

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Aplicación de algoritmos genéticos para optimizar la  
recolección de energía cinética en LAV

Autor: Manuel Ángel Zapata Habas

Tutor: Antonio Romero Ordóñez

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

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Aeronáutica

# **Aplicación de algoritmos genéticos para optimizar la recolección de energía cinética en LAV**

Autor:

Manuel Ángel Zapata Habas

Tutor:

Antonio Romero Ordóñez

Profesor Contratado Doctor

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster: Aplicación de algoritmos genéticos para optimizar la recolección de energía cinética en  
LAV

Autor: Manuel Ángel Zapata Habas

Tutor: Antonio Romero Ordóñez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



# Índice

---

<b>Índice</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación	1
1.2 Revisión Bibliográfica	1
1.3 Objetivo y Metodología	2
1.4 Estructura del documento	3
1.5 Contribuciones originales	3
<b>2 Algoritmos Genéticos</b>	<b>5</b>
2.1 Inspiración de los Algoritmos Genéticos	5
2.2 Funcionamiento de los Algoritmos Genéticos	6
2.2.1 Descripción	6
2.2.2 Diferencias entre Algoritmos Clásicos y Algoritmos Genéticos	8
2.3 Ventajas y desventajas	8
<b>3 Modelo Del Sistema</b>	<b>9</b>
3.1 Descripción del modelo	10
3.2 Cálculo de Potencia y Energía	12
3.3 Ejemplos con funciones armónicas.	13
3.4.1 Aceleración con un armónico	13
3.4.2 Aceleración con dos armónicos	19
<b>4 Análisis LAVs Córdoba-Málaga y París-Bruselas</b>	<b>23</b>
4.1 Análisis Línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga	23
4.1.1 Medidas Experimentales LAV Córdoba-Málaga	23
4.1.2 Optimización de la Energía Recolectada para la LAV Córdoba-Málaga	27
4.2 Análisis Línea de Alta Velocidad París- Bruselas	31
4.2.1 Medidas Experimentales LAV París-Bruselas	31
4.2.2 Optimización de la Energía Recolectada para la LAV París-Bruselas	33
4.3 Cálculo de un modelo óptimo global para las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas	40
4.4 Comparación del modelo óptimo global del sistema con respecto a los óptimos puntuales de las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas.	44
4.4.1 Comparación de la energía recolectada con el modelo óptimo global con respecto a la máxima posible. LAV Córdoba-Málaga.	44
4.4.2 Comparación de la energía recolectada con el modelo óptimo global con respecto a la máxima posible. LAV París-Bruselas.	45

<b>5</b>	<b>Análisis LAV Madrid-Sevilla en Puente Arroyo Bracea</b>	<b>49</b>
5.1	<i>Medidas Experimentales en Puente Arroyo Bracea</i>	49
5.2	<i>Optimización de la Energía Recolectada. Puente Arroyo Bracea</i>	52
5.3	<i>Cálculo de variables mecánicas óptimas para los datos de Puente Arroyo Bracea</i>	59
5.4	<i>Comparación de la energía recolectada con los diferentes modelos con respecto a la máxima posible.</i>	63
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuros</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Anexo LAV París-Bruselas</b>	<b>69</b>
7.1	<i>Gráficas Medidas Experimentales en el dominio de la frecuencia</i>	69
<b>8</b>	<b>Anexo Puente Bracea</b>	<b>79</b>
8.1	<i>Gráficas Medidas Experimentales en el dominio de la frecuencia</i>	79
8.2.	<i>Resultados de la optimización para los diferentes eventos</i>	90
	<b>Referencias</b>	<b>99</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2–1. Valores por defecto de la función ga de MATLAB	7
Tabla 3–1. Propiedades Material Piezoeléctrico y valor de la carga	12
Tabla 3–2. Valores de la solución para aceleración a 50 Hz	14
Tabla 3–3. Valores de la solución para aceleración a 50 Hz con ruido leve	16
Tabla 3–4. Valores de la solución para aceleración a 50 Hz con ruido fuerte	17
Tabla 3–5. Valores de la solución para aceleración a 40 y 60 Hz	20
Tabla 4–1. Paso de trenes registrados por las vías 1 y 2. LAV París-Bruselas	31
Tabla 4–2. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño global. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas	43
Tabla 4–3. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño de un modelo para la LAV Córdoba- Málaga	45
Tabla 5–1. Valores de las 5 primeras frecuencias naturales de Puente Arroyo Bracea	50
Tabla 5–2. Paso de trenes registrados en el Puente Arroyo Bracea	50
Tabla 5–3. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño del Modelo 12 Hz. Puente Arroyo Bracea	62
Tabla 5–4. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño del Modelo 9 Hz. Puente Arroyo Bracea	62
Tabla 5–5. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño del Modelo 4 Hz. Puente Arroyo Bracea	62



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Ejemplo de evolución	5
Figura 2-2. Cruzamiento Mutación y Élite	6
Figura 2-3. Ejemplo de alta y baja diversidad	7
Figura 3-1. Ejemplo diseño de colector con material piezoeléctrico.	9
Figura 3-2. Modelo mecánico del sistema	10
Figura 3-3. Modelo eléctrico del sistema	10
Figura 3-4. Aceleración a 50 Hz	13
Figura 3-5. Voltaje generado. Aceleración a 50 Hz	14
Figura 3-6. Desplazamiento del sistema. Aceleración a 50 Hz	15
Figura 3-7. Potencia generada por el sistema. Aceleración a 50 Hz	15
Figura 3-8. Aceleración a 50 Hz con ruido leve	16
Figura 3-9. Aceleración a 50 Hz con ruido fuerte	16
Figura 3-10. Aceleración a 50 Hz sin ruido. Dominio de la frecuencia	17
Figura 3-11. Aceleración a 50 Hz con ruido leve. Dominio de la frecuencia	18
Figura 3-12. Aceleración a 50 Hz con ruido leve. Dominio de la frecuencia	18
Figura 3-13. Potencia generada sin ruido, con ruido leve y con ruido fuerte. Aceleración a 50 Hz	18
Figura 3-14. Aceleración a 40 y 60 Hz	19
Figura 3-15. Aceleración a 40 y 60 Hz. Dominio de la frecuencia	19
Figura 3-16. Energía con respecto a la masa y la frecuencia para diferentes valores de $\zeta$ constante	20
Figura 3-17. Energía con respecto a la masa y al factor de amortiguamiento para diferentes valores de $\omega_n$ constante	21
Figura 4-1. Línea de Alta Velocidad Córdoba Málaga. Imagen obtenida de la Ref. [20]	24
Figura 4-2. Aceleraciones en el carril. LAV Córdoba-Málaga	24
Figura 4-3. Aceleraciones en el carril en el dominio de la frecuencia. LAV Córdoba-Málaga	25
Figura 4-4. Aceleraciones en (a) traviesa, (b) 3 m, (c) 8.6 m, (d) 11.8m, (e) 14.8 m, (f) 18.1 m, (g) 21.8 m, (h) 25 m, (i) 28.4 m, (j) 32.3 m. LAV Córdoba-Málaga	26
Figura 4-5. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia en (a) traviesa, (b) 3 m, (c) 8.6 m, (d) 11.8m, (e) 14.8 m, (f) 18.1 m, (g) 21.8 m, (h) 25 m, (i) 28.4 m, (j) 32.3 m. LAV Córdoba-Málaga	27
Figura 4-6. Energía máxima generada en cada punto. LAV Córdoba-Málaga	27
Figura 4-7. Frecuencia a la que se sintoniza el sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga	28
Figura 4-8. Masa óptima del sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga	29
Figura 4-9. Rigidez óptima del sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga	29
Figura 4-10. Amortiguamiento óptimo del sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga	30

Figura 4-11. Puntos de medida. LAV París-Bruselas	31
Figura 4-12. Aceleraciones en la travesía. Evento t25, LAV París-Bruselas	32
Figura 4-13. Aceleraciones en la travesía en el dominio de la frecuencia. Evento t25, LAV París-Bruselas	33
Figura 4-14. Energía máxima obtenida por el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas	34
Figura 4-15. Frecuencias a las que se sintoniza el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas	34
Figura 4-16. Valores de la masa que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas	35
Figura 4-17. Valores de la rigidez que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas	35
Figura 4-18. Valores del amortiguamiento que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas	36
Figura 4-19. Energía máxima obtenida por el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas	36
Figura 4-20. Frecuencias a las que se sintoniza el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas	37
Figura 4-21. Valores de la masa que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas	38
Figura 4-22. Valores de la rigidez que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas	38
Figura 4-23. Valores del amortiguamiento que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas	39
Figura 4-24. Distribución conjunta de energía con respecto a masa y frecuencia. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas	40
Figura 4-25. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de frecuencia. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas	41
Figura 4-26. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de masas. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas	41
Figura 4-27. Energía acumulada con respecto a valores de la frecuencia. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas	42
Figura 4-28. Energía acumulada con respecto a valores de la masa. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas	42
Figura 4-29. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo global con respecto a los máximos de la energía en cada punto. LAV Córdoba-Málaga	44
Figura 4-30. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo para la LAV Córdoba-Málaga con respecto a los máximos de la energía en cada punto.	45
Figura 4-31. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo global con respecto a los máximos de la energía en cada punto para el evento t25. LAV París-Bruselas	46
Figura 4-32. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo global con respecto a los máximos de la energía en cada punto para los eventos t11, t12, t13, t14, t21, t22, t23 y t24. LAV París-Bruselas	47
Figura 5-1. Puente Arroyo Bracea (Imagen Google Maps)	49
Figura 5-2. Puntos de medida en el Puente Arroyo Bracea. Imagen obtenida de la Ref. [23]	50
Figura 5-3. Aceleraciones en el punto 6 para los eventos 1 y 2. Puente Arroyo Bracea	51

Figura 5-4. Aceleraciones en el punto 5 para el evento 8 (resonancia del puente). Puente Arroyo Bracea	51
Figura 5-5. Energía máxima recolectada en cada punto para el evento 1. Puente Arroyo Bracea	52
Figura 5-6. Frecuencia natural a la que se sintonizada el sistema en cada punto para el evento 1. Puente Arroyo Bracea	53
Figura 5-7. Valores de la masa que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 1. Puente Arroyo Bracea	54
Figura 5-8. Valores de la rigidez que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 1. Puente Arroyo Bracea	54
Figura 5-9. Valores del amortiguamiento que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 1. Puente Arroyo Bracea	55
Figura 5-10. Energía máxima recolectada en cada punto para el evento 2. Puente Arroyo Bracea	55
Figura 5-11. Frecuencia natural a la que se sintonizada el sistema en cada punto para el evento 2. Puente Arroyo Bracea	56
Figura 5-12. Valores de la masa, rigidez y amortiguamiento que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 2. Puente Arroyo Bracea	57
Figura 5-13. Energía máxima recolectada en cada punto para el evento 8. Puente Arroyo Bracea	57
Figura 5-14. Frecuencia natural a la que se sintonizada el sistema en cada punto para el evento 8. Puente Arroyo Bracea	58
Figura 5-15. Valores de la masa, rigidez y amortiguamiento que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 8. Puente Arroyo Bracea	58
Figura 5-16. Distribución conjunta de energía con respecto a masa y frecuencia. Puente Arroyo Bracea	59
Figura 5-17. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de frecuencia. Puente Arroyo Bracea	60
Figura 5-18. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de masas. Puente Arroyo Bracea	60
Figura 5-19. Energía acumulada con respecto a valores de la frecuencia. Puente Arroyo Bracea	61
Figura 5-20. Energía acumulada con respecto a valores de la masa. Puente Arroyo Bracea	61
Figura 5-21. Comparación de la energía con los diferentes modelos con respecto a los máximos de la energía en cada punto para el evento 1. Puente Arroyo Bracea	63
Figura 5-22. Comparación de la energía con los diferentes modelos con respecto a los máximos de la energía en cada punto para el evento 8. Puente Arroyo Bracea	64
Figura 5-23. Comparación de la energía con los diferentes modelos con respecto a los máximos de la energía en cada punto para los eventos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 11. Puente Arroyo Bracea	65
Figura 7-1. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 11 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	69
Figura 7-2. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 12 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	70
Figura 7-3. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 13 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	71
Figura 7-4. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 14 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	72
Figura 7-5. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 21 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	73
Figura 7-6. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 22 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	74
Figura 7-7. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 23 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	75

Figura 7-8. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 24 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	76
Figura 7-9. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 25 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas	77
Figura 8-1. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 1 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	79
Figura 8-2. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 2 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	80
Figura 8-3. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 3 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	81
Figura 8-4. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 4 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	82
Figura 8-5. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 5 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	83
Figura 8-6. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 6 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	84
Figura 8-7. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 7 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	85
Figura 8-8. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 8 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	86
Figura 8-9. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 9 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	87
Figura 8-10. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 10 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	88
Figura 8-11. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 11 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea	89
Figura 8-12. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 3. Puente Arroyo Bracea	90
Figura 8-13. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 4. Puente Arroyo Bracea	91
Figura 8-14. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 5. Puente Arroyo Bracea	92
Figura 8-15. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 6. Puente Arroyo Bracea	93
Figura 8-16. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 7. Puente Arroyo Bracea	94
Figura 8-17. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 9. Puente Arroyo Bracea	95
Figura 8-18. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 10. Puente Arroyo Bracea	96
Figura 8-19. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 11. Puente Arroyo Bracea	97

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Motivación

En la actualidad, gracias a los avances realizados en el campo de los semiconductores, se ha producido un gran desarrollo de los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (Microelectromechanical Systems, MEMS). Estos sistemas pueden estar compuestos por acelerómetros, giróscopos, sensores de presión, etc. El uso de estos sistemas permite un alto desempeño, con un bajo coste, un peso reducido y muy bajo consumo energético.

En muchos casos estos sistemas pueden encontrarse en zonas de difícil acceso o estar integrados en una estructura, convirtiéndose en un sistema con necesidad de una fuente de alimentación propia. En estos casos, tradicionalmente, se han usado baterías como fuente de alimentación. Las baterías son ineficientes debido a que su masa es elevada y tanto la energía que pueden suministrar como su vida útil están limitadas, haciendo necesaria la sustitución cada cierto período de tiempo. Una alternativa prometedora a las baterías son las denominadas fuentes de energía renovables autónomas en miniatura [1].

Las fuentes de energía renovables autónomas en miniatura pueden permitir que los dispositivos MEMS recolecten la energía necesaria de su propio entorno. Con este propósito, se podría conseguir un sistema alimentado, por ejemplo, con las mismas vibraciones que registra y con capacidad para transmitir esos datos a través de un enlace inalámbrico.

Centrándonos en la idea anterior, aplicada a las vibraciones producidas por el paso de trenes. Podemos imaginar un sistema aislado en zonas remotas, sin necesidad de acceso ni mantenimiento, con la capacidad de obtener la energía del ambiente que lo rodea y que puede ser usado, por ejemplo, para la monitorización del daño de la propia estructura ferroviaria en la que se encuentra instalado.

## 1.2 Revisión Bibliográfica

Las tecnologías de recolección de energía a partir de vibraciones han atraído mucha atención en la última década. Recientemente, Wei y Jing [2] han realizado una revisión de las diferentes técnicas para la recolección de energía, a partir de la energía cinética de las vibraciones. Siendo los principales mecanismos, utilizados para la conversión de energía cinética en eléctrica, la piezoelectricidad, el electromagnetismo y la electrostática.

En general, el modelo mecánico de estos dispositivos consiste en una masa sísmica montada en un elemento elástico que, en su conjunto, se excita por las vibraciones de la masa. Este modelo fue estudiado en primer lugar por Williams y Yates [3]. Los autores analizaron un microgenerador de unas dimensiones aproximadas de 5 mm x 5 mm x 1 mm. Los autores predijeron que la potencia producida es proporcional al cubo de la frecuencia de la respuesta vibratoria. Además, para maximizar la energía generada, la masa sísmica debe ser lo más grande posible. Siendo la principal limitación en la potencia de salida del generador su tamaño, ya que limita tanto el valor de la masa sísmica como la amplitud de su movimiento. Los autores de la investigación concluyeron que la potencia disponible era pequeña, siendo necesario recolectar y almacenar la energía durante un período de tiempo, antes de tomar y transmitir la lectura.

Este tipo de sistemas tiene ventajas obvias en aplicaciones localizadas en entornos aislados y de difícil acceso [4]. Los sistemas de recolección de energía en estructuras, aprovechan la energía cinética de la vibración de la propia estructura, cuando está excitada por su entorno. Para convertirla en energía eléctrica, almacenarla y que sea usada posteriormente para alimentar dispositivos electrónicos. El origen de dichas vibraciones puede incluir,

por ejemplo, la excitación del viento en edificios, la acción de las olas en plataformas oceánicas, las vibraciones producidas por el tráfico en puentes, o la acción del sismo [5]. De la misma forma, estos sistemas también tienen aplicaciones en vehículos, incluidas suspensiones de automóviles [6] y en sistemas ferroviarios [7].

El ámbito de este trabajo se centra en la recolección de energía de las vibraciones de origen ferroviario. A continuación, se citan algunas de las investigaciones publicadas más relevantes en este ámbito. Gatti et al. [8] presentaron un estudio de la recolección de energía a partir de las vibraciones de la vía producidas por el paso de un tren. Yuan et al. [9] usaron un transductor piezoeléctrico para convertir la energía de vibración de una traviesa en energía eléctrica. De forma similar, Nelson et al. [10] instalaron, en la parte inferior de un carril, un dispositivo para generar energía eléctrica a partir de la vibración originada por el tráfico ferroviario. Brenan et al [11] han investigado el uso de un sistema mecánico de un grado de libertad unido a una estructura que actúa tanto de dispositivo de control de vibraciones como de recolector de energía. Takeya et al. [12] han propuesto un sistema de captación de energía, con dos grados de libertad, para aprovechar la energía de vibración en puentes. Cheng et al. [13] han propuesto un sistema auto-sintonizado en el que la frecuencia de vibración de la masa sísmica se ajusta, con un actuador piezoeléctrico, para incrementar la energía producida. La energía necesaria para accionar el actuador se almacena en un condensador que carga el propio recolector. Li et al. [14] diseñaron un sistema para captar la energía de vibración en una banda de frecuencia mediante un modelo de múltiples grados de libertad. El rendimiento de este recolector se investigó experimentalmente con las vibraciones producidas por el paso de un tren.

Uno de los problemas más importantes de los sistemas de recolección de energía está asociado a que el rendimiento del dispositivo de producción de energía se limita a una banda de funcionamiento muy estrecha, alrededor de su frecuencia de resonancia [15]. Si la frecuencia de la excitación se desvía de la condición de resonancia, la potencia de salida se reduce drásticamente. Muchos investigadores han intentado diseñar dispositivos mecánicos basados en algunos de los mecanismos de conversión antes citados [16]. Sin embargo, algunos de los dispositivos de recolección de energía pueden no cumplir con los requisitos de diseño para su correcto funcionamiento. Esta situación se debe principalmente al hecho de que la frecuencia de resonancia del generador, a menudo, no está sintonizada con la de la vibración.

En este trabajo, partiendo de medidas experimentales de las vibraciones producidas por el paso de trenes en varias Líneas de Alta Velocidad (LAV). Se analiza y calcula el valor de los parámetros mecánicos (masa, rigidez y amortiguamiento), que optimizan la energía recolectada por el sistema. Analizando la relación entre la frecuencia de sintonización óptima del sistema y las frecuencias de las vibraciones experimentales.

### 1.3 Objetivo y Metodología

El objetivo principal de este trabajo es el cálculo y análisis de los valores de las variables mecánicas (masa, rigidez y amortiguamiento) que optimizan la energía recolectada por un sistema piezoeléctrico. Disponiendo para ello de medidas experimentales de las vibraciones producidas por el paso de trenes, en diferentes Líneas de Alta Velocidad. Para conseguir este objetivo se seguirán los siguientes pasos:

- Se definirá un modelo de sistema de recolección de energía, en este caso piezoeléctrico, que permitirá calcular la energía recolectada por el sistema en cada caso.
- Se usarán medidas experimentales de vibraciones de trenes, registradas por diferentes autores, en diferentes LAV.
- Se usarán algoritmos genéticos para calcular el valor de las variables mecánicas que maximizan la energía recolectada. Se probará la eficacia de este método con ejemplos sencillos e intuitivos.
- Se utilizarán algoritmos genéticos para calcular los resultados óptimos para las medidas experimentales en diferentes LAV.
- Se definirán modelos óptimos globales y se comparará su capacidad para absorber energía, con respecto a la máxima, para las diferentes medidas experimentales.
- Se analizarán los resultados, estableciéndose vínculos entre la frecuencia óptima de sintonización del sistema y las frecuencias de las medidas experimentales.



## 1.4 Estructura del documento

El presente documento cuenta con ocho capítulos principales. En el capítulo dos se introducen los algoritmos genéticos, describiendo el funcionamiento del método de optimización y sus principales ventajas e inconvenientes.

En el capítulo 3, se introduce el modelo usado y las ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. Adicionalmente, se detalla como calcular la potencia y energía generada por el sistema. Por último, se muestran y analizan los resultados, en caso de excitar al sistema con aceleraciones de tipo armónico.

En el capítulo 4, se muestran los resultados óptimos obtenidos para las diferentes medidas experimentales de vibraciones en las LAVs Córdoba-Málaga y París-Bruselas. Se usan los valores óptimos obtenidos para cada punto para seleccionar unas variables mecánicas óptimas globales, que sean las que mejor se ajusten al conjunto de medidas experimentales disponibles. Por último, se comparan la energía recolectada por el modelo con variables mecánicas óptimas globales, en cada punto de medida experimental, con la máxima energía posible en esos puntos.

En el capítulo 5, se realiza un análisis similar al realizado en el capítulo 4 pero en este caso para medidas experimentales en el Puente del Arroyo Bracea, perteneciente a la LAV Sevilla-Madrid. Se analizan los resultados obtenidos y se comparan con los del capítulo anterior.

En el capítulo 6, se presentan las conclusiones del trabajo y se proponen posibles trabajos futuros relacionados con este.

Por último, los capítulos 7 y 8 son anexos en los cuales se han incluido gráficas que se considera que pueden resultar de interés para los lectores del trabajo.

## 1.5 Contribuciones originales

En este apartado se indican algunos de los aspectos más innovadores desarrollados en este proyecto:

- El desarrollo de algoritmos en MATLAB, que permiten optimizar los valores de energía obtenida por un sistema de recolección de energía piezoeléctrico, para unas vibraciones ambientales dadas. Para ello, se ha desarrollado un código en el cual se calculan los valores óptimos de las propiedades mecánicas del sistema, mediante el uso de algoritmos genéticos de la librería de MATLAB.
- La aplicación del método de optimización, basado en algoritmos genéticos, a casos sencillos de vibraciones armónicas. Permitiendo estos ejemplos entender como el sistema se sintoniza con las vibraciones para obtener la máxima energía posible.
- El cálculo de los parámetros mecánicos (masa, rigidez y amortiguamiento) óptimos del sistema, que permiten obtener la máxima energía posible para medidas experimentales de vibraciones en puntos de las LAVs París-Bruselas y Córdoba-Málaga.
- El cálculo de la energía máxima recolectada y los valores de las propiedades mecánicas que la optimizan. Para diferentes puntos de medida experimental en el Puente Arroyo Bracea, perteneciente a la LAV Sevilla-Madrid.
- La definición de modelos, con unas propiedades mecánicas que son las que permiten recolectar mayor energía, de manera global, para el conjunto de datos disponibles. Comparándose la energía recolectada por estos modelos con la máxima posible para cada punto de medida experimental.
- Por último, se llega a una serie de conclusiones en base a los resultados obtenidos. Estas conclusiones pueden ser útiles para tener una primera idea de los valores óptimos de sintonización del sistema, dependiendo de las excitaciones a las que este expuesto.



# 2 ALGORITMOS GENÉTICOS

---

Se define algoritmo como un conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema. Los algoritmos genéticos son algoritmos de optimización inspirados en la evolución biológica, de ahí el nombre de algoritmo genético. Este tipo de algoritmos son usados para la resolución de problemas de búsqueda y optimización. Se considera el nacimiento de los algoritmos genéticos en torno a los años setenta de la mano de John H. Holland con sus publicaciones “*Outline for a logical theory of adaptive systems*” (1962) y “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*” (1975).

En la actualidad debido al desarrollo de la informática y el aumento de la capacidad de computación. Se ha producido un aumento en el uso de estos algoritmos, que se consideran un método robusto y que puede tratar una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas.

En las siguientes secciones, se describe el funcionamiento del algoritmo realizando una analogía con la evolución biológica, y se comentan algunas ventajas e inconvenientes.

## 2.1 Inspiración de los Algoritmos Genéticos

Como se ha comentado anteriormente, los algoritmos genéticos están inspirados en la evolución biológica. En la naturaleza, los diferentes individuos de una población deben competir entre sí por los recursos necesarios (agua, comida, etc) para sobrevivir. De forma natural, esta lucha hace que los individuos con mejores características, para la supervivencia, tengan más probabilidades de tener un mayor número de descendientes y los individuos menos dotados tengan menos.



Figura 2-1. Ejemplo de evolución

Los genes de los individuos con mejores capacidades se propagarán en las diferentes generaciones, creándose poblaciones con mejores características. Puesto que, de la combinación de las características de buenos ancestros, pueden nacer nuevos individuos con características mejores a las de cualquiera de sus ancestros, las especies evolucionarán adaptándose cada vez mejor al medio en el que viven.

Esta idea es la que inspira el desarrollo de los algoritmos genéticos y su uso, para resolver problemas de optimización y búsqueda.

## 2.2 Funcionamiento de los Algoritmos Genéticos

### 2.2.1 Descripción

Los algoritmos usan una analogía directa con el comportamiento de la naturaleza. Inicialmente se crea una población de individuos. Cada individuo tendrá unas características (en nuestro caso el valor de las variables de optimización masa rigidez y amortiguamiento) aleatorias y será una posible solución al problema.

Cada individuo, dependiendo de sus características, obtendrá un valor de la función a optimizar (en nuestro caso sería la energía producida, al igual que en el caso biológico era la supervivencia). Una vez obtenido el valor de la función, para la primera generación de individuos, se crea la siguiente generación.

En cada nueva generación, el algoritmo genético usa la población actual para crear la nueva generación, llamada hijos. El algoritmo selecciona a un grupo de individuos de la generación actual, llamados padres, que aportan sus características para formar la siguiente generación. Los individuos elegidos como “padres” son individuos cuyas características han tenido mejor adaptación al problema.

En cada nueva generación a partir de los “padres” seleccionados se crean hijos de tres formas diferentes:

- Élite: Son los individuos de la generación actual con las características que mejor se ajustan al problema. Estos individuos pasan automáticamente a la próxima generación.
- Cruzamiento: Se forman individuos cuyas características se obtienen cruzando las características de diferentes individuos padres.
- Mutación: Son individuos formados introduciendo variaciones aleatorias en las características de un único individuo padre.

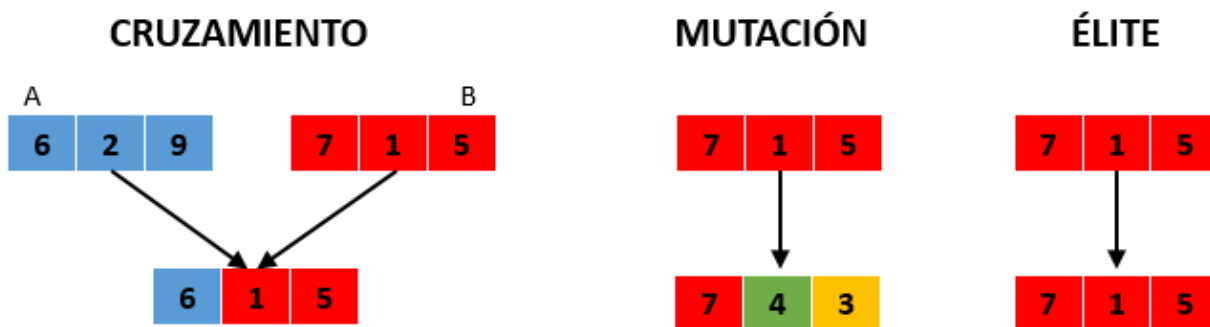


Figura 2-2. Cruzamiento Mutación y Élite

La proporción de la nueva generación que es generada por cruzamiento, mutación o élite depende del problema concreto, al igual que el tamaño de la población inicial. En cualquier caso, tanto con la población inicial como con la proporción cruzamiento, mutación y élite es necesario garantizar la diversidad de la población. La diversidad es la distancia media entre los individuos de la población. Correspondiendo mucha diversidad a una distancia media grande y poca diversidad a una distancia media pequeña, como se muestra en la siguiente imagen.

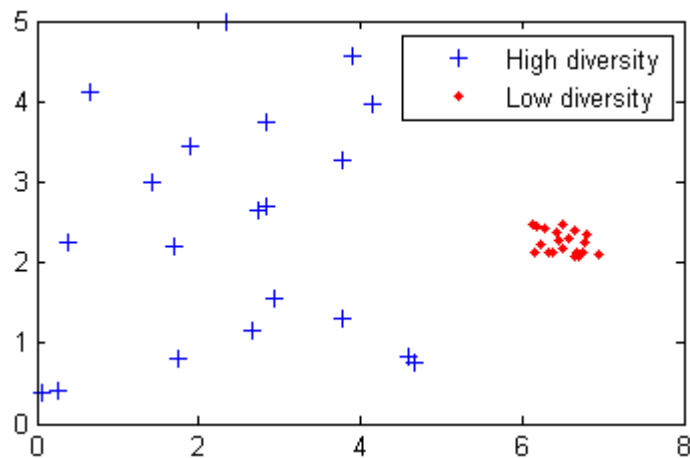


Figura 2-3. Ejemplo de alta y baja diversidad

En los algoritmos genéticos es necesario que la diversidad de la población inicial sea alta, ya que esto amplía la zona del espacio en la cual el algoritmo puede buscar soluciones.

