de una determinada estructura. Este aspecto requeriría un proceso de estudio de metodologías para la obtención de cargas asociadas al viento, con objeto de crear un módulo lo más versátil posible para su uso en estructuras de diversa índole.
- Finalmente, al igual que se planteó para SimulAcel©, en WindMaker© también se podría integrar un módulo de generación de informes técnicos sobre la señal generada para su inclusión como documentación en proyectos.

REFERENCIAS

- Aas-Jakobsen, K. and Strommen, E. (n.d) 'Time domain buffeting response calculations of slender structures'.
- Allemang, R. and Brown, D. (1982) *A correlation coefficient for modal vector analysis*, Orlando: Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference.
- ANSYS (2013) *ANSYS Mechanical APDL Advanced Analysis Guide*, Canonsburg, PA.
- Asoc. Española de Normalización y Certificación, A. (1998) *Eurocódigo 1 - Bases de Proyecto y Acciones en Estructuras / Parte 2-4: Acciones en Estructuras. Acciones del Viento*.
- Barbat, A.H. and Canet, J.M. (1994a) *Estructuras sometidas a acciones sísmicas: Cálculo por ordenador*, Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Barbat, A.H., Orosco, L., Hurtado, J.E. and Galindo, M. (1994b) *Definición de la acción sísmica*, Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Beck, J. and Arnold, K. (1997) *Parameter Estimation in Engineering and Science*, New York.
- Billah, K. and Scanlan, R. (1991) 'Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failur, and Undergraduate Physics Textbooks', *American Journal of Physics*, vol. 59, no. 2, pp. 118-124.
- Cadenas, E., Rivera, W., Campos-Amezcu, R. and Heard, C. (2016) 'Wind Speed Prediction Using a Univariate ARIMA Model and a Multivariate NARX Model', *Energies*, Febrero.
- Cantieni, R. (2005) 'Experimental Methods used in System Identification of Civil Engineering Structures', Proceedings of IOMAC (International Operational Modal Analysis), Copenhagen.
- Carreño, E., Brazo, B., Suárez, A. and Tordesillas, T.M. (1999) 'Registro y Tratamiento de Acelerogramas', *Física de la Tierra*, vol. 11, pp. 81-111.
- Casado, C.M., Sebastián, J.d., Muñoz, I., Poncela, A. and Lorenzana, A. (2011) 'Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales', *DYNA, Ingeniería e Industria*, vol. 86, no. 3, Junio - Julio, pp. 318-327.
- Castro, H.G., De Bortoli, M.E., Paz, R.R. and Marighetti, J.O. (2015) 'Una metodología de cálculo para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción del viento', *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 31, no. 4, Febrero, pp. 235-245.
- Döhler, M., Andersen, P. and Mevel, L. (2010) *Data merging for multi-setup operational modal analysis with data-driven SSI*, Proceedings of the IMAC XXVIII.

- Fomento, M.d. (2008) *Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07)*, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.
- Fomento, M.d. (2009) *Documento Básico: Seguridad estructural: Madera*.
- Fomento, M.d. (2009) *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)*, Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento.
- Fomento, M.d. (2011) *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)*.
- Fox, R. and Kapoor, M. (1968) 'Rate of change of eigenvalues and eigenvectors', *AIAA Journal*, vol. 6, pp. 2426-2429.
- González-Longatt, F.M., Amaya, O., Cooz, M., Duran, L., Peraza, C., Arteaga, F.J. and Villanueva, C. (2007) 'Modelación y simulación de la velocidad de viento por medio de una formulación estocástica', *Revista Ingeniería UC*, vol. 14, no. 3, pp. 7-15.
- Google (2017) *Google Earth*, [Online] [29 Abril 2017].
- Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., Schlaich, M., Goldack, A., Trometer, S., Lukic, M., Chabrolin, B., Lemaire, A., Martin, P.O., Cunha, A. and Caetano, E. (2009) *Design of Lightweight Foot-bridges for Human Induced Vibrations*, Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities.
- Hong, S. (2009) *Time Domain Buffeting Analysis of Large-Span Cable-Stayed Bridge*, Oporto: Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia.
- Jaishi, B. and Ren, W.X. (1994) 'Dynamic Monitoring of Steel Girder Highway Bridge', *Journal of Bridge Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 271-278.
- Jiménez, J.F. and Sáez, A. (2016) 'Modelo Updating for the Selection of an Ancient Bridge Retrofitting Method in Almería, Spain', *Structural Engineering International*, no. 1, pp. 17-26.
- Jin, S.-S., Cho, S., Jung, H.-J., Lee, J.-J. and Yun, C.-B. (2014) 'A new multi-objective approach to finite element model updating', *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, pp. 2323-2338.
- Kareem, A. (2008) 'Numerical simulation of wind effects: A probabilistic perspective', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, no. 96, pp. 1472-1497.
- Magalhães, F.M.R.L.d. (n.d) *Operational Modal Analysis for Testing and Monitoring of Bridges and Special Structures*, Porto: Universidade do Porto.
- Maia, N. and Silva, J. (1997) *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, New York: Research Studies Press Ltd.
- Martín, M. (n.d) *Señales Aleatorias y Ruido*, Valladolid: Universidad de Valladolid.
- Nocental, J. and Wright, S. (1999) *Numerical Optimization*, New York.

Riera, J.D. and Davenport, A.G. (n.d) 'Wind Effects on Buildings and Structures', pp. 177-179.

Rodríguez, G. (1995) *Métodos de Análisis Espectral del Oleaje: Estudio Comparativo*, Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Física.

Sáez, A. (2016) *Apuntes de clase de la asignatura Análisis Avanzado de Estructuras*, Sevilla.

Schmidt, A.L. (2013) *FFT: Transformada Rápida de Fourier*, Bahía Blanca.

Shinozouka, M. (1972) 'Digital Simulation of Random Processes and its Applications', *Journal of Sound and Vibration*, vol. 25, no. 1, pp. 111-128.

Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996) *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design*, Tercera edition, John Wiley & Sons, INC.

Susagna, T., Cabañas, L., Goula, X., Alcalde, J.M. and Belvaux, M. (2012) 'Análisis de los parámetros de los acelerogramas registrados en los seísmos de Lorca, de interés para la Ingeniería', *Física de la Tierra*, vol. 24, Oct, pp. 213-234.