Los criterios de parada usados para finalizar las simulaciones, están en general asociados al número de generaciones a simular, al tiempo de la simulación o a la comparación del valor obtenido para el mejor individuo con el de la media de la población. Si ambos valores son próximos, se tiene garantía de que se ha alcanzado una solución cercana a la óptima.

En este caso trabajo concreto para realizar la optimización del sistema mediante algoritmos genéticos, se ha utilizado la función *ga* de MATLAB. En general se han usado los valores recomendados por defecto de la función (que se muestran en la Tabla 2-1), ya que en la mayoría de los casos han sido suficientes para ajustar los resultados y no es el objetivo principal de este trabajo profundizar en como internamente el algoritmo genético resuelve el problema.

Tabla 2-1. Valores por defecto de la función *ga* de MATLAB

Variable	Valor
Tamaño de la población	50
Porcentaje de Élite	5%
Porcentaje de Cruzamiento	80%
Porcentaje de Mutación	15%
Generaciones	300

En los casos en los que se han encontrado problemas para obtener el óptimo se ha aumentado el tamaño de la población. Esto aumenta la capacidad del método para obtener la solución óptima, pero a cambio aumenta también el coste computacional.

## 2.2.2 Diferencias entre Algoritmos Clásicos y Algoritmos Genéticos

A continuación, se enumeran algunas diferencias entre los algoritmos clásicos de optimización y los algoritmos genéticos.

Algoritmos clásicos:

- Generan un solo punto en cada iteración.
- La secuencia de puntos obtenidos se aproxima a la solución óptima.
- El siguiente punto de la secuencia es seleccionado mediante un cálculo determinista.

Algoritmos genéticos:

- Generan una población de puntos en cada iteración.
- El mejor punto de la población se aproxima a la solución óptima.
- El siguiente punto de la secuencia es seleccionado mediante un cálculo que usa generadores de números aleatorios.

Por último, cabe destacar que en la actualidad existen otros métodos de optimización que incluyen el uso de número aleatorios. Entre ellos destaca el Método de Montecarlo que permite obtener soluciones óptimas, en términos de probabilidad, para ciertos problemas, haciendo uso de grandes cantidades de números aleatorios.

## 2.3 Ventajas y desventajas

A continuación, se enumeran algunas ventajas e inconvenientes de los Algoritmos Genéticos.

Ventajas:

- Pueden tratar una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas.
- No se necesitan conocimientos específicos sobre el problema a resolver.
- Operan con varias soluciones de forma simultánea, en lugar de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.

Desventajas:

- Si se generan problemas de diversidad puede converger a un máximo local en lugar de global.
- En problemas de alta complejidad en los que se necesite una solución muy precisa el coste computacional puede ser demasiado alto.

### 3 MODELO DEL SISTEMA

Como se comentó anteriormente, en la literatura se han propuesto diferentes técnicas para la recolección de energía a partir de vibraciones del ambiente [2]:

- Piezoelectricidad: Uso materiales piezoeléctricos para convertir su deformación en electricidad.
- Electromagnetismo: Un imán al moverse induce una corriente eléctrica en una bobina.
- Electroestática: El desplazamiento relativo de dos placas capacitivas genera una diferencia de potencial.

Este trabajo se centrará en la generación de energía a partir de materiales piezoeléctricos. Los materiales piezoeléctricos son materiales cristalinos con la propiedad de que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, adquieren una polarización eléctrica y aparece una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este sucede también a la inversa (un campo eléctrico crea unas tensiones mecánicas en el material), siendo este comportamiento, en general, reversible, recuperando el material su forma inicial al desaparecer la excitación.

Esta propiedad de los materiales piezoeléctricos les permite absorber energía mecánica en forma de vibraciones de su entorno y transformarla en energía eléctrica. Existen diferentes diseños en la literatura para crear un recolector de energía a partir de materiales piezoeléctricos. En la siguiente figura se muestra uno de ellos [17].

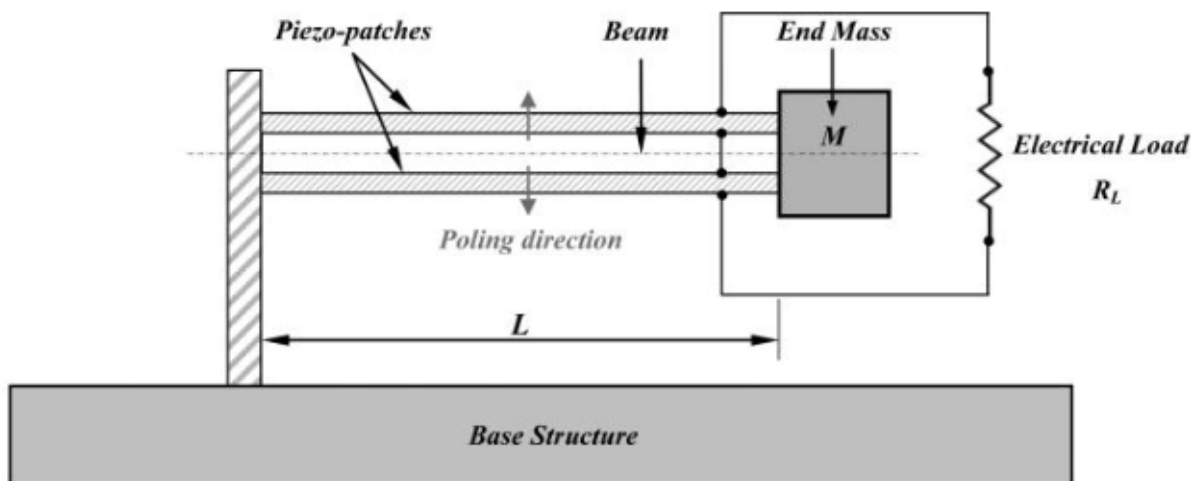


Figura 3-1. Ejemplo diseño de colector con material piezoeléctrico.

La imagen anterior se corresponde con uno de los modelos más comunes usados en la literatura, que está formado por dos placas simétricas de material piezoeléctrico una a cada lado de una barra. En este ejemplo en concreto la conexión es en serie, pero en la literatura pueden encontrarse ambos casos, pudiéndose consultar las ventajas e inconvenientes de cada uno en la Ref. [18].

En los siguientes apartados se introduce el modelo del sistema, que se ha usado en este trabajo, y se calcula la energía generada por él. Por último, se muestran unos ejemplos de la respuesta del sistema, cuando la entrada son diferentes señales armónicas.

### 3.1 Descripción del modelo

La mayoría de los modelos usados en la literatura, para calcular la potencia generada por un colector piezoeléctrico, son modelos de un grado de libertad. Este tipo de modelos permiten obtener una buena primera estimación, de una forma sencilla y con un coste computacional pequeño, comparado con el de modelos más complejos. En este trabajo se ha decidido usar el modelo de un grado de libertad, desarrollado en [19] para predecir la potencia generada en sistemas con acoplamiento electromecánico. Las ecuaciones que definen el comportamiento del sistema son las siguientes:

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) - \theta v(t) = F(t) \quad (3-1)$$

$$\theta\dot{z}(t) + C_p\dot{v}(t) + \frac{v(t)}{R} = 0 \quad (3-2)$$

Donde  $z$  es el desplazamiento,  $m$  la masa del Sistema,  $c$  el amortiguamiento,  $k$  la rigidez,  $\theta$  el acoplamiento electromecánico,  $v$  el voltaje,  $F$  la fuerza externa,  $C_p$  la capacidad eléctrica y  $R$  la resistencia de la carga conectada al sistema. Es interesante destacar que se ha considerado despreciable la masa del resto de componentes de sistema, con respecto a la masa de estudio  $m$ .

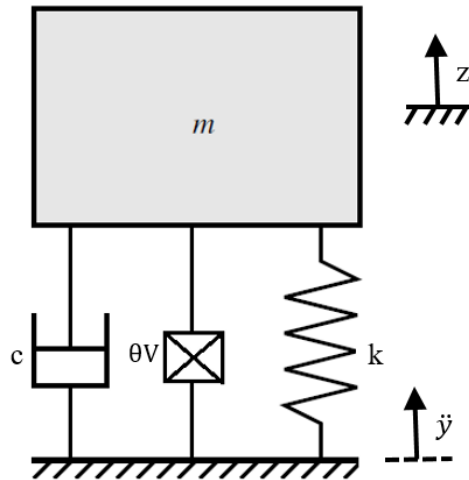


Figura 3-2. Modelo mecánico del sistema

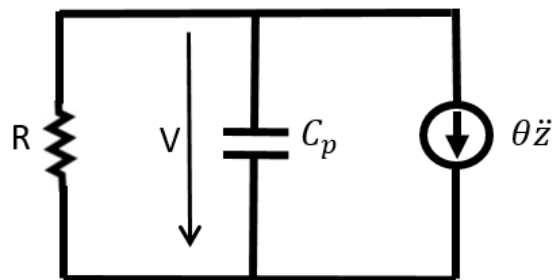


Figura 3-3. Modelo eléctrico del sistema

Teniendo en cuenta que la fuerza externa está asociada al movimiento de la base:

$$F = -m\ddot{y}(t) \quad (3-3)$$



donde  $\ddot{y}$  es la aceleración de la base. Considerando esto en la ecuación 3.1 y dividiendo toda la ecuación entre la masa obtenemos:

$$\ddot{z}(t) + \frac{c}{m}\dot{z}(t) + \frac{k}{m}z(t) - \frac{\theta}{m}v(t) = -\ddot{y}(t) \quad (3-4)$$

Introduciendo las expresiones del factor de amortiguamiento ( $\zeta$ ) y la frecuencia natural ( $\omega_n$ ) en la ecuación 3.3 obtenemos:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-5)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (3-6)$$

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{z}(t) + \omega_n^2z(t) - \frac{\theta}{m}v(t) = -\ddot{y}(t) \quad (3-7)$$

Las ecuaciones que nos quedan para modelar el comportamiento del sistema son:

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{z}(t) + \omega_n^2z(t) - \frac{\theta}{m}v(t) = -\ddot{y}(t) \quad (3-8)$$

$$\theta\dot{z}(t) + C_p\dot{v}(t) + \frac{v(t)}{R} = 0 \quad (3-9)$$

Tenemos dos ecuaciones diferenciales con dos incógnitas. Para simplificar estas ecuaciones podemos tener en cuenta que el movimiento de la base,  $y(t)$ , se puede expresar como una suma de funciones armónicas. Si la entrada,  $y(t)$ , es una función armónica, las salidas,  $z(t)$  y  $v(t)$ , serán también una función armónica. Usando este razonamiento podemos simplificar el problema, pasando de resolver dos ecuaciones diferenciales, a resolver dos ecuaciones algebraicas.

Partimos de una excitación de la forma (en todos los términos se va a omitir el ángulo de desfase por simplificar la notación):

$$y = Ysen(\bar{\omega}t) \quad (3-10)$$

Las salidas serán de la forma:

$$z = Zsen(\bar{\omega}t) \quad (3-11)$$

$$v = Vsen(\bar{\omega}t) \quad (3-12)$$

Calculando las derivadas obtenemos:

$$\dot{y} = \bar{\omega}Ycos(\bar{\omega}t) = i\bar{\omega}Ysen(\bar{\omega}t) \quad (3-13)$$

$$\ddot{y} = -\bar{\omega}^2Ysen(\bar{\omega}t) \quad (3-14)$$

$$\dot{z} = \bar{\omega}Zcos(\bar{\omega}t) = i\bar{\omega}Zsen(\bar{\omega}t) \quad (3-15)$$

$$\ddot{z} = -\bar{\omega}^2Zsen(\bar{\omega}t) \quad (3-16)$$

$$\dot{v} = \bar{\omega}Vcos(\bar{\omega}t) = i\bar{\omega}Vsen(\bar{\omega}t) \quad (3-17)$$

Sustituyendo en las ecuaciones 3-8 y 3-9 y eliminando el seno de todos los términos de la ecuación obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-\bar{\omega}^2 Z + i2\zeta\omega_n\bar{\omega}Z + \omega_n^2 Z - \frac{\theta}{m}V = \bar{\omega}^2 Y \quad (3-18)$$

$$i\bar{\omega}\theta Z + i\bar{\omega}C_p V + \frac{V}{R} = 0 \quad (3-19)$$

Llegados a este punto es interesante identificar la función de cada uno de los términos que aparecen en la ecuación para poder resolverla. El término  $Y$  está asociado a las cargas externas y será un valor obtenido a partir de medidas experimentales. Los términos  $\theta$  y  $C_p$  son propiedades del material piezoeléctrico, que dependen del tipo de material y de la geometría. El término  $R$  es la resistencia de la carga. En este trabajo se han usado como valores de referencia para  $\theta$ ,  $C_p$  y  $R$  los valores mostrados en la Tabla 3-1, que se han obtenido de la Ref. [19]. Se deja para trabajos futuros la posibilidad de incluir las propiedades del material piezoeléctrico y la resistencia de la carga como variables de optimización del sistema.

Tabla 3-1. Propiedades Material Piezoeléctrico y valor de la carga

Variable	Valor
Acoplamiento Electromecánico ( $\theta$ )	$2.34 \cdot 10^{-4} \text{ N.V}^{-1}$
Capacidad eléctrica ( $C_p$ )	2.24 nF
Resistencia de la carga ( $R$ )	364 k $\Omega$

Los términos  $m$ ,  $\zeta$  y  $\omega_n$  son las variables de optimización del sistema, que se calcularán mediante el uso de los algoritmos genéticos, como se comentó en el capítulo 2. Por último, los términos  $V$  y  $Z$  son las incógnitas del sistema, que una vez resuelto, se usarán para calcular la energía, que es la variable de optimización.

Reagrupando y operando, con las ecuaciones 3-18 y 3-19, obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones algebraicas que se resuelve de forma sencilla en MATLAB con el comando  $x = A \setminus b$ .

$$\begin{bmatrix} -\bar{\omega}^2 + i2\zeta\omega_n\bar{\omega} + \omega_n^2 & -\frac{\theta}{m} \\ \theta & C_p - \frac{i}{\bar{\omega}R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\omega}^2 Y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

Una vez conocidos en desplazamiento ( $Z$ ) y el voltaje ( $V$ ) podemos calcular la potencia y la energía como se muestra en el siguiente apartado.

## 3.2 Cálculo de Potencia y Energía

La potencia eléctrica se calcula como:

$$P_{e,ins} = v(t)I(t) \quad (3-21)$$

Aplicando la ley de Ohm,  $v = IR$ , obtenemos:

$$P_{e,ins}(t) = \frac{v^2}{R} = \frac{V^2 \sin^2(\bar{\omega}t)}{R} \quad (3-22)$$

Por último, la variable que nos interesa calcular es la energía eléctrica. La energía eléctrica es la función a maximizar por los algoritmos genéticos, que se encargarán de buscar los valores de masa, factor de amortiguamiento y frecuencia natural del sistema para que la energía generada sea máxima, para unos valores de aceleración del base y propiedades del material piezoeléctrico dados.

La energía se ha calculado en el dominio de la frecuencia y se ha discretizado, convirtiendo la integral en un sumatorio:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |P(f)|^2 df = \sum_n |P_n|^2 \Delta f \quad (3-23)$$

Como se comentó anteriormente, el objetivo principal de este trabajo es optimizar las características mecánicas de un sistema (masa, rigidez y amortiguamiento) para obtener valores óptimos de la energía recolectada de las vibraciones del ambiente. El valor real de los resultados que obtengamos dependerá de la precisión de la solución obtenida con los algoritmos genéticos y de la similitud entre el modelo definido en este apartado y el sistema real. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para una serie de ejemplos en los cuales se ha creado la entrada del sistema a partir de funciones armónicas.

### 3.3 Ejemplos con funciones armónicas.

Se han realizado diferentes pruebas, para comprobar la efectividad de los algoritmos genéticos y como la frecuencia natural del sistema se sintoniza con las frecuencias naturales de las vibraciones externas. En este apartado se muestra la solución a varios ejemplos, en los cuales se han creado las entradas del sistema (aceleraciones) con diferentes funciones armónicas.

#### 3.4.1 Aceleración con un armónico

En este apartado se ha modelado la aceleración de la base del sistema como una función armónica de frecuencia 50 Hz y de amplitud unidad. Ver figura 3-4.

$$\dot{y} = \text{sen}(2\pi 50t) \quad (3-24)$$

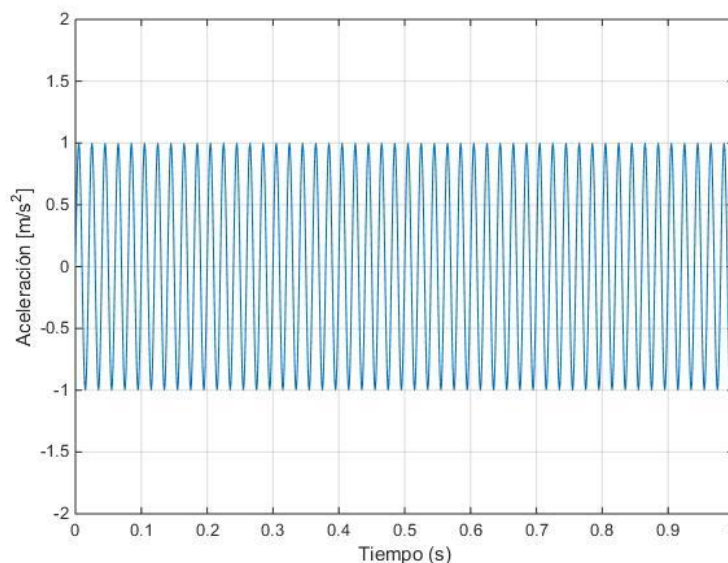


Figura 3-4. Aceleración a 50 Hz

En todos los casos en este capítulo se han limitado entre 1 y 100 los valores de la masa (en gramos), la rigidez (en N/m) y el factor de amortiguamiento (en %). Cabe recordar que, para el uso de los algoritmos genéticos, es necesario que el rango de valores de las variables de optimización sea similar. Esto es necesario porque, como se comentó en el capítulo anterior, el algoritmo durante el proceso de optimización intercambia los valores de las diferentes variables (cruzamiento). Por lo tanto, para que el funcionamiento del algoritmo sea correcto, es necesario que todas las variables tengan rangos de valores similares. Los rangos de valores seleccionados en este trabajo se han elegido para evitar obtener resultados sin sentido físico.

Los valores de masa, rigidez, amortiguamiento, factor de amortiguamiento y frecuencia natural que optimizan la energía y el valor de la energía generada se muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Valores de la solución para aceleración a 50 Hz

Variable	Valor
Masa (m)	54.647 gr
Rigidez (k)	5349.952 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	49.798 Hz
Amortiguamiento (c)	0.342 N/m.s
Factor de amortiguamiento ( $\zeta$ )	0.01
Energía (E)	0.344 mJ

De los datos anteriores cabe destacar como el valor de la frecuencia natural del sistema se sintoniza con la frecuencia natural de las vibraciones (50 Hz). Es interesante notar como se tiende al factor de amortiguamiento mínimo, dentro del rasgo establecido, lo cual hace que aumente el tiempo de vibración del sistema y así la cantidad de energía obtenida. En cuanto a la masa, rigidez se obtienen valores razonables comparando con los mostrados en la literatura para problemas de este tipo. Por último, se puede comprobar cómo se obtiene un valor pequeño de la energía.

A continuación, se representan las diferentes funciones de respuesta en frecuencia del sistema. En primer lugar, se representan el voltaje generado y el desplazamiento del sistema con respecto a la frecuencia en Hercios. En ambas figuras se puede comprobar como el máximo voltaje y el máximo desplazamiento se producen a la frecuencia de 50 Hz, coincidiendo con la resonancia del sistema.

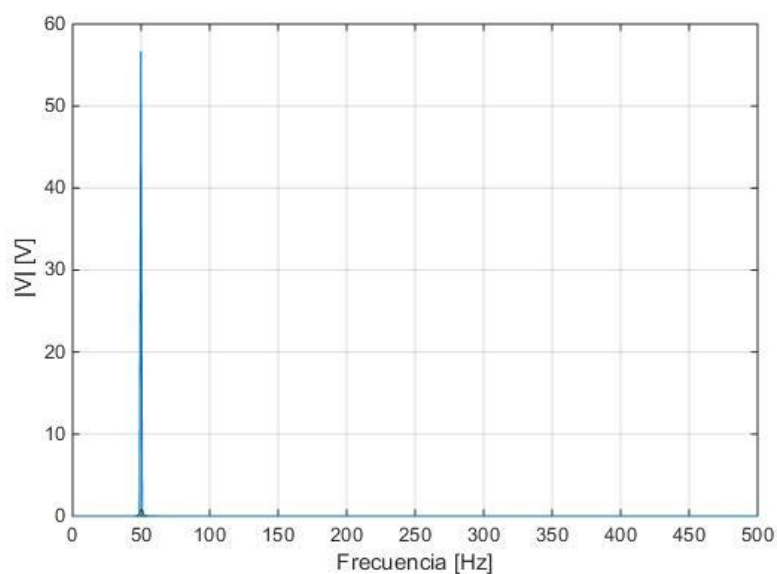


Figura 3-5. Voltaje generado. Aceleración a 50 Hz

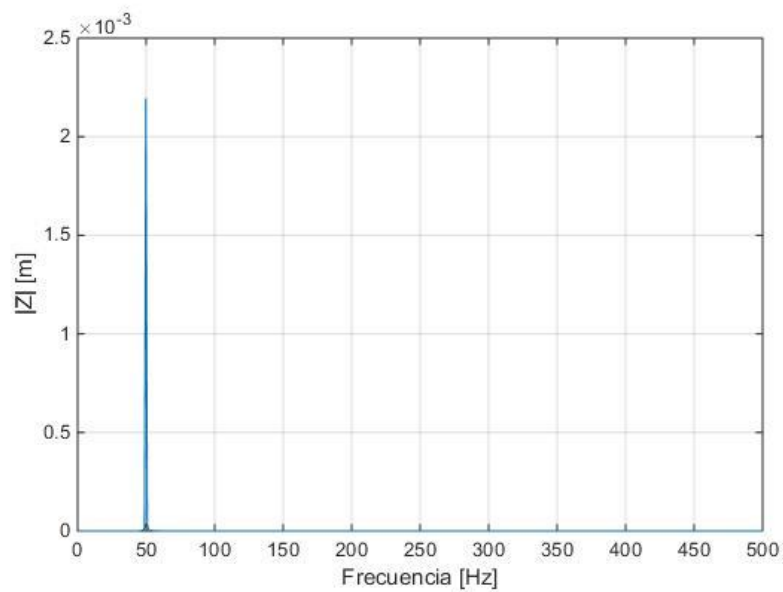


Figura 3-6. Desplazamiento del sistema. Aceleración a 50 Hz

Por último, se representa la potencia eléctrica generada con respecto a la frecuencia, al igual que en el caso del voltaje y el desplazamiento. Se puede comprobar que la máxima potencia se produce a 50 Hz, coincidiendo con la resonancia del sistema.

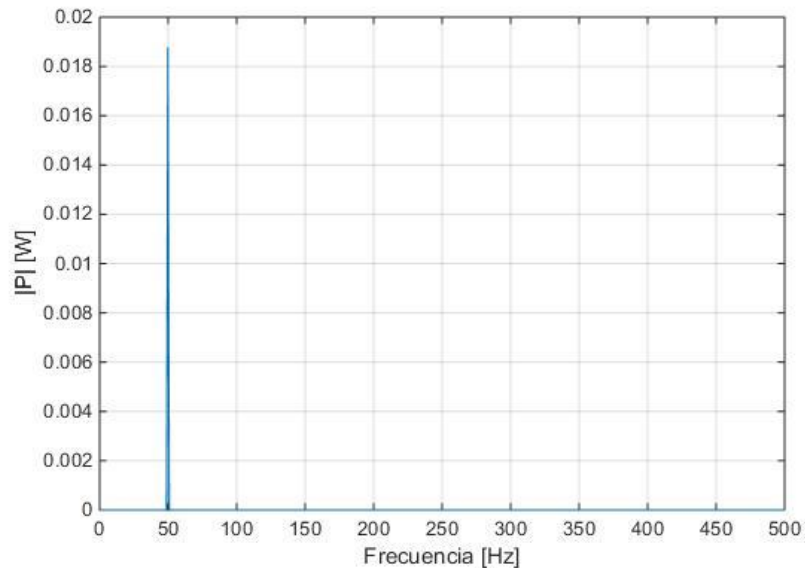


Figura 3-7. Potencia generada por el sistema. Aceleración a 50 Hz

En esta figura, es interesante notar como los valores máximos de potencia obtenidos son del orden de los encontrados en la literatura [19].

A continuación, para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de optimización, vamos a modificar la función anterior con un ruido aleatorio de media cero. Introduciremos dos tipos de ruido, un ruido fuerte que modificará en gran medida la señal y otro más pequeño que modificará la señal en menor medida. A continuación, se muestran las dos señales modificadas.

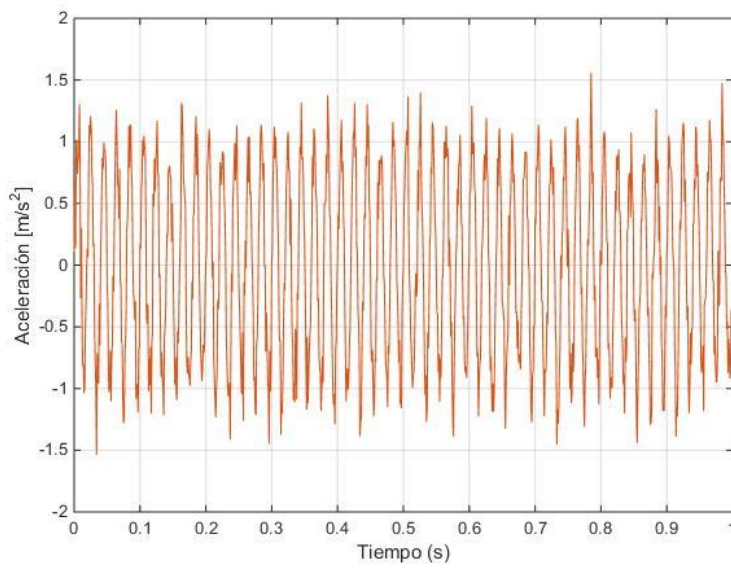


Figura 3-8. Aceleración a 50 Hz con ruido leve

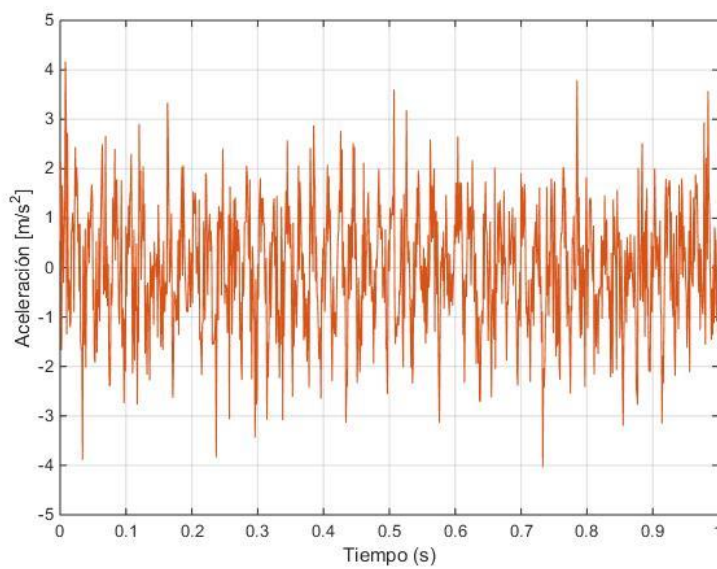


Figura 3-9. Aceleración a 50 Hz con ruido fuerte

En primer lugar, se muestran, en la Tabla 3-3, los resultados obtenidos para las aceleraciones con ruido leve (mostradas en la figura 3-8).

Tabla 3-3. Valores de la solución para aceleración a 50 Hz con ruido leve

Variable	Valor
Masa (m)	54.767 gr
Rigidez (k)	5361.700 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	49.798 Hz
Amortiguamiento (c)	0.3427 N/m.s
Factor de amortiguamiento ( $\zeta$ )	1
Energía (E)	0.352 mJ

Comparando estos resultados con los de la Tabla 3-2, obtenidos para la señal sin ruido, podemos comprobar que son muy similares. De nuevo la frecuencia sintonizada es 50Hz, coincidiendo con la frecuencia de la señal creada. El valor de las propiedades mecánicas es similar y la energía obtenida ligeramente mayor.

A continuación, se muestran, en la Tabla 3-4, los resultados obtenidos para las aceleraciones modificadas con ruido fuerte (mostradas en la figura 3-9).

Tabla 3-4. Valores de la solución para aceleración a 50 Hz con ruido fuerte

Variable	Valor
Masa (m)	54.689 gr
Rigidez (k)	5364.063 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	49.798 Hz
Amortiguamiento (c)	0.3422 N/m.s
Factor de amortiguamiento ( $\zeta$ )	0.01
Energía (E)	0.382 mJ

Comparando estos resultados con los de la Tabla 3-2, obtenidos con la señal sin ruido, encontramos de nuevo unos resultados similares. El algoritmo, a pesar del ruido introducido, consigue encontrar la frecuencia óptima y se sintoniza en una frecuencia cercana a los 50 Hz. Los valores de masa, rigidez y amortiguamiento son muy similares a los obtenidos en los dos casos anteriores. Cabe destacar que la energía obtenida en este caso es del orden de las obtenidas anteriormente, pero ligeramente mayor. Esto se debe a que al introducir el ruido estamos aumentando las vibraciones lo cual permite al sistema aumentar, ligeramente, la energía recolectada. Esto sucede en este caso debido a que el ruido no modifica lo suficiente la señal como para hacer que el sistema se desintonice.

En las Figuras 3-10, 3-11 y 3-12 se muestra el contenido en frecuencia de las tres señales. En ellas podemos observar como el ruido modifica la señal, pero sigue existiendo un pico claro en torno a 50Hz. Por último, en la Figura 3-13, se compara la potencia generada en los tres casos y se puede observar que, al igual que la energía, es similar en los tres casos analizados.

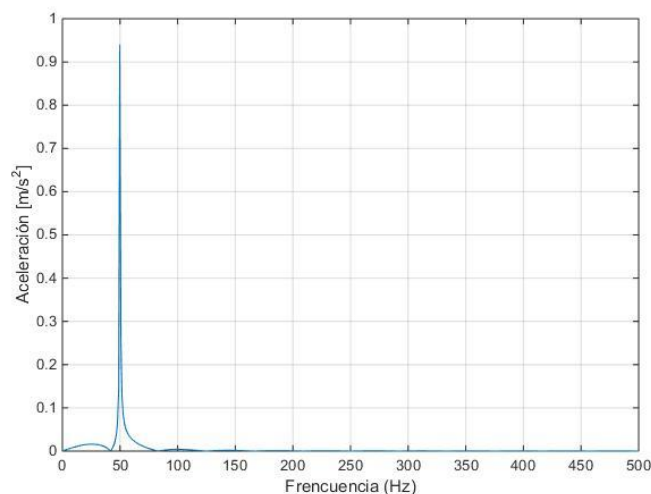


Figura 3-10. Aceleración a 50 Hz sin ruido. Dominio de la frecuencia

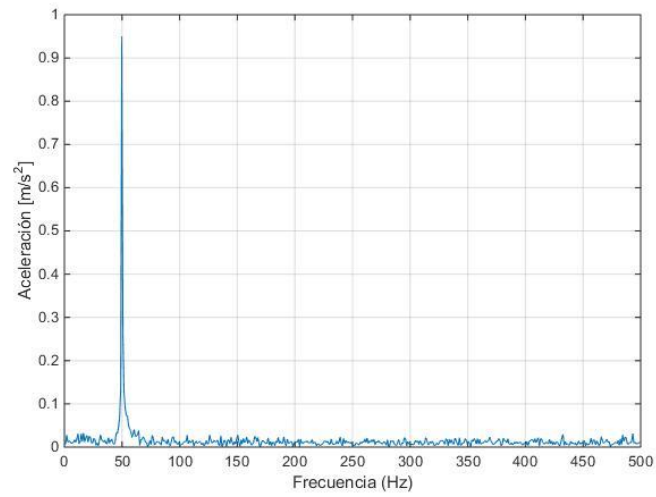


Figura 3-11. Aceleración a 50 Hz con ruido leve. Dominio de la frecuencia

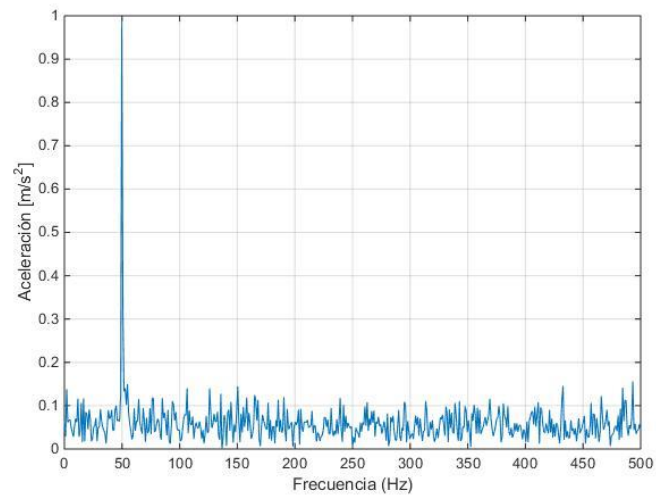


Figura 3-12. Aceleración a 50 Hz con ruido leve. Dominio de la frecuencia

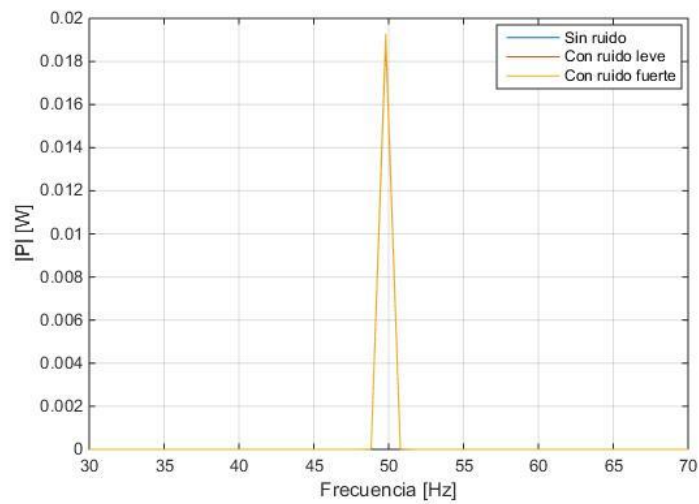


Figura 3-13. Potencia generada sin ruido, con ruido leve y con ruido fuerte. Aceleración a 50 Hz



### 3.4.2 Aceleración con dos armónicos

En este apartado se va estudiar el comportamiento del sistema, cuando la aceleración de la base es una suma de dos funciones armónicas de amplitud unidad. Las frecuencias elegidas en este caso son 40Hz y 60Hz. Ver figuras 3-14 y 3-15.

$$\ddot{y} = \text{sen}(2\pi 40t) + \text{sen}(2\pi 60t) \quad (3-25)$$

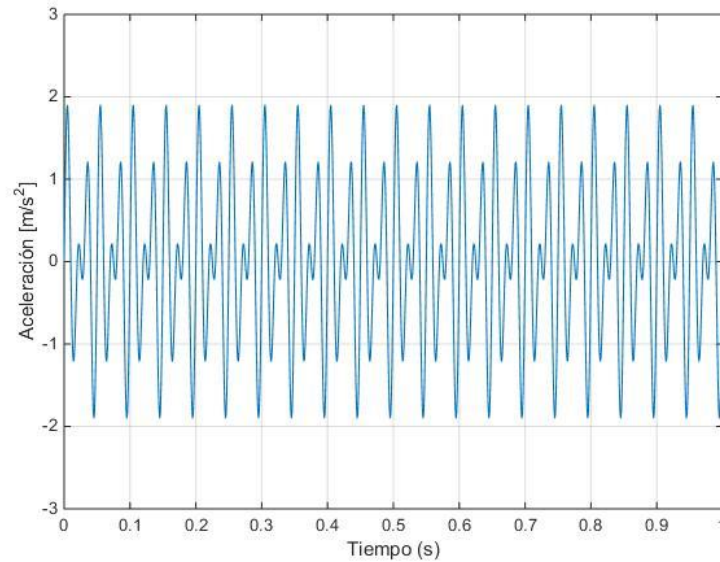


Figura 3-14. Aceleración a 40 y 60 Hz

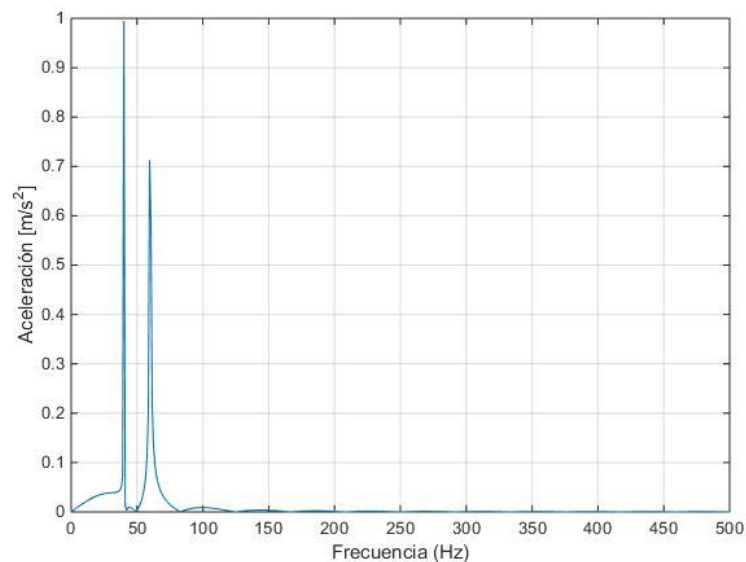


Figura 3-15. Aceleración a 40 y 60 Hz. Dominio de la frecuencia

Aplicando el algoritmo de optimización obtenemos los valores de masa, rigidez, amortiguamiento, factor de amortiguamiento y frecuencia natural que optimizan la energía recolectada por el sistema. Estos datos se muestran en la Tabla 3-5.

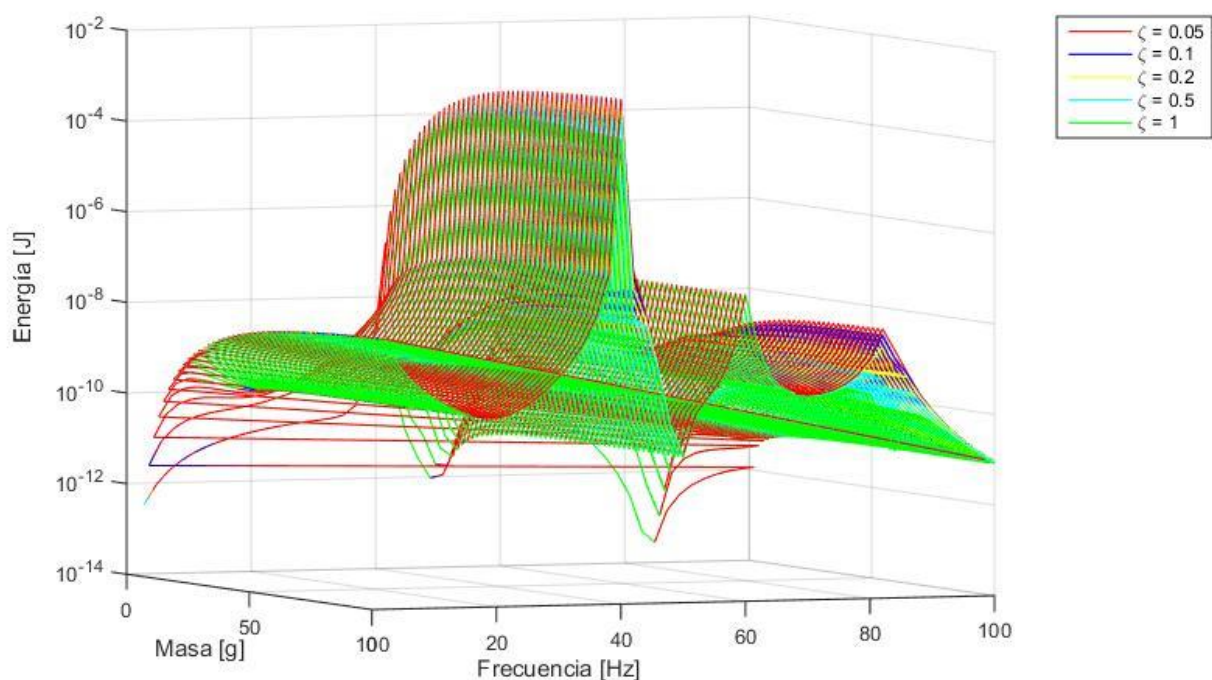
Tabla 3-5. Valores de la solución para aceleración a 40 y 60 Hz

Variable	Valor
Masa (m)	50.748 gr
Rigidez (k)	3210.812 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	40.033 Hz
Amortiguamiento (c)	0.2556 N/m.s
Factor de amortiguamiento ( $\zeta$ )	0.01
Energía (E)	0.553 mJ

Observando los resultados de la tabla podemos ver que, en este ejemplo, el sistema se sintoniza a la frecuencia de 40Hz. La más baja de las dos que componen la señal generada. Los valores de masa, amortiguamiento y rigidez son similares a los obtenidos en los casos del apartado anterior. Es interesante notar que, en este caso, la energía obtenida es aproximadamente un 60% superior a la del caso anterior sin ruido. Esto se debe al hecho de que en este caso la excitación está compuesta por dos funciones armónicas cercanas entre ellas (ver figura 3-14). De esta forma, aunque el sistema está sintonizado a 40 Hz captura parte de la energía de la señal a 60 Hz.

Se han realizado diferentes pruebas con señales creadas con funciones armónicas a dos frecuencias diferentes y se ha concluido que, en general, el sistema tiende a sintonizarse con la frecuencia más baja de las dos posibles. Para entender mejor esto, a continuación, se muestran dos figuras.

En la primera de ellas, Figura 3-16. Se ha dejado constante el factor de amortiguamiento, en diferentes valores (0.05 0.1 0.2 0.5 1), y se han barrido las variables masa y frecuencia natural con valores desde dos hasta cien, calculando la energía para cada combinación de puntos. Los resultados se representan en la Figura 3-16.

Figura 3-16. Energía con respecto a la masa y la frecuencia para diferentes valores de  $\zeta$  constante

En esta Figura, se puede comprobar como los valores óptimos de la energía se encuentran en el entorno de la frecuencia de 40 Hz, para valores altos de la masa y para el factor de amortiguamiento mínimo posible, que en esta representación es 0.05. Como era de esperar, existe un segundo punto óptimo (un máximo local) a una frecuencia cercana a los 60 Hz, que es la otra frecuencia que compone la señal armónica. En la imagen se puede observar como existe un tercer punto, por encima de los 80 Hz, que da valores altos de energía, pero claramente inferiores a los obtenidos a 40 y 60 Hz.

Para finalizar, en la siguiente figura se representa la energía con respecto a la masa y el factor de amortiguamiento, para diferentes valores constantes de la frecuencia natural. En esta gráfica se observa el mismo comportamiento que se ha comentado en la figura anterior y se comprueba que el óptimo se encuentra a la frecuencia de 40 Hz, como se indicó en la Tabla 3-5.

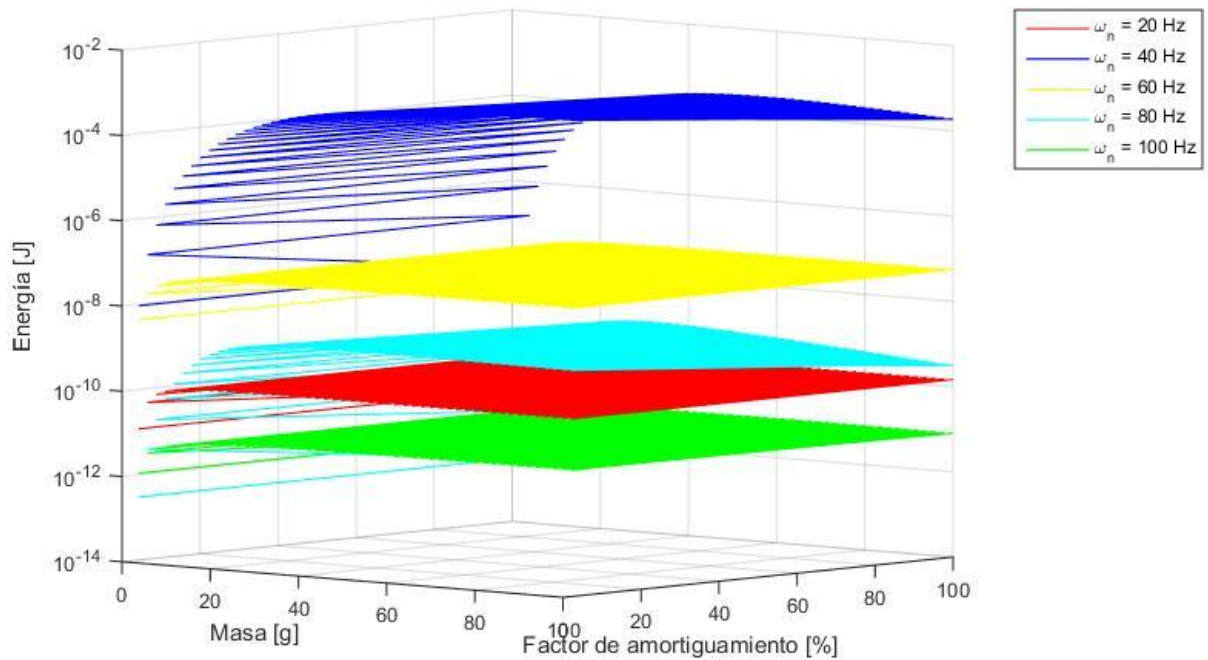


Figura 3-17. Energía con respecto a la masa y al factor de amortiguamiento para diferentes valores de  $\omega_n$  constante



# 4 ANÁLISIS LAVs CÓRDOBA-MÁLAGA Y PARÍS-BRUSELAS

---

En este capítulo se va realizar la estimación de las propiedades mecánicas del sistema, que optimizan la energía absorbida, para diferentes medidas experimentales de vibraciones provocadas por el paso de trenes en Líneas de Alta Velocidad (LAVs).

En primer lugar, se introducen las medidas experimentales utilizadas en cada caso, analizando las frecuencias características más importantes. Las medidas experimentales usadas en este capítulo pertenecen a las LAVs Córdoba-Málaga y París-Bruselas.

En segundo lugar, se calculan los valores óptimos de las propiedades mecánicas del sistema (masa, rigidez y amortiguamiento) con el objetivo de maximizar la energía eléctrica recolectada en cada punto de medida. Para ello, se hace uso de los algoritmos genéticos, como se explicó en el capítulo 2, y se utiliza el modelo de un grado de libertad detallado en el capítulo 3 de este mismo documento.

En tercer lugar, se usan los valores óptimos obtenidos para cada punto, para seleccionar unas variables mecánicas óptimas globales, que sean las que mejor se ajusten al conjunto de medidas experimentales disponibles.

Por último, se compara la energía recolectada por el modelo con variables mecánicas óptimas globales en cada punto de medida experimental, con la máxima energía posible en esos puntos.

## 4.1 Análisis Línea de Alta Velocidad Córdoba-Málaga

### 4.1.1 Medidas Experimentales LAV Córdoba-Málaga

Los datos experimentales utilizados en este apartado fueron registrados por Galvín y Domínguez [20] un mes antes de la inauguración de la LAV Córdoba-Málaga. Cuando el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) organizó los ensayos de homologación de la línea. Durante estos ensayos, los autores de la investigación, registraron las vibraciones inducidas por el tráfico ferroviario en el carril, la traviesa y en distintos puntos de la superficie del suelo.

La vía de la LAV entre Córdoba y Málaga, es una vía sobre balasto de ancho internacional formada por dos carriles UIC 60, situados con sistemas de fijación sobre traviesas prefabricadas de hormigón pretensado, separadas entre sí 0.6 m. Información detallada acerca de la geometría y propiedades de la vía puede consultarse en la Ref. [20].



Figura 4-1. Línea de Alta Velocidad Córdoba Málaga. Imagen obtenida de la Ref. [20]

Los datos usados en este trabajo son las aceleraciones de las vibraciones registradas por los autores de la investigación, durante el paso de un tren TAV S100 circulando a una velocidad de 298 km/h. Estos datos fueron registrados en el carril, la traviesa y en el suelo en puntos situados a 3, 8.6, 11.8, 14.8, 18.1, 21.8, 25.0, 28.34 y 32.3 m del eje de la vía.

A continuación, se representan las aceleraciones en el carril. Los datos utilizados para todas las representaciones de este apartado se han obtenido de Galvín y Domínguez [20].

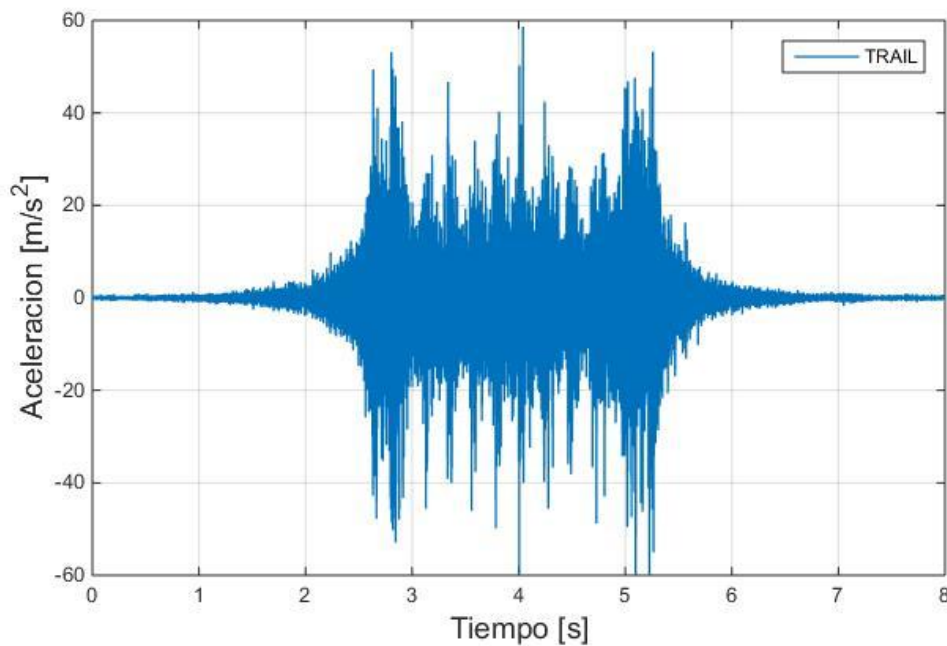


Figura 4-2. Aceleraciones en el carril. LAV Córdoba-Málaga

En esta imagen podemos observar como las máximas aceleraciones producidas están en el entorno de los 50  $m/s^2$ , para una velocidad del tren de 298 km/h. A continuación, se ha pasado la aceleración al dominio de la frecuencia usando la función *fft* de MATLAB, dividiendo entre el número de muestras existentes. La representación en frecuencia se muestra en la Figura 4-3 y nos permite identificar las frecuencias características de las vibraciones generadas por el paso del tren.

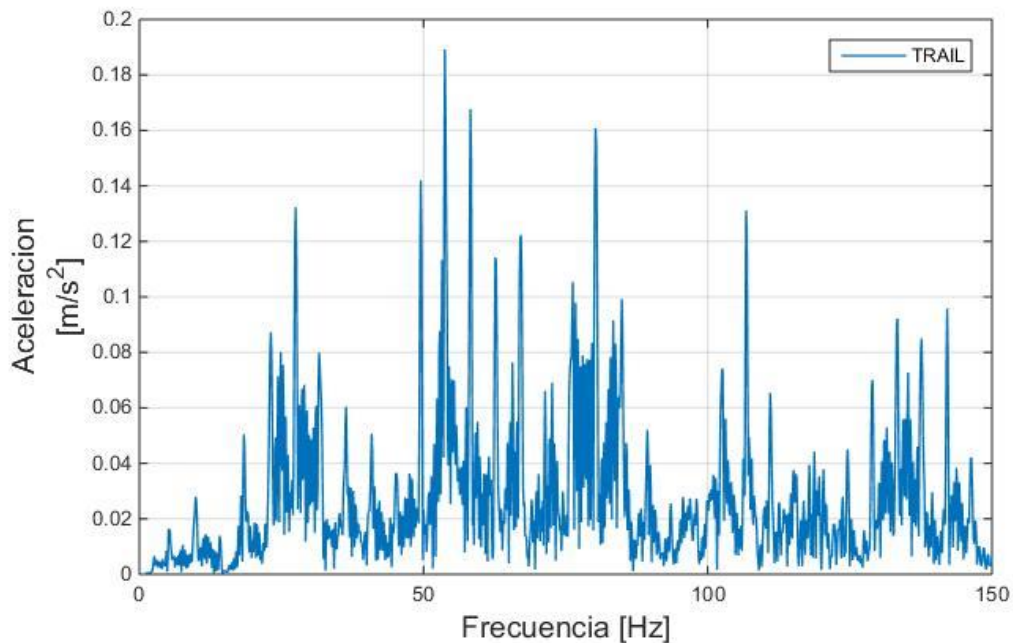
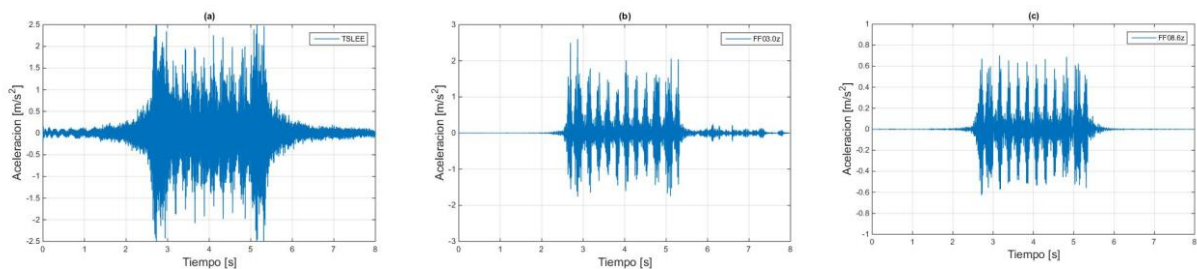


Figura 4-3. Aceleraciones en el carril en el dominio de la frecuencia. LAV Córdoba-Málaga

En la figura, anterior podemos observar picos en las frecuencias características como son, la frecuencia de paso por bogie  $f_b = v/L_b = 4.43 \text{ Hz}$  y sus armónicos superiores relacionados. La frecuencia de paso por eje  $f_e = v/L_e = 27.59 \text{ Hz}$  y la frecuencia de paso por traviesa  $f_t = v/d = 137.96 \text{ Hz}$ . Además, se observan picos también en frecuencias entre 40 y 80 Hz, asociadas a la irregularidad de la vía y las ruedas del tren. Conocer el valor de estas frecuencias será interesante para el análisis de los resultados que se obtendrán en el apartado siguiente. Más información acerca de las características del tren y del cálculo de estas frecuencias características puede encontrarse en la Ref. [20].

A continuación, se representan las aceleraciones en el dominio del tiempo y la frecuencia para el resto de puntos de medida.



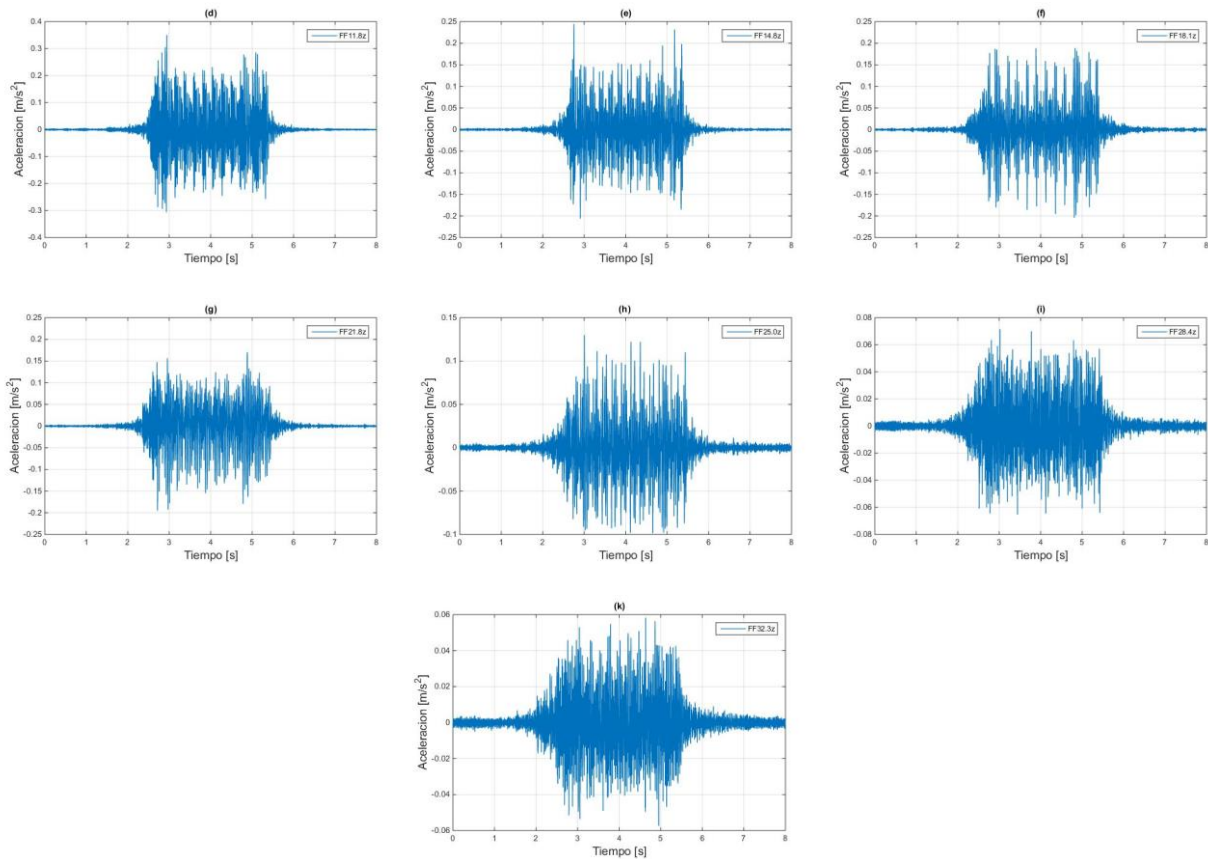
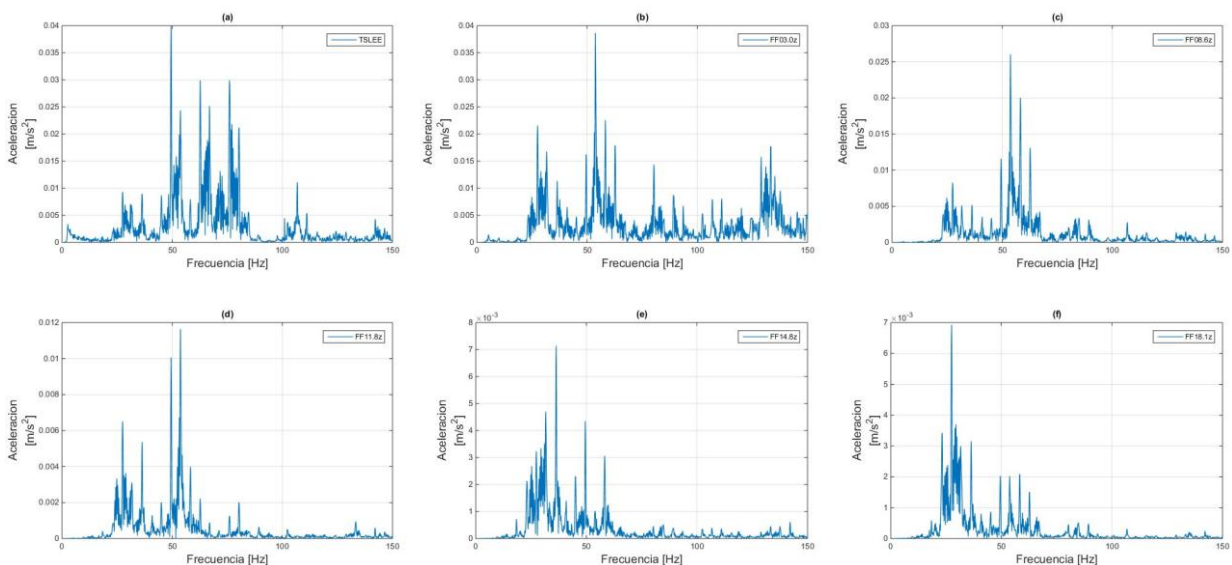


Figura 4-4. Aceleraciones en (a) traviesa, (b) 3 m, (c) 8.6 m, (d) 11.8m, (e) 14.8 m, (f) 18.1 m, (g) 21.8 m, (h) 25 m, (i) 28.4 m, (j) 32.3 m. LAV Córdoba-Málaga

En la Figura 4-4 se muestran las aceleraciones en el resto de puntos de medida. Se puede observar como al aumentar la distancia disminuye la amplitud de las aceleraciones, debido al amortiguamiento geométrico e interno del suelo.

Por último, en la Figura 4-5, se muestran las aceleraciones en el dominio de la frecuencia en el resto de puntos. Al igual que en el caso anterior se puede observar la disminución de la amplitud con la distancia y picos en las frecuencias características comentadas anteriormente.





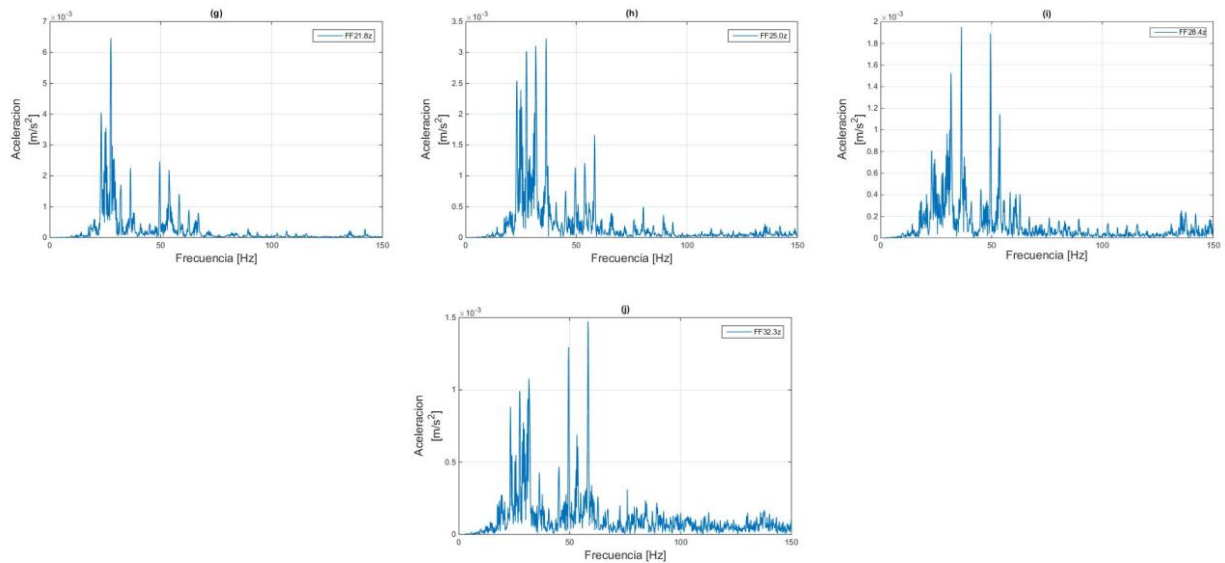


Figura 4-5. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia en (a) traviesa, (b) 3 m, (c) 8.6 m, (d) 11.8m, (e) 14.8 m, (f) 18.1 m, (g) 21.8 m, (h) 25 m, (i) 28.4 m, (j) 32.3 m. LAV Córdoba-Málaga

#### 4.1.2 Optimización de la Energía Recolectada para la LAV Córdoba-Málaga

En este apartado, a través de los algoritmos genéticos, se optimizará el valor de las variables mecánicas del modelo para maximizar la energía recolectada de las vibraciones detalladas en el apartado anterior. Para cada punto de medida, se calculan las variables óptimas del modelo y la energía eléctrica generada por el sistema. A continuación, se muestran las representaciones gráficas de los valores óptimos obtenidos para todas las variables, con respecto a la distancia. En todos los casos se ha limitado, para obtener resultados con sentido físico, la masa entre 1 y 100 gramos, la frecuencia natural entre 1 y 150 Hz y el factor de amortiguamiento entre 0.01 y 1.

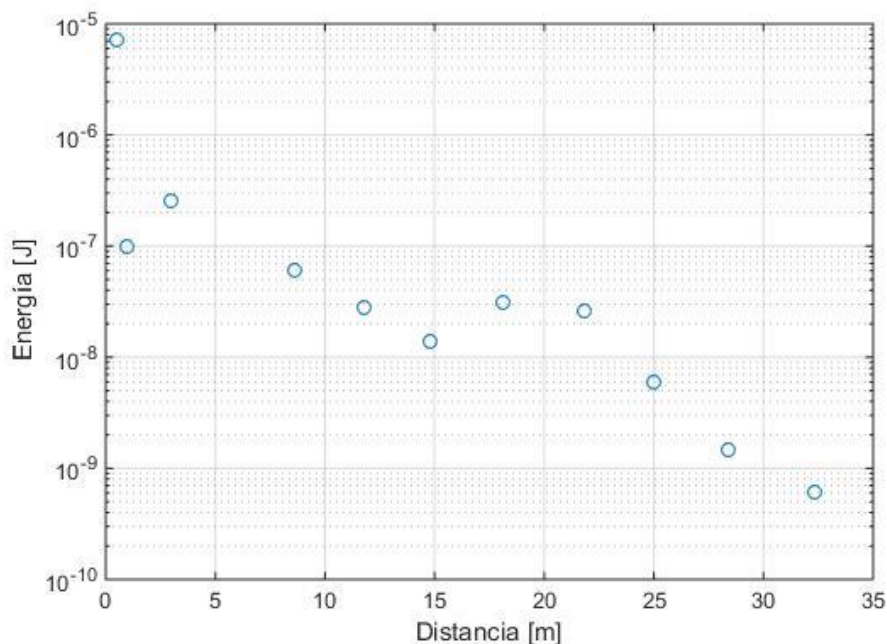


Figura 4-6. Energía máxima generada en cada punto. LAV Córdoba-Málaga

En la figura anterior, se representa la energía máxima que se puede obtener en cada punto con respecto a la distancia a la que se encuentra del eje de la vía. En esta imagen se puede observar como en general la energía máxima generada disminuye, al aumentar la distancia. Esto es normal debido a que el amortiguamiento del suelo hace que la amplitud de las vibraciones disminuya al aumentar la distancia. Adicionalmente, es interesante notar que los valores de energía generados son pequeños. Esto hará necesario, como ya predijeron Williams y Yates [3], que el sistema recolecte energía durante un período de tiempo. Para luego de forma puntual, registrar y enviar los datos de interés. Por lo tanto, el sistema de envío de datos asociado tendría que funcionar de forma puntual, no continua.

En la Figura 4-7, se muestra la frecuencia natural a la cual se sintoniza el sistema para cada punto de medida. Se puede observar que existen ciertos puntos en los cuales el sistema se sintoniza a frecuencias cercanas a 55 Hz, asociadas a las irregularidades de la vía y las ruedas del tren. De esta figura cabe destacar que, en la mayoría de los casos, el sistema se sintoniza a frecuencias cercanas a las 30 Hz. Como se comentó anteriormente, la frecuencia de paso por eje en este caso es de 27.59 Hz. Por lo tanto, se puede concluir que, en general, para obtener la máxima energía en la LAV Córdoba-Málaga lo ideal es sintonizar el sistema a una frecuencia cercana a la frecuencia de paso por eje. Existiendo casos puntuales en los cuales sería más óptimo sintonizar el sistema a frecuencias más altas.

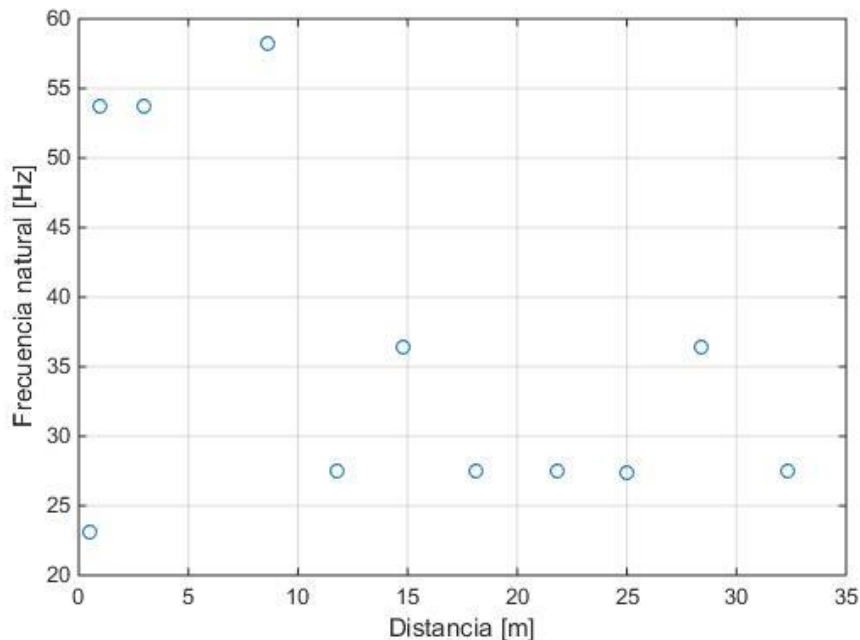


Figura 4-7. Frecuencia a la que se sintoniza el sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga

En las Figuras 4-8 y 4-9 se representan los valores óptimos de masa y rigidez para cada punto. Observando la Figura 4-8, podemos concluir que en la mayoría de los casos los valores óptimos de la masa se encuentran entre 60 y 85 gramos. En el caso de la rigidez, en la Figura 4.9, podemos observar que en la mayoría de los casos la rigidez óptima está en el entorno de los 2000 N/m, existiendo casos puntuales en los cuales el valor óptimo de la rigidez óptima es mucho mayor, cercano a los 7000 N/m.

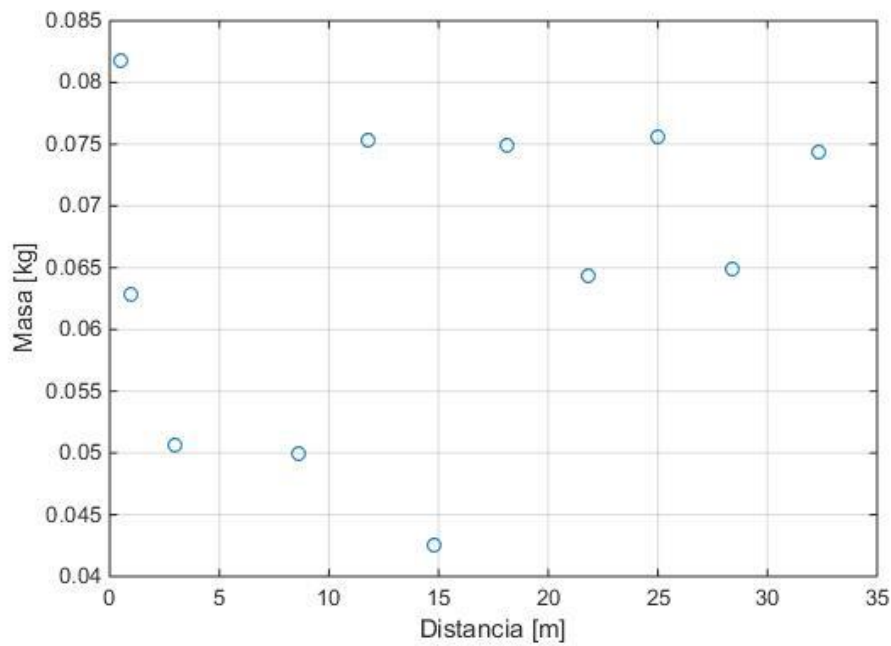


Figura 4-8. Masa óptima del sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga

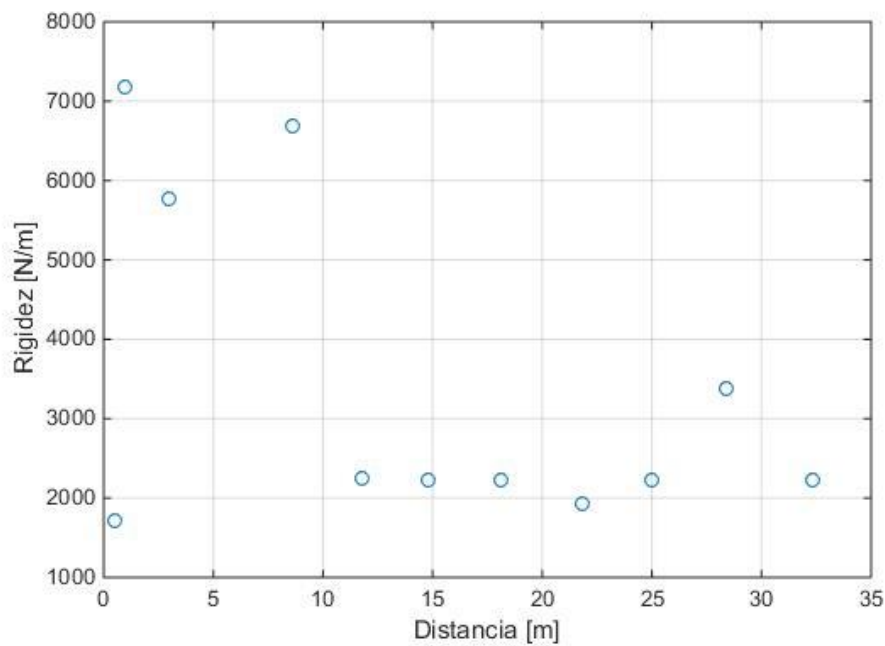


Figura 4-9. Rigidez óptima del sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga

Por último, en la Figura 4.10 se representan los valores óptimos del amortiguamiento para cada punto. Se puede observar que en el amortiguamiento óptimo se encuentra comprendido entre 0.2 y 0.45 N/m.s. Con respecto a esto, cabe destacar que en todos los casos se tiende a un valor del factor de amortiguamiento de 0.01, el mínimo posible. Este resultado tiene sentido, ya que valores pequeños de amortiguamiento permitirán un mayor tiempo de vibración y, por lo tanto, mayor recolección de energía.

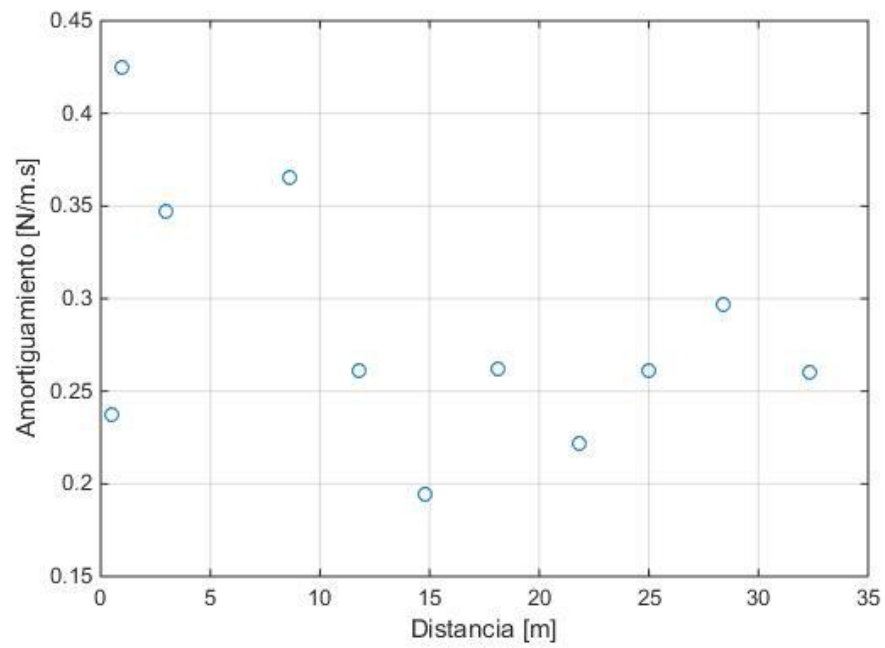


Figura 4-10. Amortiguamiento óptimo del sistema en cada punto. LAV Córdoba-Málaga

## 4.2 Análisis Línea de Alta Velocidad París- Bruselas

### 4.2.1 Medidas Experimentales LAV París-Bruselas

Los datos experimentales usados en este apartado fueron registrados por Degrande y Schillemand [21]. Seis semanas antes de la inauguración de la LAV París-Bruselas, en el mes de diciembre de 1997, el administrador ferroviario belga organizó los ensayos de homologación de la vía. Durante estos ensayos, los autores de la investigación, registraron la respuesta producida en distintos puntos del suelo, por el paso de un tren Thalys a velocidades comprendidas entre 160 y 330 km/h.

La vía de la LAV París-Bruselas es una vía de balasto con carriles UIC 60, fijados con sistemas de fijación Pandroll E2039, sobre traviesas de hormigón pretensado separadas 0.6 m entre sí. Información detallada acerca de la geometría y propiedades de la vía puede consultarse en la Ref. [21].

Los datos usados en este trabajo fueron registrados en el carril, la traviesa y en el suelo, en puntos situados a 4, 6, 8, 12, 16, 24, 32, 40, 56 y 72 m del eje de la vía, como se muestra en la figura siguiente, obtenida de la Ref. [21].

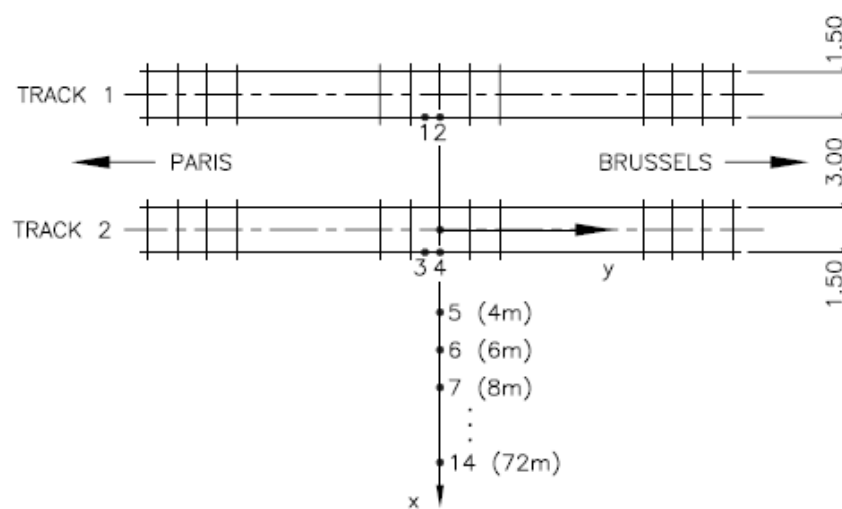


Figura 4-11. Puntos de medida. LAV París-Bruselas

Los autores de la investigación registraron la pasada de nueve trenes, a velocidades comprendidas entre 223 km/h y 314 km/h. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los diferentes eventos registrados.

Tabla 4-1. Paso de trenes registrados por las vías 1 y 2. LAV París-Bruselas

Evento	Vía	Dirección	Velocidad [km/h]
t11	1	P-B	223
t12	1	B-P	265
t13	1	P-B	272
t14	1	P-B	302
t21	2	B-P	256
t22	2	P-B	271
t23	2	B-P	289
t24	2	P-B	300
t25	2	B-P	314

A continuación, se muestra, a modo de ejemplo, las aceleraciones en la traviesa (punto 4) para el evento t25, en el cual el tren Thalys pasa por la vía 2 en dirección Bruselas-París, a una velocidad de 314 km/h.

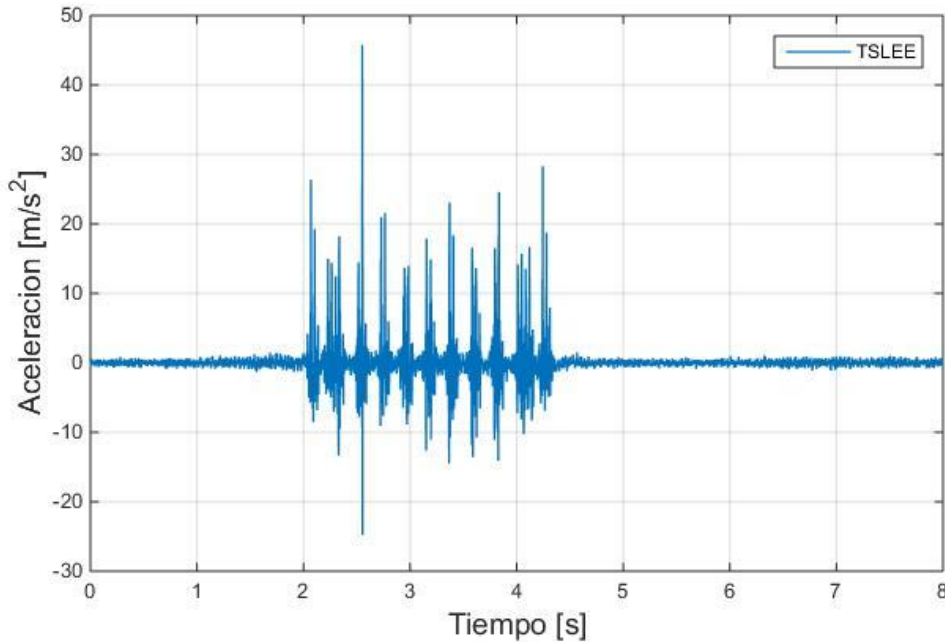


Figura 4-12. Aceleraciones en la traviesa. Evento t25, LAV París-Bruselas

En la figura 4.12, podemos observar como las aceleraciones máximas en la traviesa son del orden de  $20 \text{ m/s}^2$ . Además, en esta imagen se puede identificar claramente el paso de cada eje del tren con los picos de la figura. Las representaciones gráficas para las aceleraciones temporales en el resto de puntos de la figura 4-11 y para el resto de eventos indicados en la Tabla 4-1, se pueden consultar en la Ref. [21].

A continuación, se ha pasado la aceleración al dominio de la frecuencia usando la función *fft* de MATLAB, dividiendo entre el número de muestras existentes. La representación en frecuencia se muestra la Figura 4-13, en la cual podemos observar picos en la frecuencia de paso por bogie  $f_b = 4.66 \text{ Hz}$  y sus armónicos de orden superior, modulados por la frecuencia de paso por eje  $f_e = 29.07 \text{ Hz}$ . Además, también se observan picos a altas frecuencias asociados a la frecuencia de paso por traviesa, y a frecuencias entre 40 y 80 Hz asociados a la irregularidad de la vía y las ruedas del tren.

Conocer la información anterior será interesante para el análisis de los resultados que se obtendrán en el apartado siguiente. Más información acerca de las características del tren y del cálculo de las frecuencias puede encontrarse en la Ref. [21].

Las representaciones gráficas de las aceleraciones en el dominio de la frecuencia en el resto de puntos de la Figura 4-11 y para el resto de eventos indicados en la Tabla 4-1, se pueden consultar en el Anexo París-Bruselas de este mismo documento, en el Capítulo 7, apartado 7.1. En ese apartado se representan en el dominio de la frecuencia los datos registrados por Degrande y Schillemand [21].

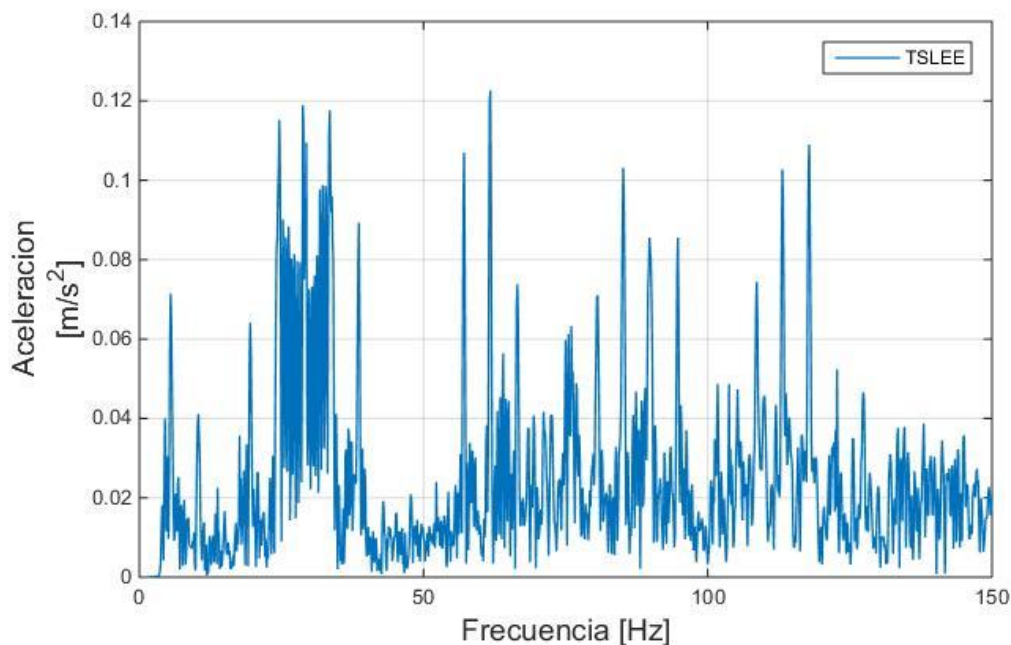


Figura 4-13. Aceleraciones en la travesía en el dominio de la frecuencia. Evento t25, LAV París-Bruselas

#### 4.2.2 Optimización de la Energía Recolectada para la LAV París-Bruselas

En este apartado, a través de los algoritmos genéticos, se optimizará el valor de las variables mecánicas del modelo (masa, rigidez y amortiguamiento) para maximizar la energía recolectada de las vibraciones detalladas en el apartado anterior. Para cada punto de medida se calculan las variables óptimas del modelo y la energía eléctrica generada por el sistema. A continuación, se muestran las representaciones gráficas de los valores óptimos obtenidos para todas las variables con respecto a la distancia. En todos los casos se ha limitado, para obtener resultados con sentido físico, la masa entre 1 y 100 gramos, la frecuencia natural entre 1 y 150 Hz y el factor de amortiguamiento entre 0.01 y 1.

Para tener una mayor claridad en la visualización de los resultados, se ha decidido representar de forma conjunta todos los resultados de los registros de trenes que pasan por la vía 1 en una misma figura y todos los de la vía 2 en otra. Es interesante notar que a la hora de realizar la optimización se han eliminado algunos de los datos, por tratarse de puntos en los cuales se había producido la saturación de los sensores y para así evitar resultados sin sentido físico.

En primer lugar, en la figura 4-14 se representa la energía eléctrica máxima recolectada, para cada punto de medida, en cada una de las pasadas del tren por la vía 1. En esta figura podemos observar como los valores máximos de energía son del orden del  $10^{-3}$  J obteniéndose para los puntos más cercanos a la excitación, es decir, los puntos pertenecientes a la travesía y el carril. Se puede observar también como al aumentar la distancia disminuye la capacidad del sistema para recolectar energía, debido al amortiguamiento del suelo, que hace disminuir la amplitud de las vibraciones. Por último, es interesante notar como la velocidad de paso del tren no afecta de forma considerable a la máxima energía recolectada en cada punto.

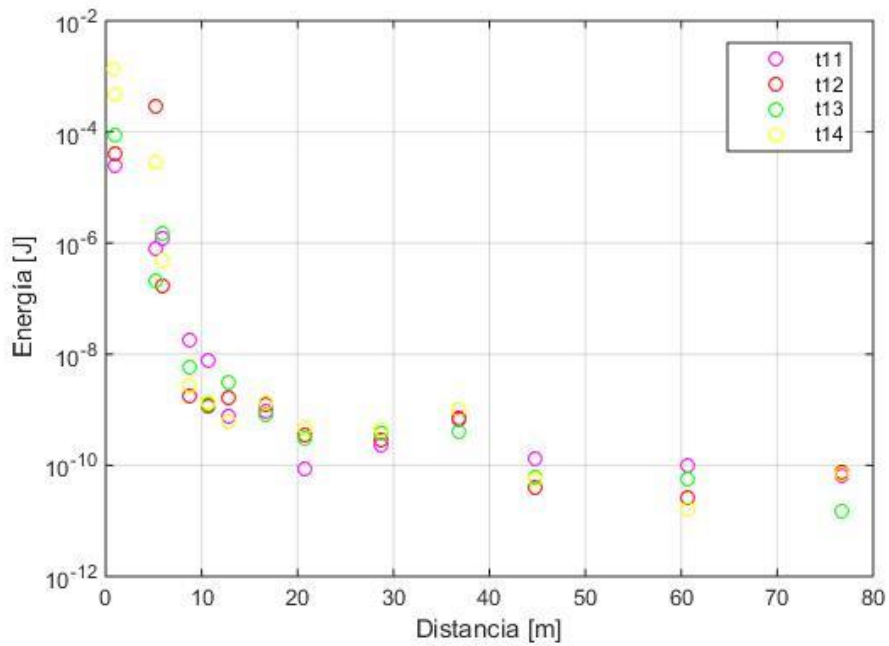


Figura 4-14. Energía máxima obtenida por el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas

A continuación, en la Figura 4-15, se muestra la frecuencia a la cual se sintoniza el sistema para maximizar la energía, en cada punto de medida para cada una de las pasadas del tren por la vía 1. En esta gráfica se puede observar como en la mayoría los casos el sistema tiende a sintonizarse a frecuencias bajas, cercanas a la frecuencia de paso por bogie. Existiendo ciertos casos puntuales en los que tiende a sintonizarse a frecuencias más altas, asociadas a las vibraciones generadas por el paso de eje y a las vibraciones producidas por las irregularidades de la vía y las ruedas del tren.

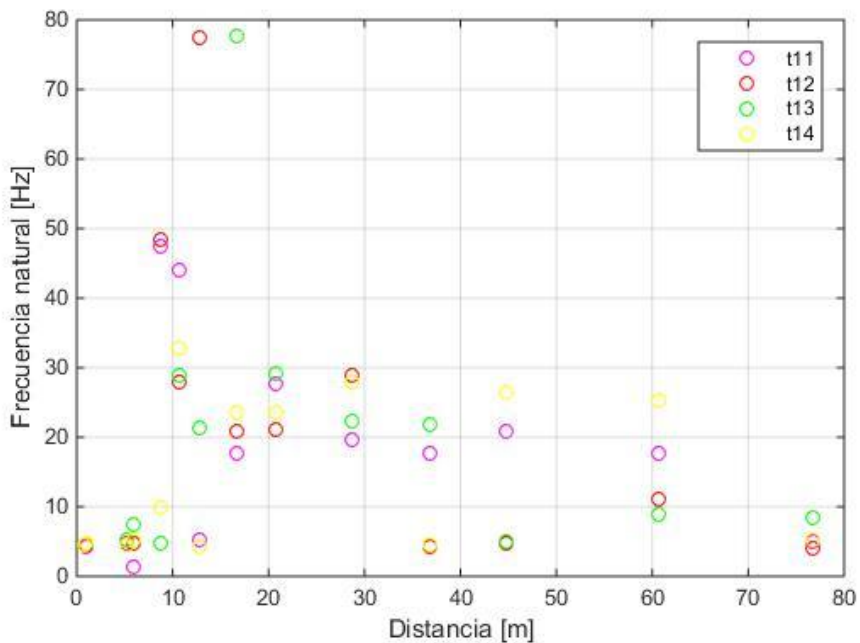


Figura 4-15. Frecuencias a las que se sintoniza el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas



En las Figuras 4-16 y 4-17 se representan, respectivamente, los valores de masa y rigidez que optimizan la energía obtenida por el sistema en cada punto para cada uno de los eventos en la vía 1. En cuanto a la masa podemos observar cómo los valores óptimos están muy dispersos, estando todos comprendidos entre 40 y 100 gramos y existiendo un gran número de casos en los cuales la masa óptima es de 100 gramos. Los valores óptimos de la rigidez se encuentran en general por debajo de los 2000 N/m.

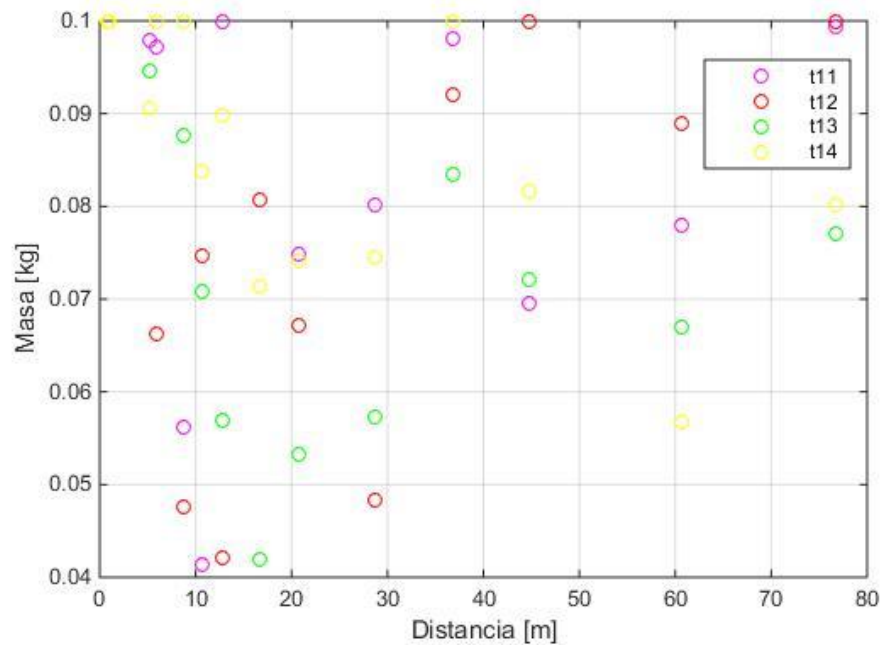


Figura 4-16. Valores de la masa que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas

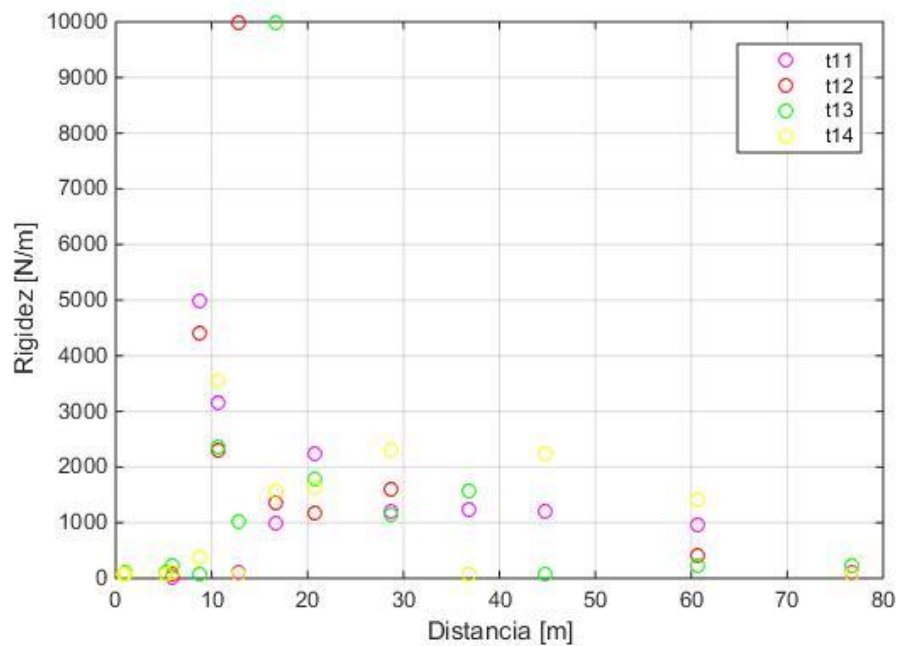


Figura 4-17. Valores de la rigidez que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas

Por último, en la Figura 4-18 se representan los valores óptimos del amortiguamiento. En esta figura se observa que la mayoría de los valores óptimos se encuentran comprendidos entre 0.05 y 0.3 N/m.s.

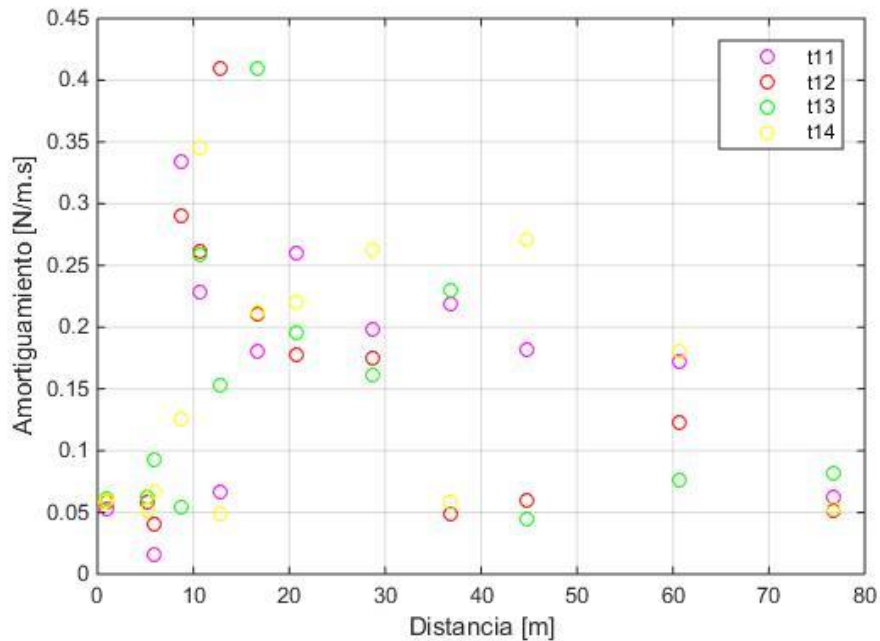


Figura 4-18. Valores del amortiguamiento que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 1. LAV París-Bruselas

A continuación, se representan el máximo de la energía en cada punto para cada evento registrado en la vía 2, y los valores de las propiedades del sistema (frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento) que la optimizan.

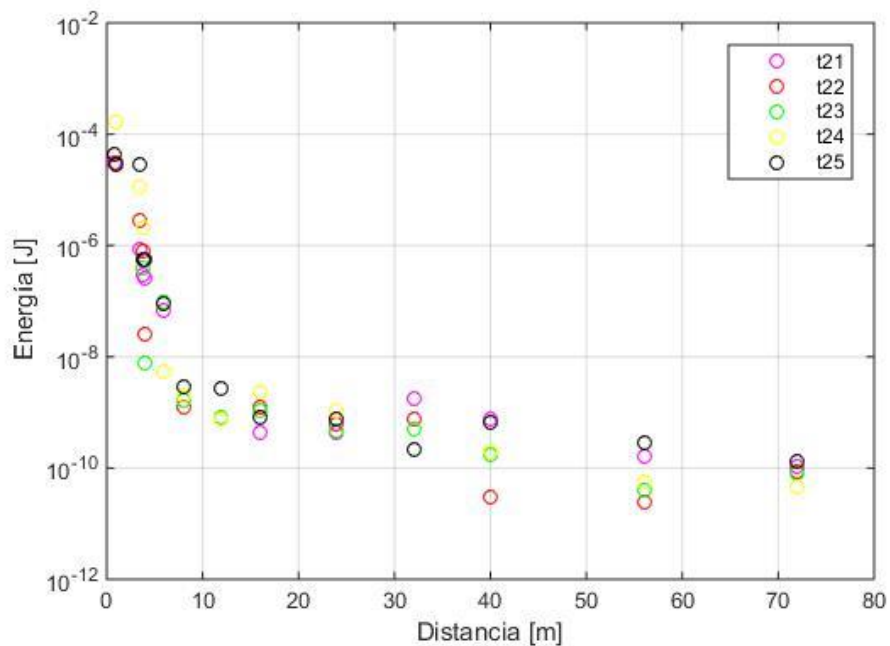


Figura 4-19. Energía máxima obtenida por el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas

En la Figura 4-19 se representa la energía máxima recolectada. Se puede observar que los valores máximos de la energía son del mismo orden que los obtenidos en el caso de los trenes que pasaban por la vía 1. Además, se puede confirmar el hecho de que no existe una gran influencia de la velocidad de paso del tren en la energía absorbida.

En la Figura 4-20 se puede comprobar como en general el sistema tiende a sintonizarse a frecuencias bajas. Existiendo casos en los cuales la sintonización óptima está asociada a la frecuencia de paso por eje y a las vibraciones generadas por las irregularidades de la vía y las ruedas del tren.

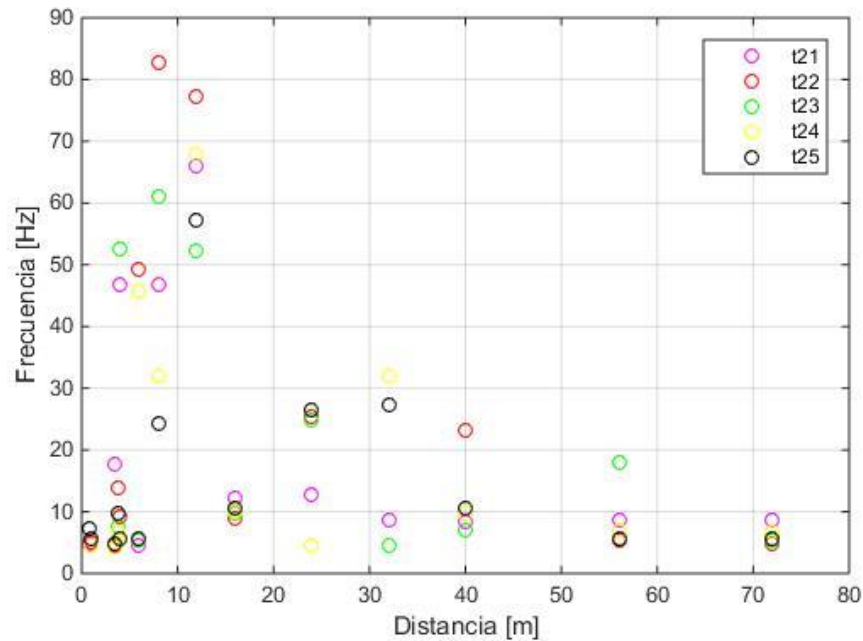


Figura 4-20. Frecuencias a las que se sintoniza el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas

Por último, se representan las masas, rigideces y amortiguamientos para los eventos de la vía. En las representaciones siguientes se puede observar como los valores óptimos obtenidos son similares a los del caso anterior.

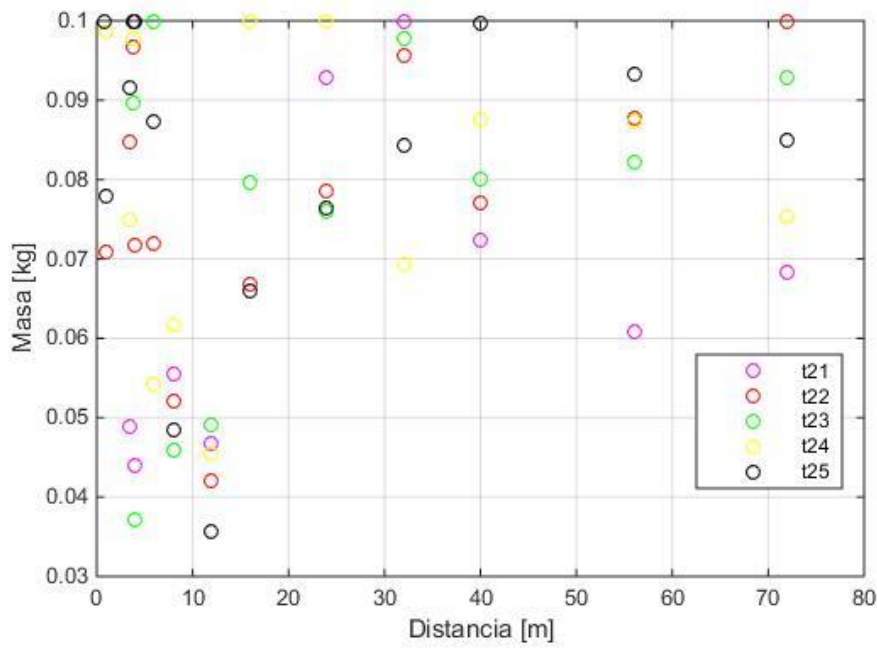


Figura 4-21. Valores de la masa que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas

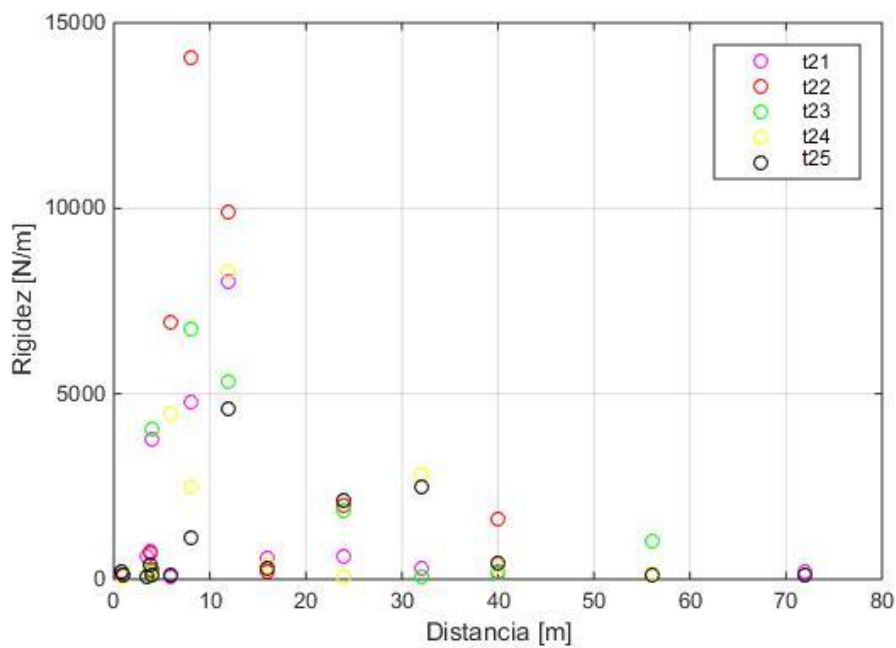


Figura 4-22. Valores de la rigidez que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas

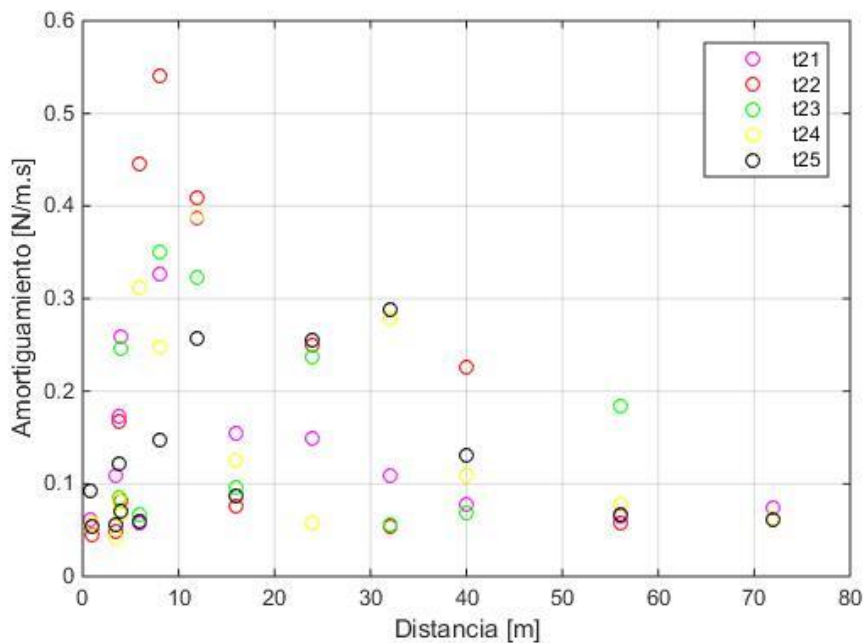


Figura 4-23. Valores del amortiguamiento que optimizan el sistema en los diferentes puntos registrados, para todos los eventos de la vía 2. LAV París-Bruselas

Una vez mostrados los resultados, es interesante comparar los valores óptimos obtenidos para la LAV Córdoba-Málaga y los obtenidos para la LAV París-Bruselas. La diferencia más clara entre ambos casos está en la frecuencia a la cual se sintoniza el sistema para maximizar la absorción de energía. Como se comentó anteriormente, en el caso de Córdoba-Málaga el sistema tiende a sintonizarse en frecuencias entre 20 y 40 Hz cuyas vibraciones están principalmente asociadas al paso por eje. En cambio, en el caso de París-Bruselas el sistema tiende, en la mayoría de los casos, a sintonizarse a bajas frecuencias, cuyas vibraciones están asociadas principalmente al paso por bogie.

Para entender esta diferencia tenemos que fijarnos en las propiedades del suelo en cada caso, principalmente en la velocidad de propagación de onda. En el caso de Córdoba-Málaga la velocidad de propagación de onda de Rayleigh en la capa superior del suelo es de 138.9 m/s [20], teniendo en cuenta que la velocidad del tren era de 298 km/h (82.8 m/s) en este caso el régimen es sub-Rayleigh. En el caso de París-Bruselas la velocidad de propagación de onda de Rayleigh en la capa superior del suelo es de 80 m/s [21], observando las velocidades de paso en la Tabla 4-1 podemos comprobar que en la mayoría de estos casos nos encontramos en régimen super-Rayleigh. Esta diferencia hace que las vibraciones producidas en cada caso y por tanto la sintonización del sistema sean diferentes. Más información acerca de las vibraciones producidas en régimen sub-Rayleigh y super-Rayleigh, para las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas, puede consultarse en la Ref. [22].

### 4.3 Cálculo de un modelo óptimo global para las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas

En los dos apartados anteriores, se han calculado los valores de las variables mecánicas que optimizan la energía recolectada en cada punto de medida experimental. En este apartado, se van a usar estos datos para definir unas variables mecánicas del modelo, que sean las que mejor se adaptan al conjunto de datos experimentales. Es decir, en los apartados anteriores calculamos un modelo óptimo para cada punto y en este se va a definir un modelo óptimo global, que sea el que mejor se adapte al conjunto de medidas experimentales que se han usado en este trabajo.

Para definir este modelo vamos a usar todos los valores óptimos de las variables mecánicas y su energía asociada, que se calcularon en los apartados anteriores. En primer lugar, en la Figura 4-24, se representa la energía máxima que se puede obtener en cada punto, con respecto a su frecuencia y masa óptima asociada.

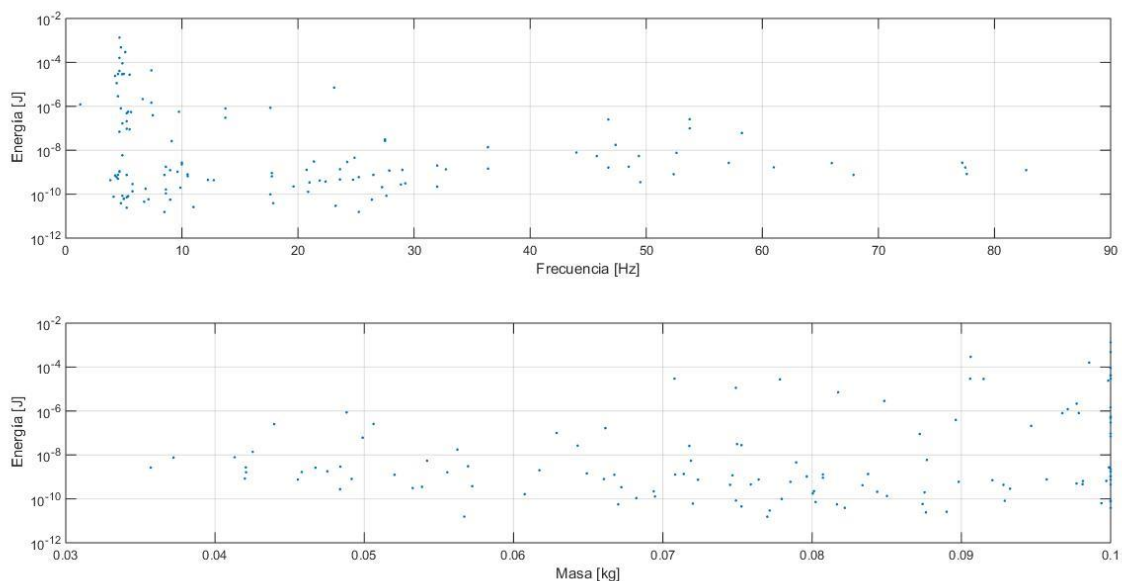


Figura 4-24. Distribución conjunta de energía con respecto a masa y frecuencia. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas

Con respecto a la frecuencia, podemos observar que hay una gran cantidad de puntos óptimos que se encuentran en frecuencias cercanas a los 5 Hz. Además, es interesante notar, que estos puntos van desde los valores más altos de energía, puntos más cercanos al eje de la vía, hasta los valores más bajos de energía, que se corresponden con los valores más alejados del eje de la vía.

Con respecto a la masa, se puede observar que las masas óptimas están más distribuidas que las frecuencias. Para masas cercanas a 100 gramos se observa una gran cantidad de puntos óptimos (esto se puede ver de forma más clara en la figura 4-26). Además, estos puntos tienen asociados valores altos y bajos de la energía, lo cual quiere decir que se trata de puntos óptimos tanto cercanos como alejados del eje de la vía.

A priori, basándonos en el razonamiento anterior, sería un buen punto de diseño global uno centrado en un valor de la masa cercano a 100 gramos y con una frecuencia natural en torno a 5 Hz. A continuación, para comprobar esto, se ha decidido representar en porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de frecuencia y de masa, como se muestra en las Figuras 4-25 y 4-26.

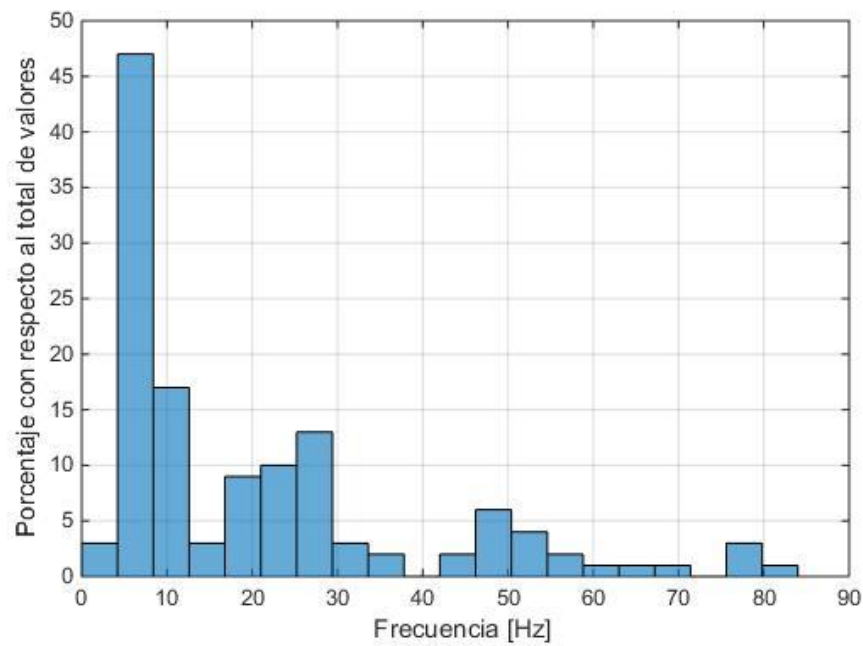


Figura 4-25. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de frecuencia. LAV Córdoba- Málaga y París- Bruselas

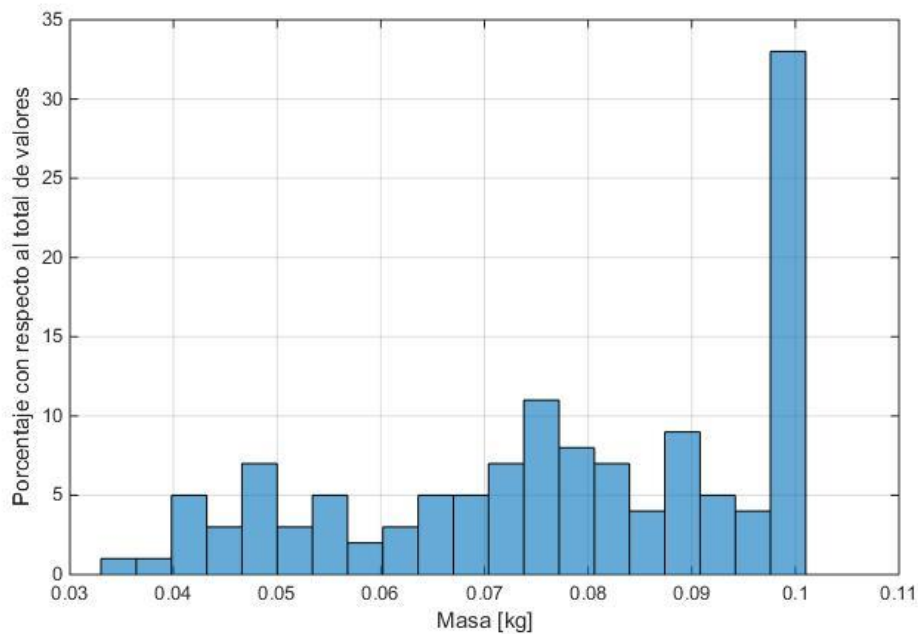


Figura 4-26. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de masas. LAV Córdoba- Málaga y París- Bruselas

En la Figura 4-25 se puede observar que, como se comentó anteriormente, la mayoría de los valores óptimos obtenidos para la frecuencia se encuentran en el entorno de los 5 Hz. En la Figura 4-6, se puede observar que la mayoría de los valores óptimos de la masa se encuentran en torno a 100 gramos.

Por último, para definir los valores concretos del modelo global, se ha decidido representar la energía acumulada con respecto a valores concretos de la masa y la frecuencia. En las figuras 4-27 y 4-28, se pueden observar los valores que más energía proporcionan.

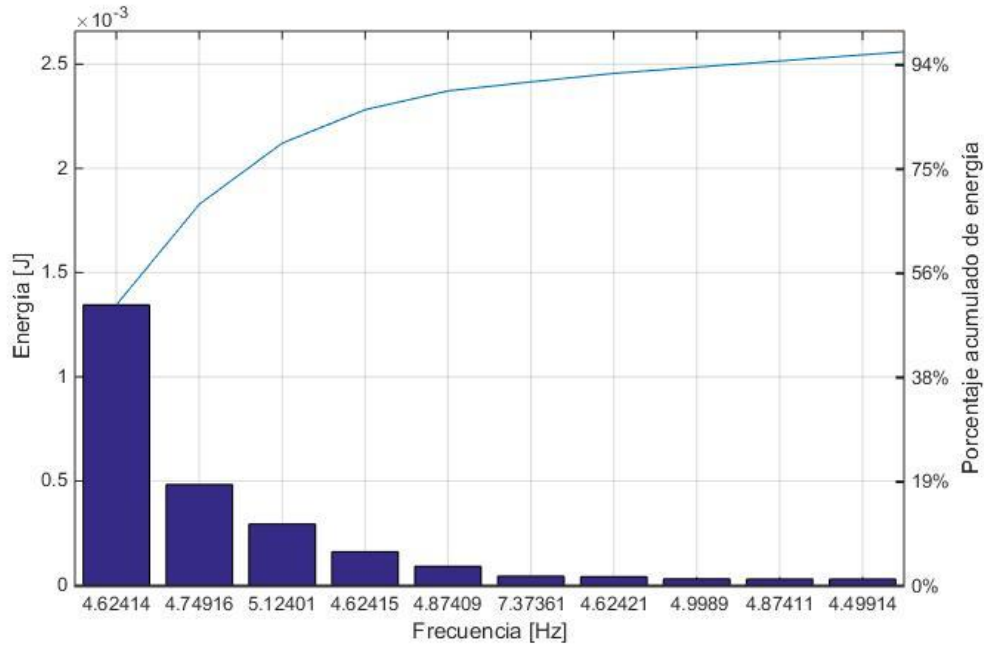


Figura 4-27. Energía acumulada con respecto a valores de la frecuencia. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas

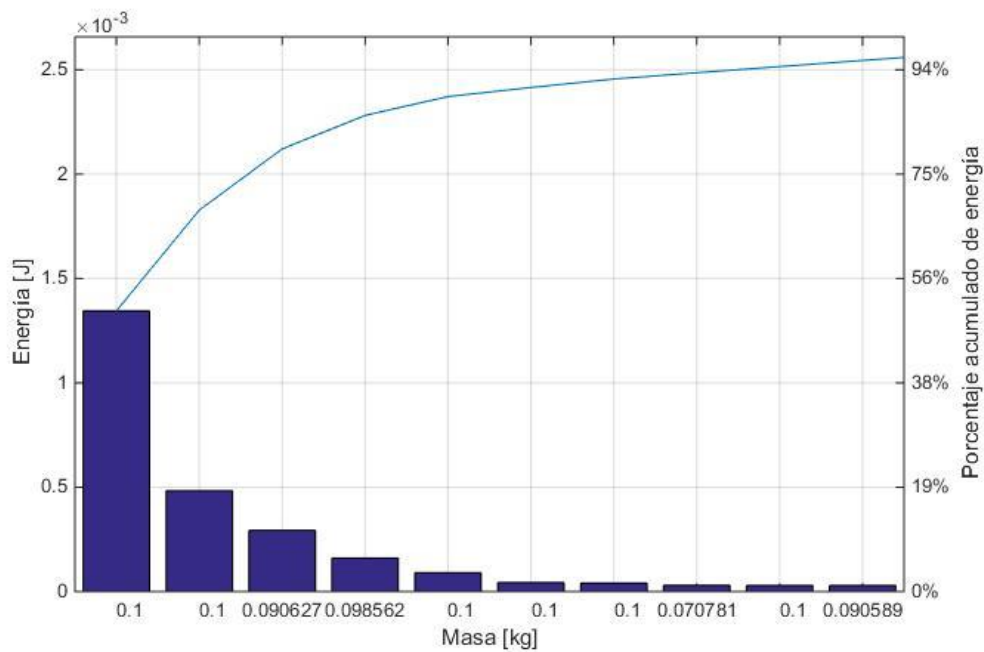


Figura 4-28. Energía acumulada con respecto a valores de la masa. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas

Con todo lo anterior, se ha decidido seleccionar como punto de diseño, el punto cuyos valores de las propiedades mecánicas se muestran en la Tabla siguiente. Podemos observar que el sistema esta sintonizado a una frecuencia baja, en torno a los 5 Hz, y tiene una masa de 100 gramos.



Tabla 4–2. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño global. LAV Córdoba- Málaga y París-Bruselas

Variable	Valor
Masa (m)	100 gr
Rigidez (k)	84.415 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	4.624 Hz
Amortiguamiento (c)	0.0581 N/m.s

Antes de finalizar este apartado es interesante reflexionar sobre los datos que se han utilizado y los resultados que se han obtenido.

En primer lugar, con respecto a los datos usados, en este apartado se han usado los valores óptimos obtenidos para las diferentes medidas experimentales registradas para las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas. En este sentido, la cantidad de medidas usadas de la LAV París-Bruselas es mucho mayor que las usadas de la LAV Córdoba-Málaga, ya que de la línea París-Bruselas se disponía de datos de 9 pasadas de trenes y en la línea Córdoba-Málaga únicamente de una. Este hecho hace que el modelo obtenido este más enfocado a la LAV París-Bruselas. Este hecho se analiza en más profundidad en el siguiente apartado.

Por último, reflexionando acerca de los resultados obtenidos. En este apartado se ha realizado un análisis cualitativo y cuantitativo para obtener un modelo óptimo global para un conjunto de diversas de medidas experimentales. Hay que tener en cuenta que estas medidas están asociadas a diferentes tipos de trenes, velocidades de paso, tipos de suelo y distancias con respecto al eje de la vía. En este sentido, cabe decir que el modelo obtenido es una primera aproximación cuantitativa. En caso de buscar un diseño en una zona concreta y a una distancia concreta del eje de la vía, sería necesario realizar un estudio más detallado centrándose en ese caso y usando medidas experimentales o modelos analíticos centrados en ese caso concreto.

#### 4.4 Comparación del modelo óptimo global del sistema con respecto a los óptimos puntuales de las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas.

En este apartado se comparan los valores de energía recolectados con el modelo óptimo global seleccionado en el apartado anterior, con los valores máximos posibles para cada punto de medida de las LAV Córdoba-Málaga y París-Bruselas. Estos valores fueron obtenidos en los apartados 4.1 y 4.2.

##### 4.4.1 Comparación de la energía recolectada con el modelo óptimo global con respecto a la máxima posible. LAV Córdoba-Málaga.

En este apartado se comparan los valores de energía obtenidos con el modelo del apartado anterior, para las medidas experimentales registradas en la LAV Córdoba-Málaga, con la energía máxima posible para cada punto, que se obtuvo en el apartado 4.1 de este mismo capítulo.

En la figura 4-29, se representa los valores de energía obtenidos con el Modelo óptimo global, en azul, y los valores máximos posibles de energía en cada punto, en rojo.

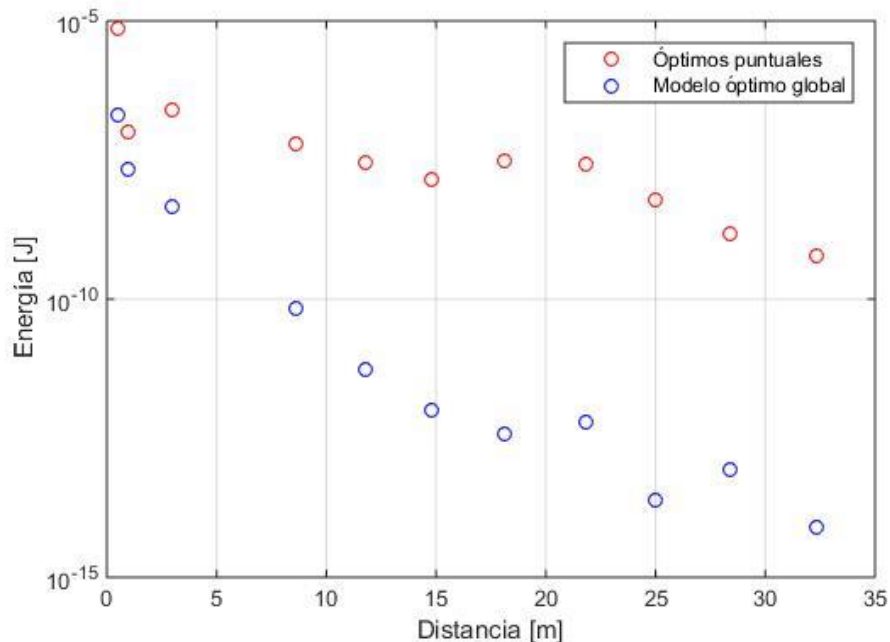


Figura 4-29. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo global con respecto a los máximos de la energía en cada punto. LAV Córdoba-Málaga

En la figura anterior, se puede observar como los valores de energía obtenidos con el modelo seleccionado en el apartado anterior son menores en todos los puntos, al valor máximo posible en cada punto, calculado en el apartado 4.1. Además, se puede observar que existe una diferencia de energía considerable entre ambos casos, lo cual indica que el modelo seleccionado no se ajusta bien en este caso. El motivo por el que esto sucede es que, como se comentó en el apartado anterior, para la obtención de las propiedades del modelo óptimo global la mayoría de las medidas experimentales usadas pertenecen a la LAV París-Bruselas. Teniendo en cuenta que, como se comentó en el apartado 4.2, en la LAV Córdoba-Málaga el régimen es sub-Rayleigh y en la París-Bruselas super-Rayleigh, el modelo obtenido no se adapta bien a las medidas experimentales de la LAV Córdoba-Málaga. Esto demuestra también que cuando el sistema opera en una banda de frecuencias no muy próxima a su frecuencia de resonancia, se produce un brusco descenso de la energía recolectada.

Para solucionar este problema, se ha decidido crear un modelo óptimo solo para Córdoba-Málaga. Las propiedades se han determinado siguiendo el mismo procedimiento que en apartado 4.3, pero usando únicamente las medidas asociadas a la LAV Córdoba-Málaga. Los valores óptimos obtenidos para las propiedades mecánicas del sistema se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño de un modelo para la LAV Córdoba-Málaga

Variable	Valor
Masa (m)	81.7 gr
Rigidez (k)	1725.3 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	23.75 Hz
Amortiguamiento (c)	0.238 N/m.s

En la Tabla anterior es interesante notar como en este caso, la frecuencia natural del sistema es de 23 Hz, sintonizándose este con las vibraciones producidas por el paso de eje, tal y como vimos, en el apartado 4.1, que sucedía en la mayoría de los casos de la LAV Córdoba-Málaga.

Por último, en la figura 4-30, se representan los valores de energía obtenidos con este modelo, en azul, y los valores máximos posibles de energía en cada punto, en rojo. En esta figura podemos observar como el modelo se adapta mejor a las medidas experimentales, obteniéndose valores de energía superiores a los mostrados en la figura 4-29.

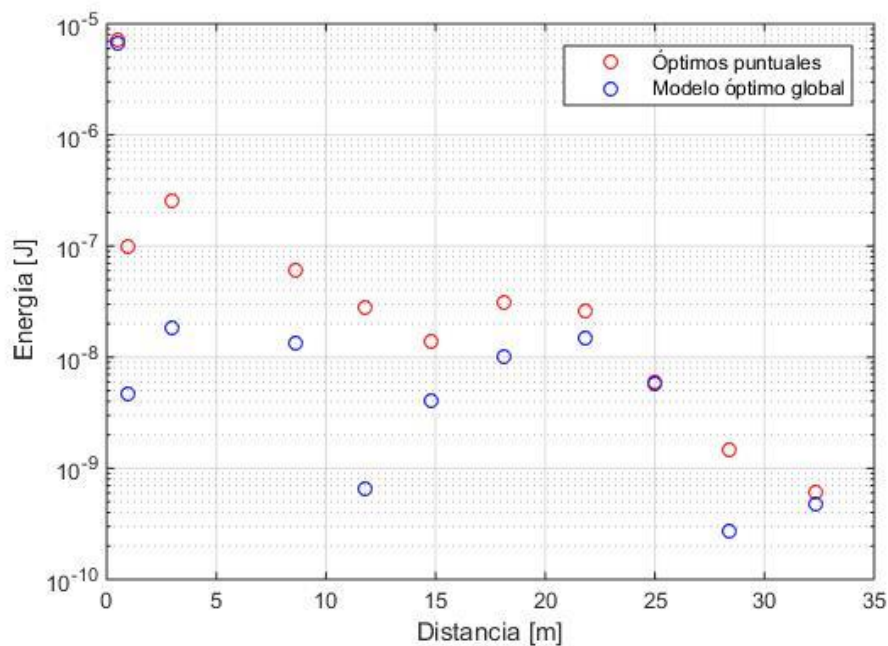


Figura 4-30. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo para la LAV Córdoba-Málaga con respecto a los máximos de la energía en cada punto.

#### 4.4.2 Comparación de la energía recolectada con el modelo óptimo global con respecto a la máxima posible. LAV París-Bruselas.

En este apartado se comparan los valores de energía obtenidos con el modelo óptimo global, para las medidas experimentales registradas en la LAV París-Bruselas, con la energía máxima posible para cada punto de medida experimental, que se obtuvo en el apartado 4.2 de este mismo capítulo.

En la Figura 4-31 se muestra a modo de ejemplo el evento t25, en el cual un tren pasa a 314 km/h por la vía 2 en dirección Bruselas-París. En esta figura se representan los valores de energía obtenidos con el modelo óptimo global, en azul, y los valores máximos posibles de energía en cada punto, en rojo.

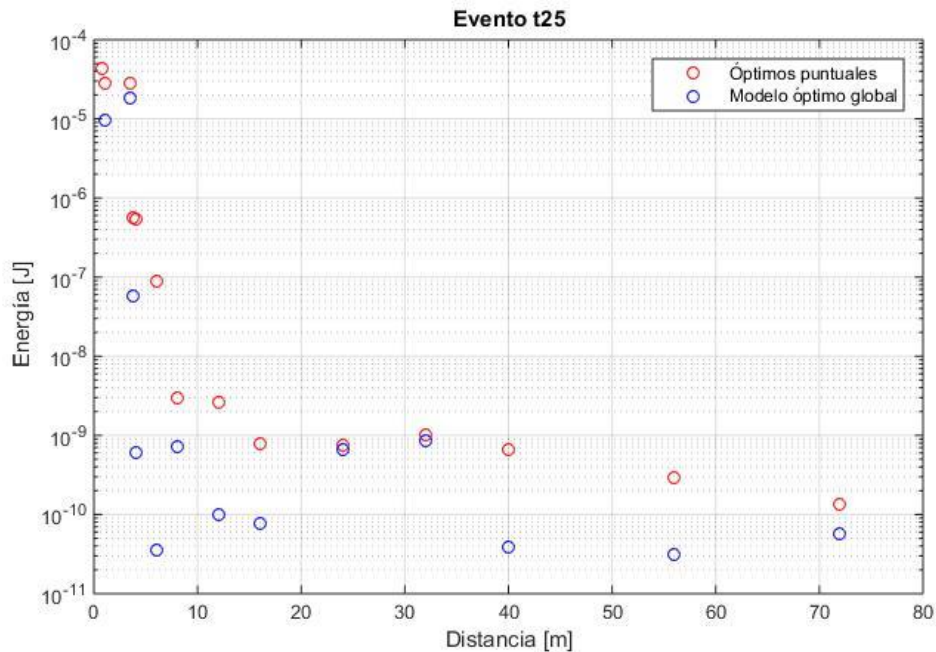


Figura 4-31. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo global con respecto a los máximos de la energía en cada punto para el evento t25. LAV París-Bruselas

En esta Figura se puede observar como en todos los casos la energía recolectada por el modelo seleccionado es menor que la energía máxima posible. Es interesante destacar como, en general, el modelo se adapta bien a las medidas experimentales, especialmente en los puntos más cercanos al eje de la vía. En estos puntos la energía recolectada por el modelo se acerca a la energía máxima posible.

En la Figura 4-32 se muestran las representaciones para el resto de eventos, en las cuales se puede observar un comportamiento similar al explicado para la Figura 4-31.

Para finalizar este apartado, cabe recordar el hecho de que el modelo seleccionado se trata del modelo que mejor se ajusta de manera global a los datos experimentales disponibles en este trabajo. La diversidad de los datos experimentales (diferentes velocidades de paso del tren, diferentes distancias con respecto al eje de la vía...) hace imposible que un único modelo maximice la energía en todos los puntos. Por este motivo, en las representaciones de este apartado, podemos observar puntos en los cuales la energía recolectada es muy próxima a la máxima disponible, y otros en los que la diferencia es mayor.

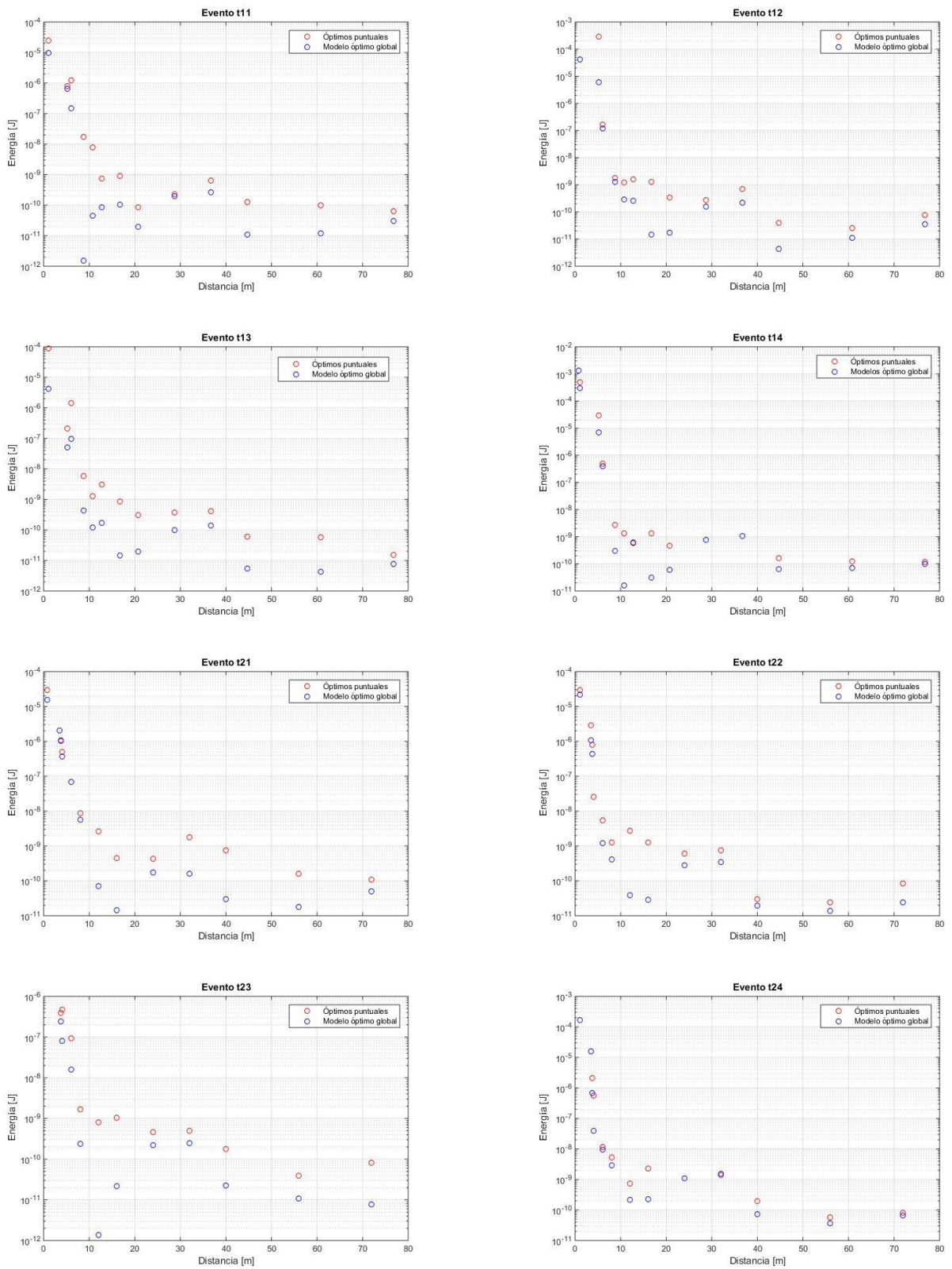


Figura 4-32. Comparación de la energía obtenida con el modelo óptimo global con respecto a los máximos de la energía en cada punto para los eventos t11, t12, t13, t14, t21, t22, t23 y t24. LAV París-Bruselas



# 5 ANÁLISIS LAV MADRID-SEVILLA EN PUENTE ARROYO BRACEA

---

## 5.1 Medidas Experimentales en Puente Arroyo Bracea

Lo datos experimentales que se usan en este apartado fueron registrados por Galvín, Romero, Moliner y Martínez-Rodrigo [23] en Julio de 2016. En esta campaña experimental, los autores de la investigación, registraron las vibraciones producidas por el paso de trenes a alta velocidad en el Puente del Arroyo Bracea. El puente del Arroyo Bracea forma parte de la LAV Sevilla-Madrid, la primera LAV española, inaugurada en 1992. El puente que cruza el Arroyo Bracea es una estructura con un ángulo oblicuo de  $45^\circ$ . Esta estructura contiene dos vías sobre formadas por dos carriles UIC 60, situados con sistemas de fijación sobre traviesas de hormigón, separadas entre sí 0.6 m. Más información sobre la geometría del puente y de las vías se puede obtener en la Ref. [23].



Figura 5-1. Puente Arroyo Bracea (Imagen Google Maps)

Durante la campaña experimental, los autores de la investigación, midieron las propiedades del suelo mediante ensayos SASW. Concluyendo que, debido a la gran rigidez del suelo, la interacción suelo estructura no afectará considerablemente a la respuesta dinámica del puente.

Los autores de la investigación, midieron la aceleración vertical en 11 puntos de la cara inferior del puente, ver Figura 5-2. Desafortunadamente, el sensor número 8 se dañó durante la campaña experimental, por lo que los datos en ese punto no están disponibles.

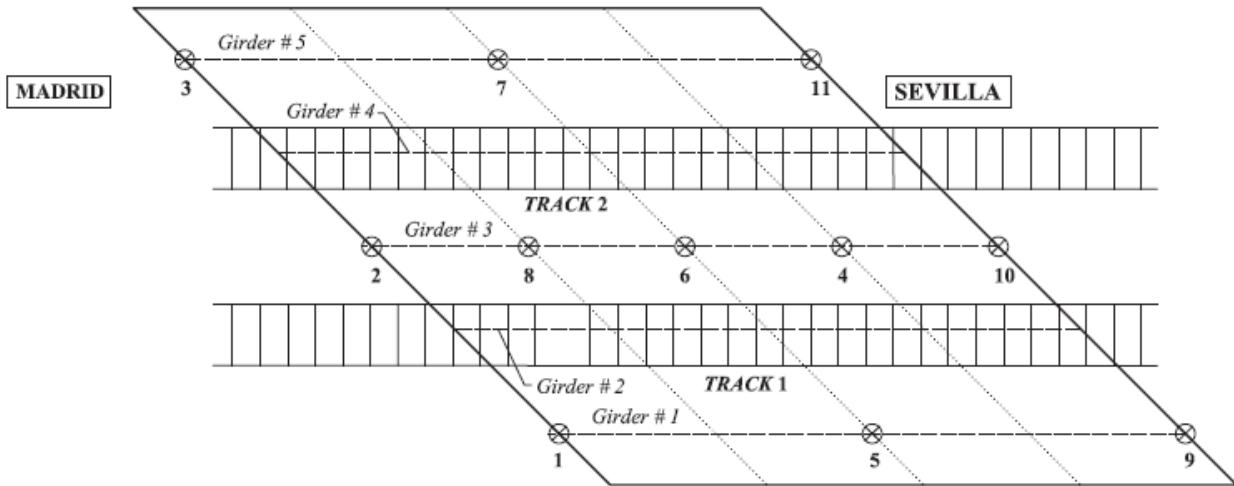


Figura 5-2. Puntos de medida en el Puente Arroyo Bracea. Imagen obtenida de la Ref. [23]

Las cinco primeras frecuencias naturales del puente, junto con el modo de vibración asociado, fueron calculadas por los autores de la investigación y se muestran en la Tabla 5-1. Esta información será útil para discutir los resultados en obtenidos en apartados posteriores.

Tabla 5-1. Valores de las 5 primeras frecuencias naturales de Puente Arroyo Bracea

	Frecuencia (Hz)	Modo de vibración
1	9.25	Flexión longitudinal
2	10.63	Torsión
3	12.75	Flexión transversal
4	17.92	Torsión
5	24.57	Flexión longitudinal

Durante el registro de datos diferentes trenes cruzaron el puente a velocidades comprendidas entre 100 y 280 km/h,. En la siguiente Tabla se muestran los diferentes eventos, registrados por los investigadores, cuyos datos han sido usados en este trabajo. Información detallada sobre la configuración de cada uno de los modelos de tren puede encontrarse en la Ref. [23]

Tabla 5-2. Paso de trenes registrados en el Puente Arroyo Bracea

Evento	Modelo de tren	Velocidad [km/h]
1	S102	274
2	S102	262
3	S104	252
4	S130	247
5	S102	274
6	S130	237
7	S100	262
8	S103	279
9	S100	271
10	S252+4c	99
11	S104	252



A continuación, se representan, a modo de ejemplo, las aceleraciones en el dominio de la frecuencia para los eventos 1 y 2 en el punto 6. Las representaciones gráficas de todas las aceleraciones experimentales en el dominio de la frecuencia, registradas en la campaña experimental de la Ref. [23], que se han usado en este capítulo se pueden encontrar en el Anexo Puente Bracea, Capítulo 8 de este documento, apartado 8.1.

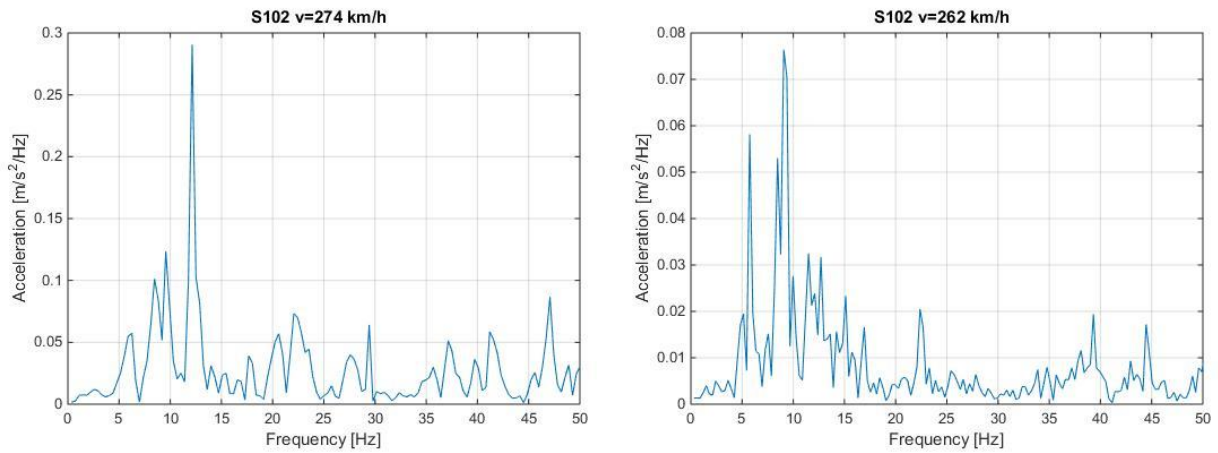


Figura 5-3. Aceleraciones en el punto 6 para los eventos 1 y 2. Puente Arroyo Bracea

En la Figura 5-3, podemos observar como los picos, que reflejan las masas aceleraciones y vibraciones, coinciden con la frecuencia de paso por bogie (en torno a los 5 Hz) y a las frecuencias naturales del puente, mostradas en la Tabla 5-1. Es interesante destacar que las frecuencias de interés se encuentran en un rango entre 1 y 30 Hz.

Por último, es interesante representar las aceleraciones en un punto del evento 8, tren S103 a 279 km/h. En la Ref. [23] se demuestra como las características del tren, unidas a la velocidad de paso, hacen que en este evento el puente entre en resonancia. Por este motivo, en ese evento se produce una amplificación apreciable de la respuesta, a la frecuencia natural del primer modo de vibración (9.25 Hz). En la Figura 5-4 se puede observar este fenómeno en el punto de medida 6. Las representaciones gráficas para el resto de puntos se pueden encontrar en el Anexo Puente Arroyo Bracea, como se comentó anteriormente.

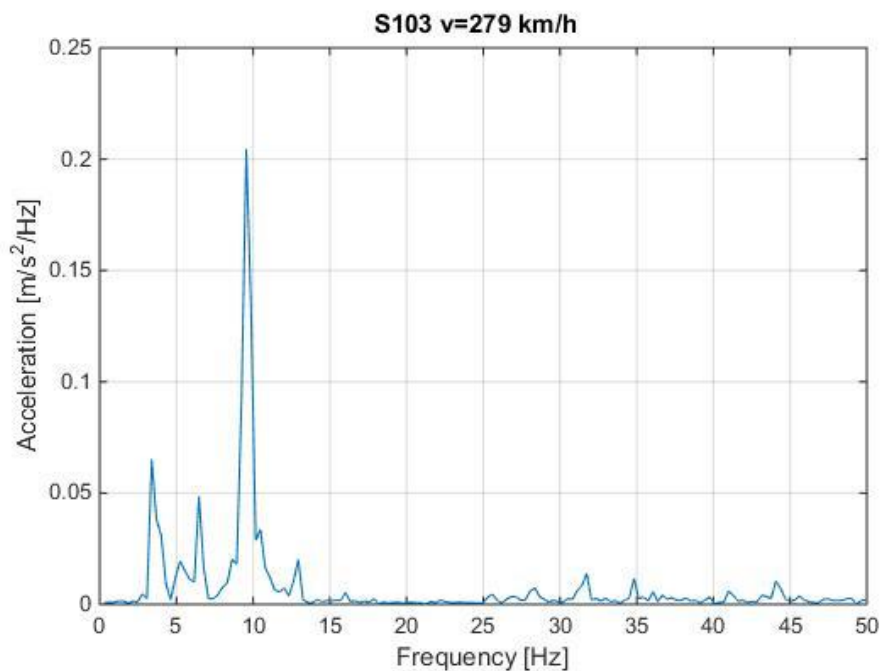


Figura 5-4. Aceleraciones en el punto 5 para el evento 8 (resonancia del puente). Puente Arroyo Bracea

## 5.2 Optimización de la Energía Recolectada. Puente Arroyo Bracea

En este apartado, a través de los algoritmos genéticos, se optimizará el valor de las variables mecánicas del modelo para maximizar la energía recolectada. Usando como entradas las vibraciones detalladas en el apartado anterior, para el paso de los diferentes trenes sobre el Puente del Arroyo Bracea. Para cada punto de medida se calculan las variables óptimas del modelo y la máxima energía eléctrica recolectada por el sistema.

A continuación, se muestran las representaciones gráficas de todas las variables con respecto al punto de medida. En todos los casos se ha limitado, para obtener resultados con sentido físico, la masa entre 1 y 100 gramos, la frecuencia natural entre 1 y 150 Hz y el factor de amortiguamiento entre 0.01 y 1. Se han eliminado ciertos puntos, en algunos eventos, de las representaciones porque los valores recogidos por los sensores daban resultados con poco sentido físico, debidos principalmente a problemas de medida, como por ejemplo la saturación del sensor. Un ejemplo punto eliminado de las representaciones es el punto 10, en el evento 5, cuyas aceleraciones se pueden consultar en el apartado 8.1 de este documento.

En este apartado se van a representar y comentar los resultados obtenidos para los eventos 1, 2 y 8. Las conclusiones obtenidas son similares para el resto de eventos, pudiéndose consultar los resultados para cada evento concreto en el Capítulo 8, Anexo Puente Arroyo Bracea, apartado 8.2.

En primer lugar, en la Figura 5-5 se representa la energía máxima recolectada en cada punto, para el evento 1. En la figura podemos observar que la energía obtenida en los puntos 4, 5, 6 y 7 es considerablemente mayor que la obtenida en los puntos 1, 2, 3, 9, 10 y 11. Este es un resultado razonable, al tratarse los puntos 4, 5, 6 y 7 de puntos libres en los cuales la amplitud de las vibraciones, y por tanto la energía absorbida de ellas, es mucho mayor que la de los puntos de apoyo del puente (puntos 1, 2, 3, 9, 10 y 11). Se puede observar también que, en general, la energía generada en este caso es mayor que las que se obtenían en el caso de las LAV de París-Bruselas y Córdoba-Málaga. Este resultado es razonable ya que las vibraciones en el puente son mucho mayores que las generadas en el suelo en un tramo de la vía. Además, en este caso concreto el punto en el cual se recolecta mayor energía es el 7, este no es un resultado general como los anteriores, ya que, dependiendo del evento, el punto de mayor energía puede ser el 4, 5, 6 o 7 como se verá posteriormente. El punto mayor energía puede estar condicionado por la velocidad del tren, las características geométricas de este e incluso la vía por la que pase, ya que todos estos parámetros alterarán las vibraciones del puente.

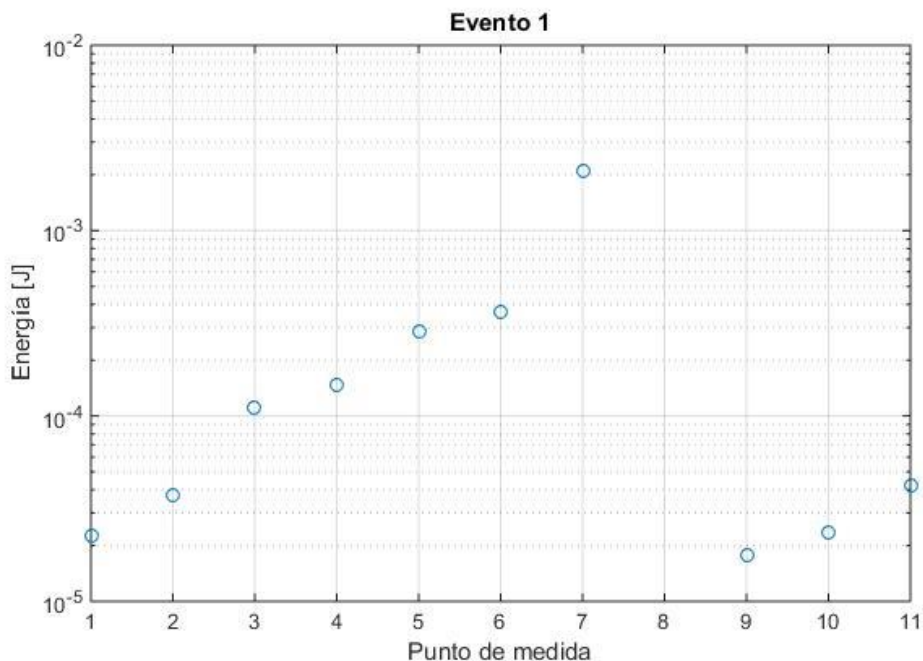


Figura 5-5. Energía máxima recolectada en cada punto para el evento 1. Puente Arroyo Bracea

En la Figura 5-6, se representa la frecuencia a la que se sintoniza el sistema en cada punto para el evento 1. En este caso podemos observar como en la mayoría de los puntos el sistema tiende a sintonizarse a una frecuencia ligeramente superior a los 12 Hz. Este resultado tiene sentido, ya que significa que la frecuencia natural de nuestro sistema se está sintonizando con la tercera frecuencia natural del puente, que es 12.75 Hz, como se indica en la Tabla 5-1. Es interesante notar que esto sucede en todos los puntos, salvo en los puntos 1 y 4. En el punto 1 el resultado óptimo es sintonizar el sistema a una frecuencia cercana a los 30 Hz, asociada a las vibraciones de paso por eje. Por último, en el punto 4 la mejor opción es sintonizar el sistema a una frecuencia comprendida entre 9 y 10 Hz, es decir, sincronizar el sistema entre la primera y la segunda frecuencia natural del puente (9.25 y 9.75 Hz respectivamente).

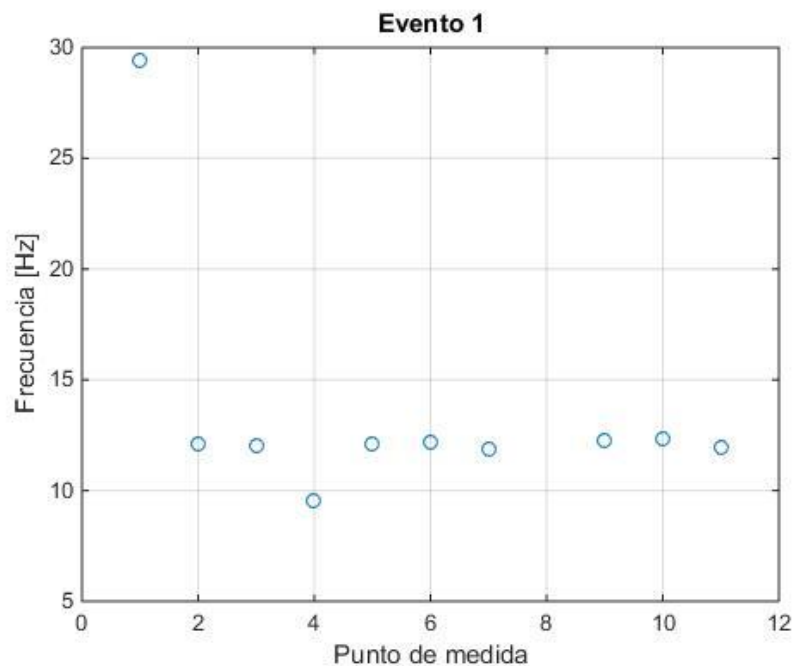


Figura 5-6. Frecuencia natural a la que se sintonizada el sistema en cada punto para el evento 1. Puente Arroyo Bracea

A continuación, en la Figura 5-7 se representa la masa óptima para cada punto de medida del evento 1. En esta imagen podemos observar como en la mayoría de los casos se obtienen valores de la masa por encima de los 60 gramos. Cabe destacar que existen varios puntos en los cuales la solución óptima es seleccionar la masa máxima permitida, que es 100 gramos.

En la Figura 5-8 se representa la rigidez óptima para cada punto de medida del evento 1. En esta imagen podemos observar como la rigidez óptima, en la mayoría de los casos, se encuentra por debajo de los 600 N/m.

Para finalizar el análisis del evento 1, en la Figura 5.9, se representan los valores óptimos del amortiguamiento para los diferentes puntos de medida. Se puede observar que en todos los casos se tiende a valores pequeños del amortiguamiento, comprendidos entre 0.09 y 0.16 N/m.s.

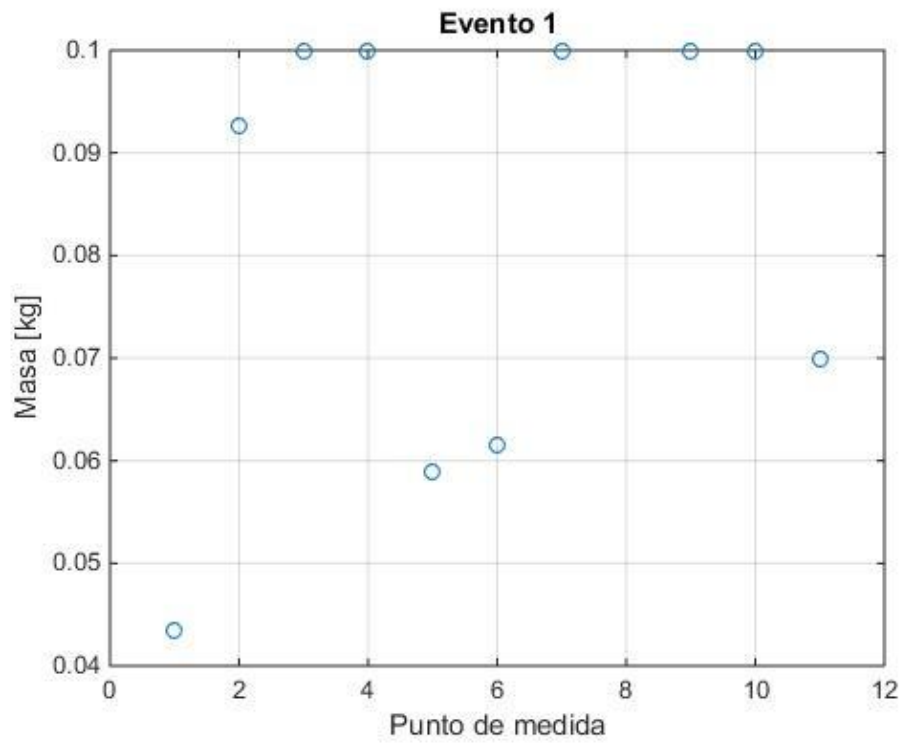


Figura 5-7. Valores de la masa que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 1. Puente Arroyo Bracea

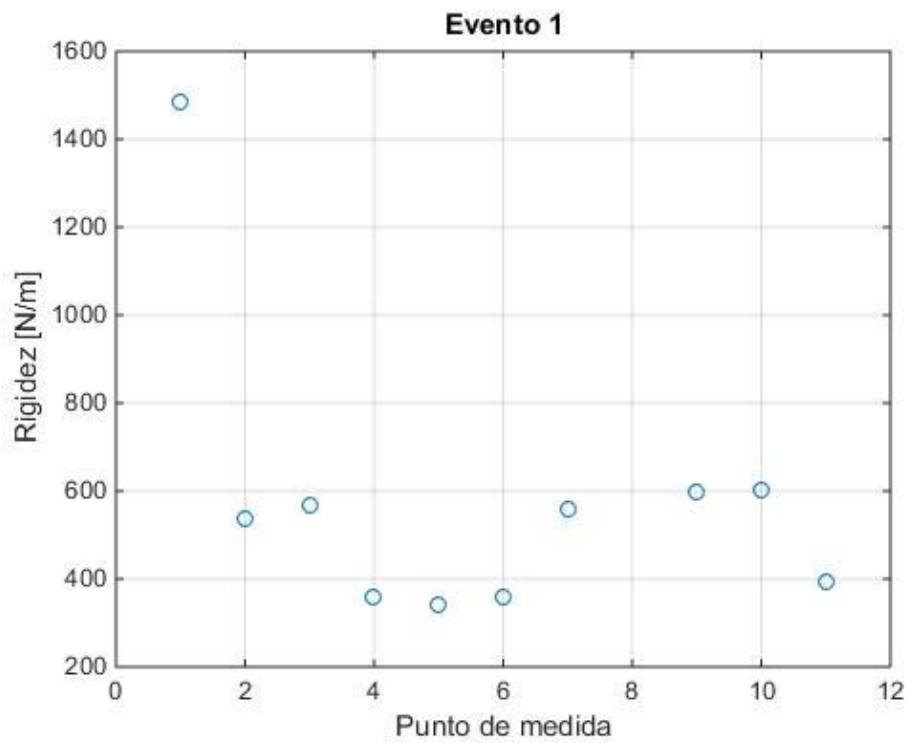


Figura 5-8. Valores de la rigidez que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 1. Puente Arroyo Bracea

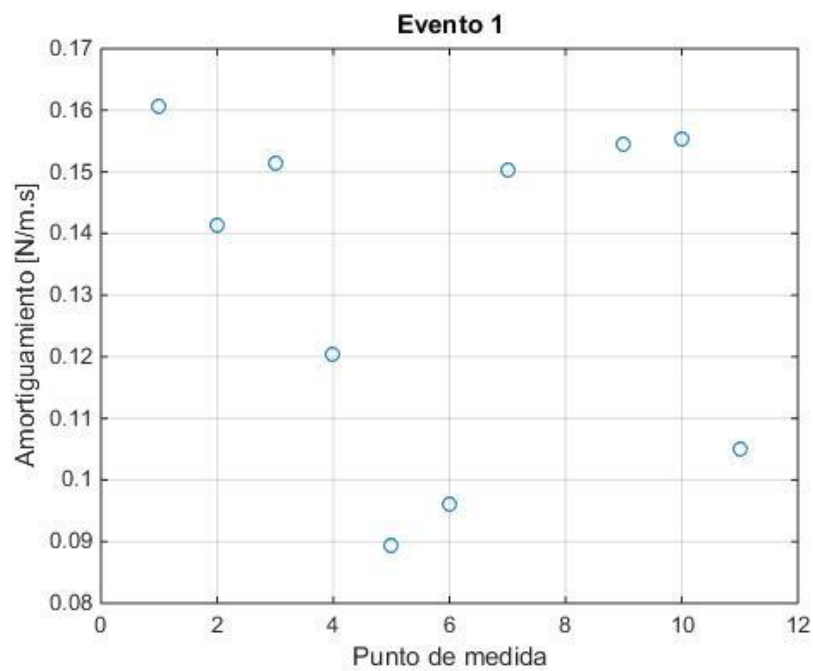


Figura 5-9. Valores del amortiguamiento que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 1. Puente Arroyo Bracea

A continuación, se va a realizar el análisis de los resultados obtenidos para el evento 2, tren S102 a 262 km/h. En primer lugar, en la Figura 5-10, se representa la energía máxima recolectada para el sistema en este evento. Puede observarse, como la distribución de energía es muy similar a la del caso anterior, siendo los puntos que generan mayor energía los puntos 4, 5, 6 y 7. Cabe destacar que, en general, los valores de energía obtenida en este evento son menores y que en este caso el punto, en el cual, la energía generada es mayor es el 5.

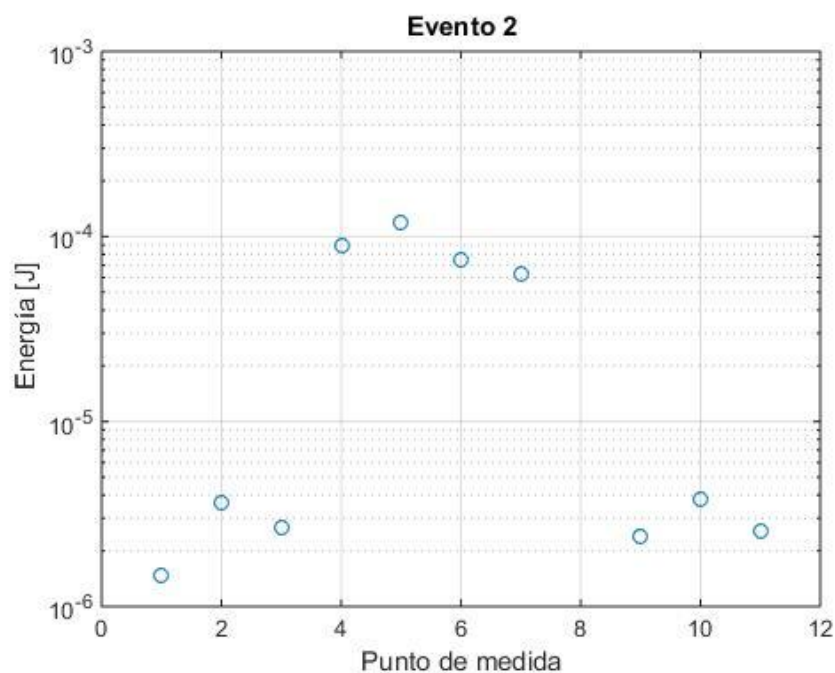


Figura 5-10. Energía máxima recolectada en cada punto para el evento 2. Puente Arroyo Bracea

Pasando ahora a analizar la que sucede con la frecuencia de sintonización del sistema. En la Figura 5-11, se representa la frecuencia a la que se sintoniza el sistema en cada punto, para el evento 2. En este caso observando la figura sí que existen diferencias apreciables con el evento anterior. En la figura podemos observar que no existe una frecuencia a la que se sintonice el sistema en la mayoría de los puntos. De hecho, se observa que existen tres frecuencias dominantes, y en cada una de ellas se sintonizan varios puntos. Las frecuencias de sintonización están en este caso en torno a los 5 Hz, correspondiéndose con la frecuencia de paso de bogie, 9 Hz, correspondiéndose con la primera frecuencia natural de puente que de 9.25 Hz, y 12 Hz, correspondiéndose con la tercera frecuencia natural del puente, que es de 12.75 Hz. Este caso es un ejemplo claro en el que se puede ver que, si las vibraciones no tienen una frecuencia claramente dominante, la sintonización óptima del sistema en cada punto no tiene por qué ser la misma. Un ejemplo diferente a este y similar al visto para el evento 1, lo veremos a continuación. Cuando analicemos el comportamiento del sistema en el evento 8, en el que cabe recordar que se producía la resonancia del puente.

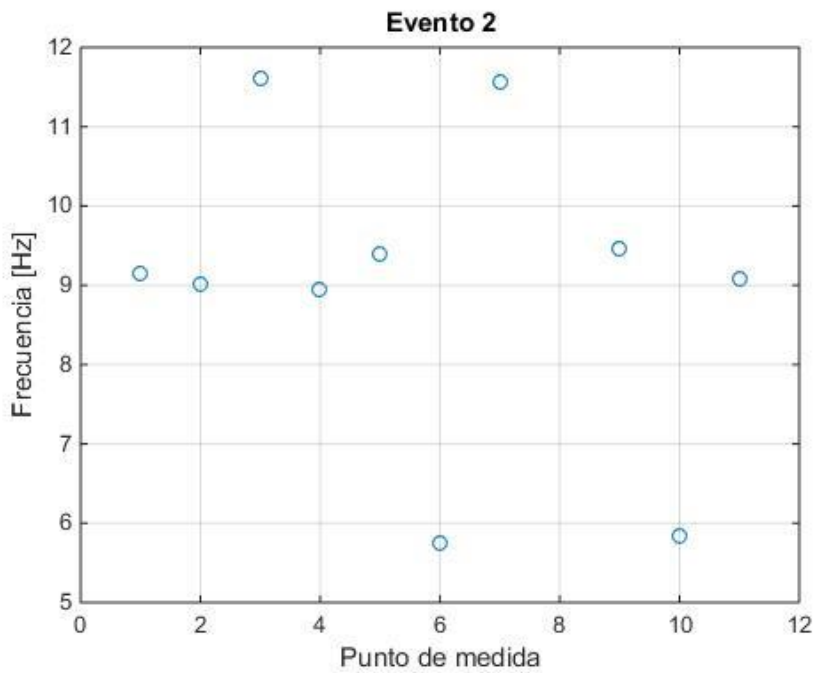
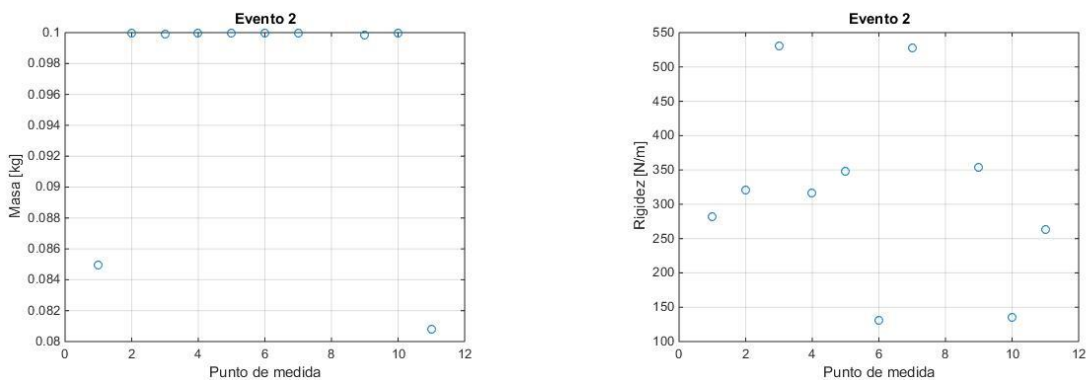


Figura 5-11. Frecuencia natural a la que se sintoniza el sistema en cada punto para el evento 2. Puente Arroyo Bracea

Para concluir el análisis de este evento, en la Figura 5-12 se pueden observar los valores de la masa, rigidez y amortiguamiento que optimizan la energía para el evento dos. Es interesante notar que, aunque las frecuencias de sintonización óptimas sean diferentes en cada punto, en la mayoría de los casos la masa óptima es la mayor posible, dentro del rango permitido.



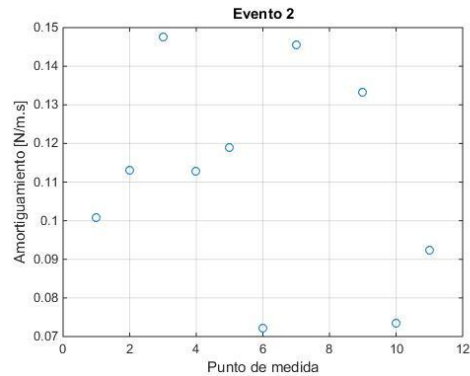


Figura 5-12. Valores de la masa, rigidez y amortiguamiento que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 2. Puente Arroyo Bracea

Para finalizar este apartado, a continuación, se muestran los resultados obtenidos en la optimización del evento ocho. Cabe recordar que en este evento pasaba por el puente un tren S103 a 279 km/h, esta velocidad de paso unida a las características del tren hacían que el puente entrase en resonancia, amplificándose así la vibración del puente.

En la Figura 5-13 se representa la máxima energía recolectada en cada punto para este evento. En esta figura puede observarse como el punto de mayor recolección de energía es el punto 6, que es el punto más alejado de los apoyos. Teniendo en cuenta que el modo de vibración asociado a la primera frecuencia de resonancia es de flexión longitudinal, este resultado tiene sentido ya que la energía máxima obtenida en cada punto concuerda con los máximos desplazamientos de cada punto. La representación gráfica de la deformada del puente asociada al primer modo de vibración se puede consultar en la Ref. [23].

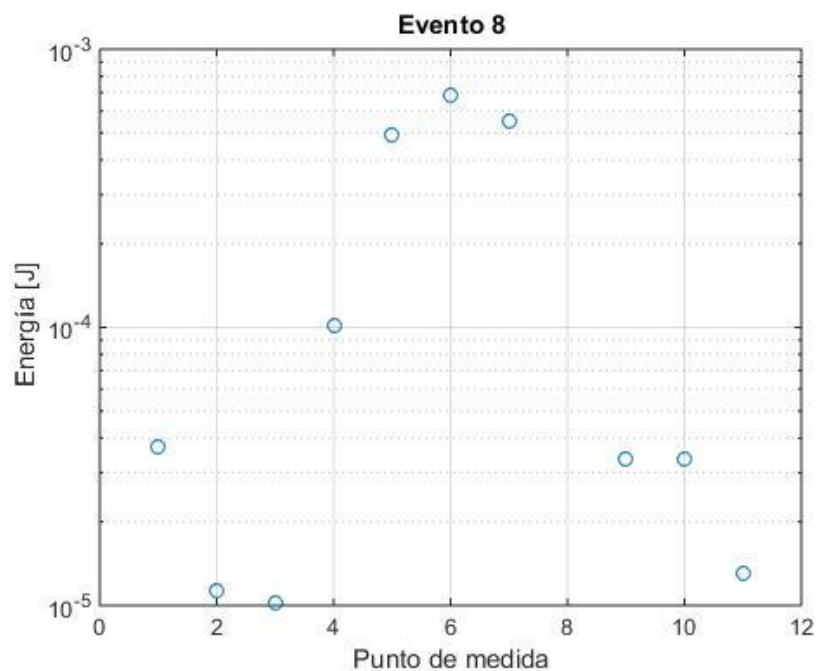


Figura 5-13. Energía máxima recolectada en cada punto para el evento 8. Puente Arroyo Bracea

En la Figura 5-14 se representa la frecuencia natural a la que se sintoniza el sistema, para obtener la máxima energía posible en cada punto. Podemos observar cómo, en la mayoría de los casos, el sistema se sintoniza a una comprendida entre 9 y 10 Hz. Este resultado quiere decir que nuestro sistema se está sintonizando con la resonancia del puente, ya que la frecuencia de resonancia de este es de 9.25 Hz, como se indicó en la Tabla 5-1. En la figura, se puede observar también como el punto 4 es el único que se sintoniza a una frecuencia cercana a la frecuencia de paso de bogie.

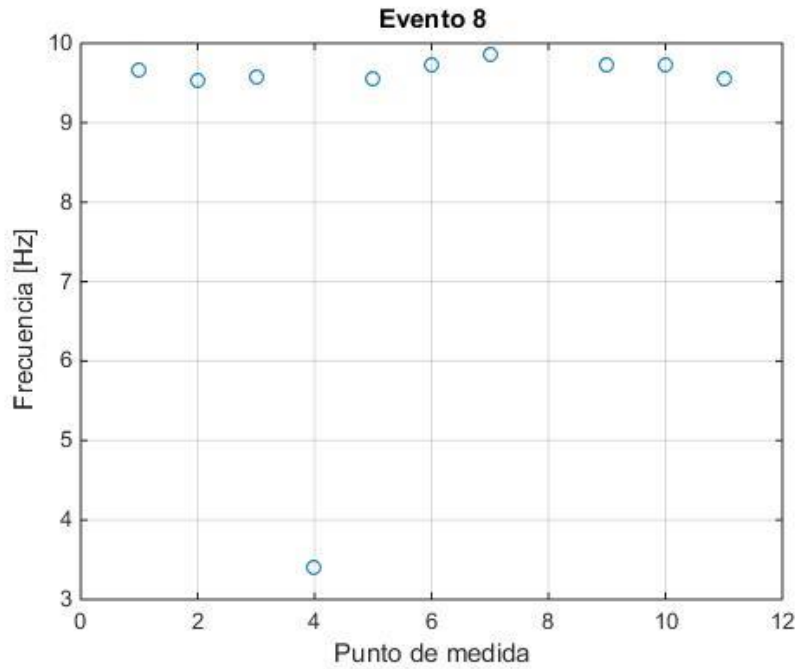


Figura 5-14. Frecuencia natural a la que se sintoniza el sistema en cada punto para el evento 8. Puente Arroyo Bracea

Para concluir este apartado, en la Figura 5-15, se pueden observar los valores de la masa, rigidez y amortiguamiento que optimizan la energía en este caso, están claramente definidos, siendo del orden de 100 gramos, 375 N/m y 0.12 N/m.s respectivamente.

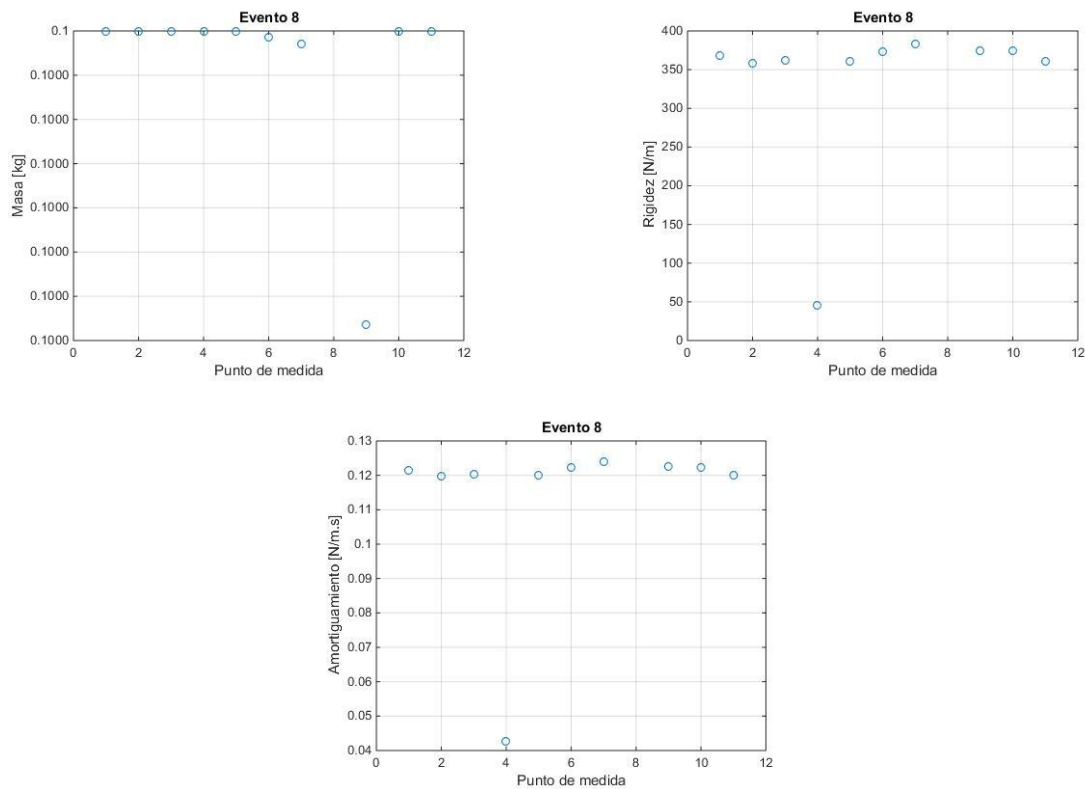


Figura 5-15. Valores de la masa, rigidez y amortiguamiento que optimizan la energía recolectada para cada punto del evento 8. Puente Arroyo Bracea



### 5.3 Cálculo de variables mecánicas óptimas para los datos de Puente Arroyo Bracea

En este apartado, se pretende definir los valores de las propiedades mecánicas que mejor se adaptan al conjunto de datos experimentales indicados en el apartado 5.1 de este trabajo. Para ello, se van a usar los datos del apartado anterior, en el que se calculó el valor de las propiedades mecánicas que optimizan la energía recolectada en cada punto de medida experimental. Es decir, en el apartado anterior se calculó un modelo óptimo para cada punto y en este se pretende definir un modelo óptimo que se adapte, lo mejor posible, al conjunto de medidas experimentales que tenemos.

Para decidir las propiedades mecánicas de este modelo vamos a analizar todos los datos, mostrados en el apartado anterior y en el apartado 7.2, de forma conjunta. En primer lugar, en la Figura 5-16, se representa la energía máxima que se puede obtener en cada punto, con respecto a su frecuencia y masa óptima asociada.

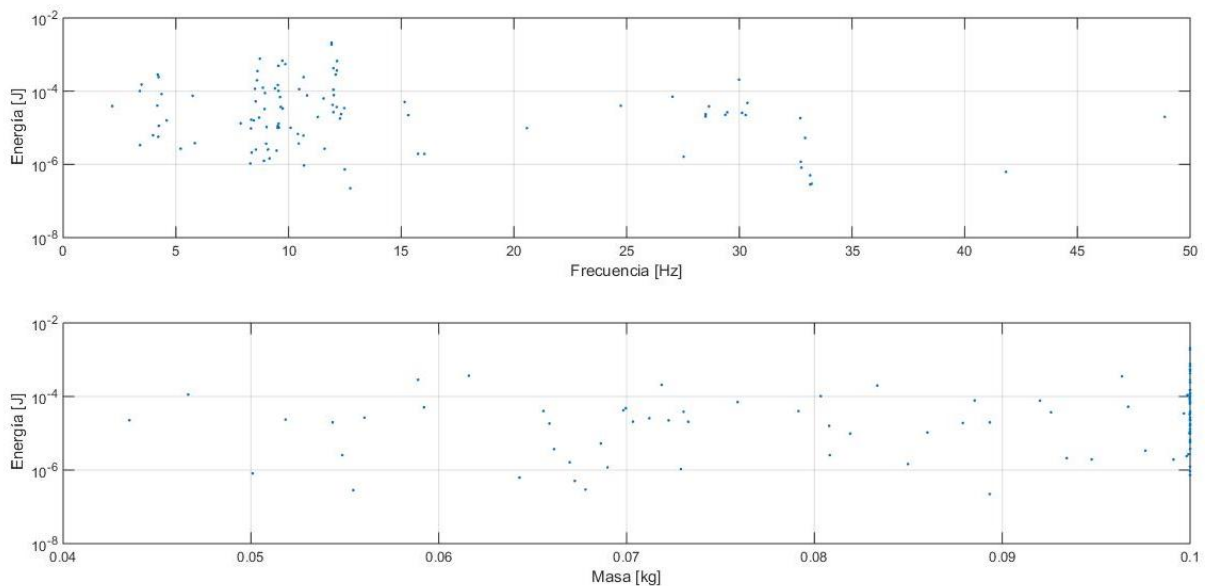


Figura 5-16. Distribución conjunta de energía con respecto a masa y frecuencia. Puente Arroyo Bracea

En la Figura 5-16, con respecto a la frecuencia, podemos observar que existen una gran cantidad de puntos óptimos en frecuencias comprendidas entre 8 y 13 Hz. Además, estos puntos van desde valores altos hasta bajos de energía, lo cual nos indica que se corresponden con diferentes puntos de medida en el puente. Esto es razonable ya que en ese rango de frecuencias se encuentran las tres primeras frecuencias naturales del puente que son, como se indica en la Tabla 5-1, 9.25 Hz, 10.63 Hz y 12.75 Hz. Adicionalmente, también se observa un grupo de puntos óptimos, para valores algo más bajos de energía, en frecuencias cercanas a 4 Hz, estando asociados a la frecuencia de paso por bogie. Por último, en torno a 30 Hz existen pequeños grupos de puntos para niveles de energía, en general, no muy altos, lo cual no convierte a esta frecuencia en un buen punto de diseño. Estos últimos puntos están asociados a la sintonización con la frecuencia de paso por eje.

Con respecto a la masa, en la Figura 5-6, podemos observar que todos los puntos tienen una masa comprendida entre 40 y 100 gramos. En esta figura se puede observar que, aunque existen puntos dispersos para diferentes valores de la masa, la mayoría de los puntos óptimos tienen asociados una masa de 100 gramos. Además, para esta masa existen puntos con valores de energía altos y bajos, lo cual nos indica que es una masa óptima para diferentes puntos de medida en el puente y confirma que este valor de la masa es apropiado para un primer punto de diseño.

Para entender lo explicado anteriormente, de una forma más visual, en las Figuras 5-17 y 5-18 se representan los porcentajes de puntos óptimos en diferentes rangos de frecuencias y masas respectivamente.

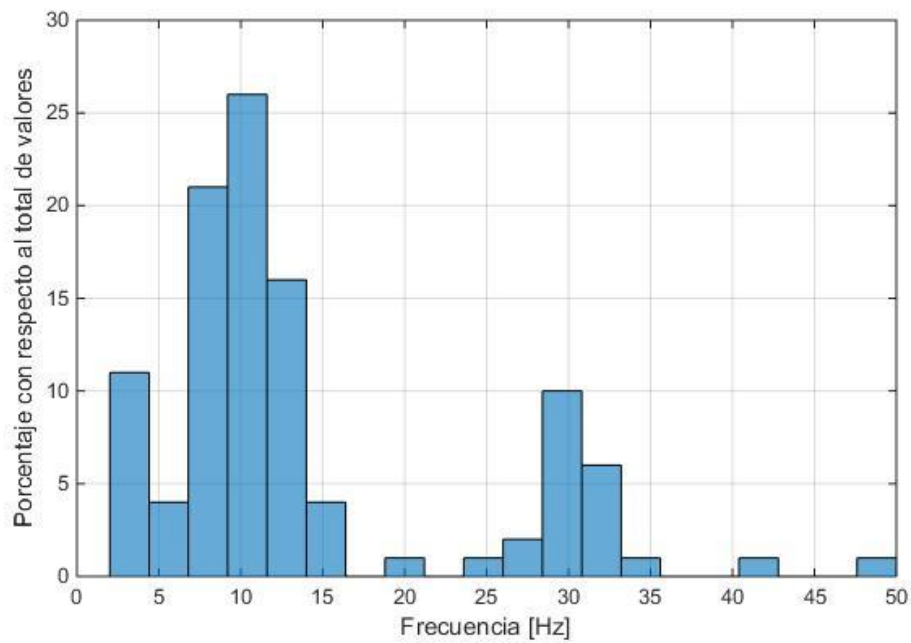


Figura 5-17. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de frecuencia. Puente Arroyo Bracea

En la Figura 5-17 se puede comprobar que la mayoría de los puntos óptimos se encuentran entre 8 y 14 Hz. Además, se pueden observar los puntos óptimos asociados a 4 Hz y 30 Hz que se comentaron anteriormente.

En la Figura 5-18 se puede comprobar que en el caso de la masa la mayoría de los puntos óptimos están asociados a masas de 100 gramos.

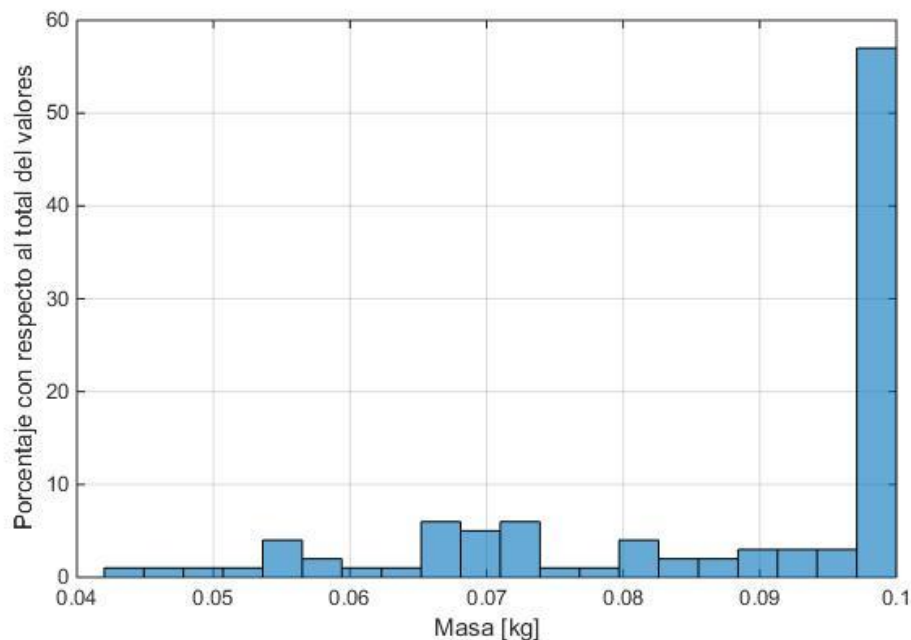


Figura 5-18. Porcentaje de puntos óptimos en cada intervalo de masas. Puente Arroyo Bracea

Observando los resultados anteriores, al no existir un único valor óptimo de la frecuencia que abarque todos los puntos, se ha decidido definir tres modelos óptimos, sintonizados a frecuencias diferentes, para poder comparar los resultados obtenidos con cada uno. En los tres modelos se ha decidido usar una valor de la masa de 100 gramos, ya que se ha comprobado que es el valor óptimo para la mayoría de los casos, dentro del rango permitido. Como apoyo para definir los valores exactos de los modelos, se ha representado el valor acumulado de la energía de todos los puntos óptimos, con respecto a la frecuencia y la masa, en las Figuras 5-19 y 5-20, respectivamente.

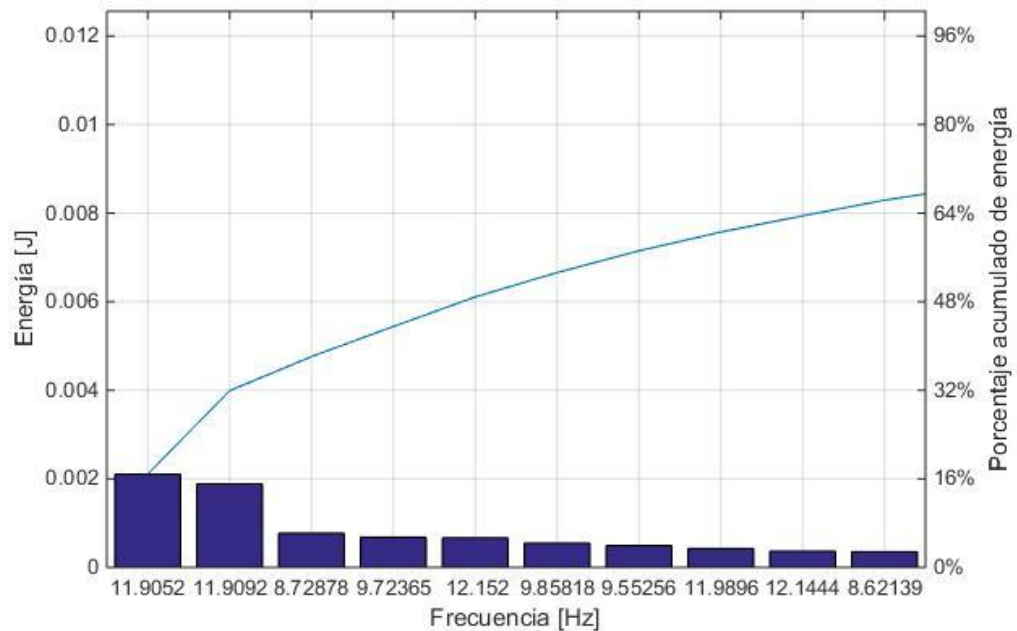


Figura 5-19. Energía acumulada con respecto a valores de la frecuencia. Puente Arroyo Bracea

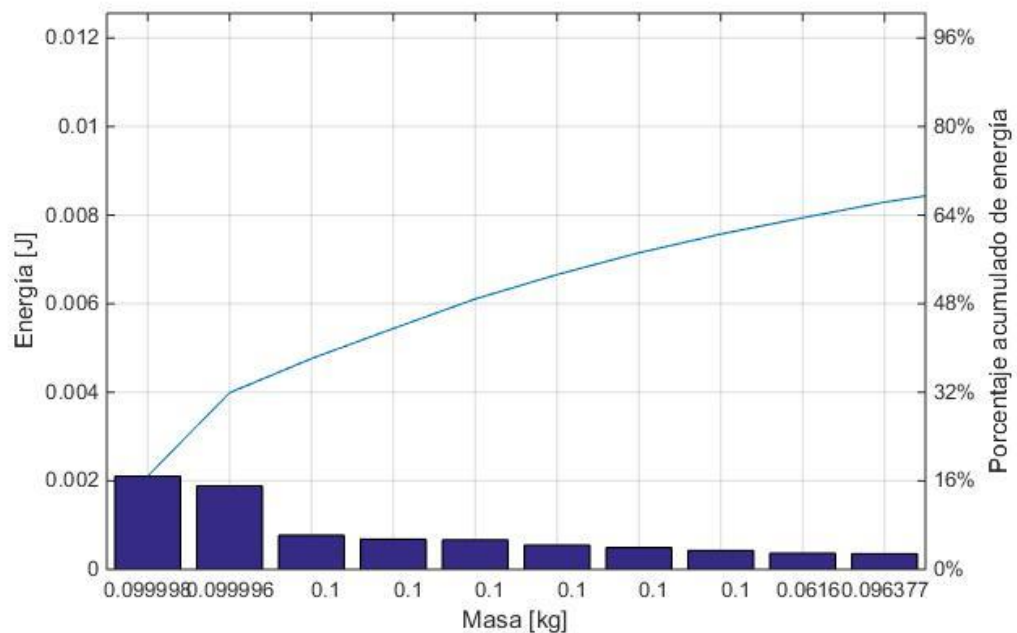


Figura 5-20. Energía acumulada con respecto a valores de la masa. Puente Arroyo Bracea

Usando todas las representaciones mostradas en este apartado, y los resultados que vimos en el apartado anterior, se han definido las siguientes propiedades mecánicas para cada uno de los tres modelos.

En el primer modelo, que a partir de ahora llamaremos Modelo 12 Hz para simplificar la notación, se han seleccionado las propiedades mecánicas indicadas en la Tabla 5-3. Como se puede observar este sistema está sintonizado a una frecuencia natural que da buenos resultados experimentales, y se encuentra entre la segunda y la tercera frecuencia natural del puente.

Tabla 5-3. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño del Modelo 12 Hz. Puente Arroyo Bracea

Variable	Valor
Masa (m)	100 gr
Rigidez (k)	559.534 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	11.905 Hz
Amortiguamiento (c)	0.1504 N/m.s

Para el segundo modelo, que a partir de ahora llamaremos Modelo 9 Hz, se han seleccionado las propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 5-4. Este modelo está sintonizado a una frecuencia cercana a la primera frecuencia natural del puente y es una frecuencia intermedia entre la primera y segunda frecuencia natural del puente.

Tabla 5-4. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño del Modelo 9 Hz. Puente Arroyo Bracea

Variable	Valor
Masa (m)	100 gr
Rigidez (k)	373.266 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	9.724 Hz
Amortiguamiento (c)	0.122 N/m.s

Por último, en el tercer modelo, que denominaremos a partir de ahora Modelo 4 Hz, se han seleccionado las propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 5-5. En este caso se ha decidido sintonizar el modelo a frecuencias bajas, cercanas a la frecuencia de paso por bogie. Se ha decidido usar este modelo porque en los resultados experimentales se ha observado que existen algunos casos en los que esta sintonización es la más óptima. Además, se trata de un modelo con una sintonización diferente, ya que está sintonizado únicamente con vibraciones asociadas a las características del tren (geometría y velocidad de paso) y no a las del puente.

Tabla 5-5. Valores óptimos seleccionados para el punto de diseño del Modelo 4 Hz. Puente Arroyo Bracea

Variable	Valor
Masa (m)	100 gr
Rigidez (k)	69.649 N/m
Frecuencia natural ( $\omega_n$ )	4.203 Hz
Amortiguamiento (c)	0.053 N/m.s

En el apartado siguiente se compara la energía producida por cada modelo, con la máxima posible, para cada una de las medidas experimentales de este capítulo.

## 5.4 Comparación de la energía recolectada con los diferentes modelos con respecto a la máxima posible.

En este apartado se va a calcular la energía recolectada por cada uno de los modelos en cada una de las medidas experimentales de los diferentes eventos. Se comparará con la máxima posible en cada punto y se discutirá que modelo se adapta mejor en cada caso.

En todas las representaciones de este apartado los puntos en rojos representan el máximo valor posible. En azul se representa el valor obtenido por el Modelo 12 Hz, en verde el obtenido por el Modelo 9 Hz y el magenta el obtenido por el Modelo 4 Hz.

En primer lugar, en la Figura 5-21 se representan, a modo de ejemplo, los resultados para el evento 1. En esta figura podemos observar que el Modelo 12 Hz es el que mejor se adapta a las medidas experimentales. Es interesante notar como en el punto 5 el modelo a 9 Hz obtiene mejores resultados, para entender esto es necesario recordar la figura 5-6 (en esa figura se puede observar que para el punto 5 en el evento 1 la sincronización óptima está más cercana al modelo a 9 Hz que al modelo a 12 Hz). De la Figura 5-21 cabe destacar que en el punto 7 la energía producida por el modelo 12 Hz coincide con la máxima posible. Esto se debe a que el punto de sintonización del modelo a 12 Hz coincide con este punto. Por último, se puede observar que los valores de energía obtenidos por el Modelo 4 Hz son muy inferiores en este caso.

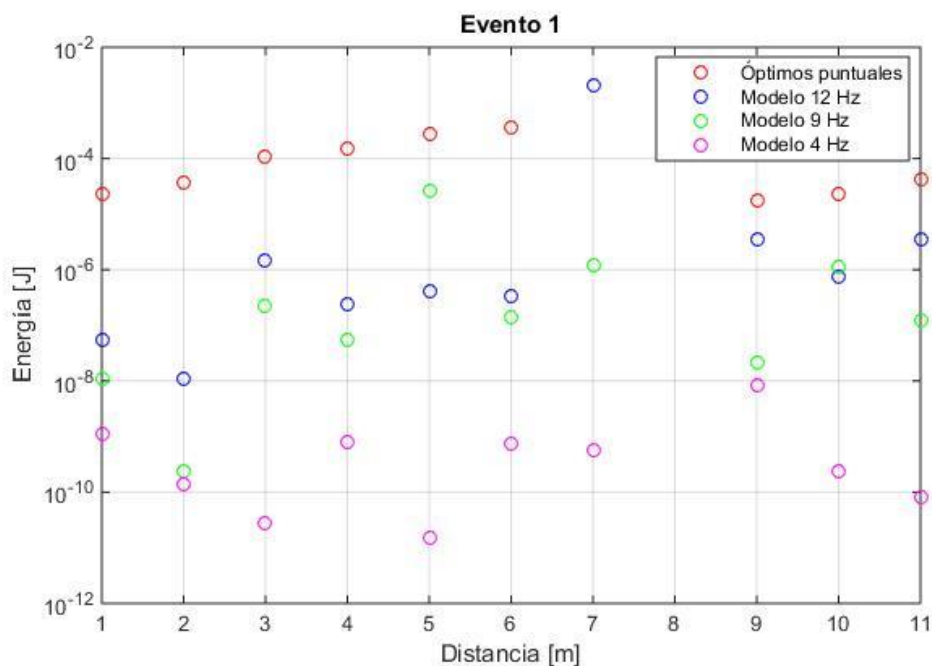


Figura 5-21. Comparación de la energía con los diferentes modelos con respecto a los máximos de la energía en cada punto para el evento 1. Puente Arroyo Bracea

En segundo lugar, en la Figura 5-22 se representan, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el evento 8. En este caso, podemos observar como el modelo que mejor resultados proporciona es el modelo 9 Hz. Este resultado era previsible si recordamos que este evento, como se comentó en apartados anteriores, se corresponde con la resonancia del puente. Se puede observar como en el punto 6 la energía recolectada por el modelo coincide con la máxima posible, esto sucede porque la sintonización del modelo 9 Hz se ha seleccionado para ese punto. En interesante comentar como siendo la frecuencia de sintonización óptima del resto de puntos cercana a la del modelo 9 Hz (ver figura 5-14), la energía producida es considerablemente menor a la máxima posible. Esto confirma que, el rendimiento del dispositivo de producción de energía se limita a una banda de funcionamiento muy estrecha alrededor de su frecuencia de resonancia [15]. Produciéndose una drástica disminución de la energía producida si la frecuencia de las vibraciones se desvía ligeramente de la frecuencia natural del recolector.

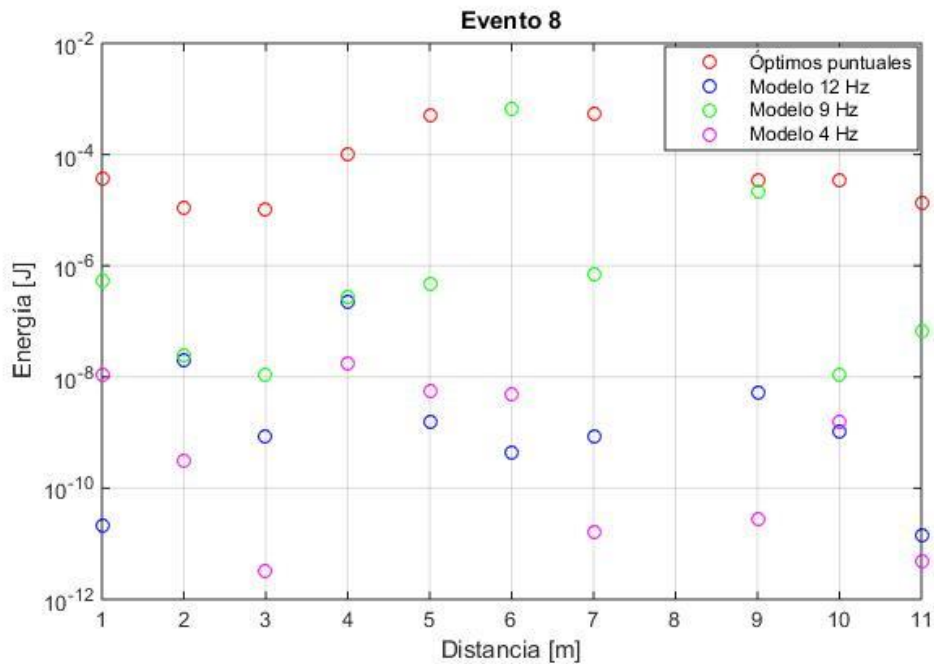
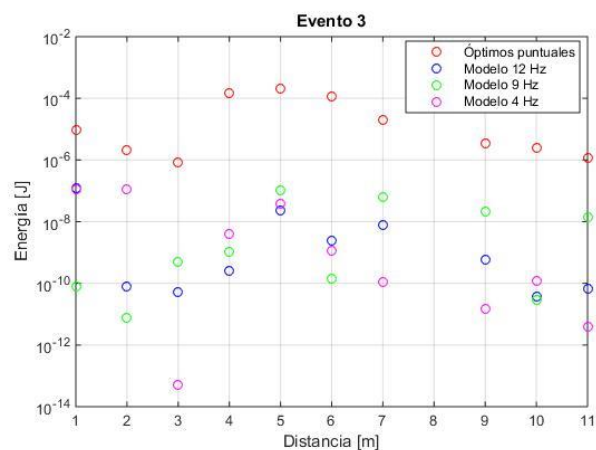
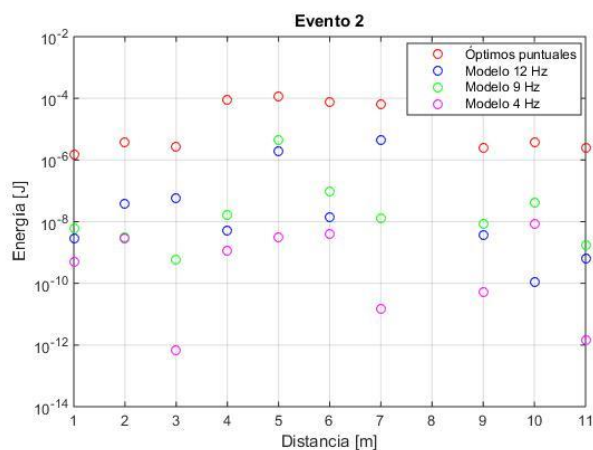


Figura 5-22. Comparación de la energía con los diferentes modelos con respecto a los máximos de la energía en cada punto para el evento 8. Puente Arroyo Bracea

En la Figura 5-22 podemos observar también como para este evento el modelo 4 Hz da, en algunos casos, mejores resultados que el modelo 12 Hz. Esto es debido a que el modelo a 4 Hz tiene la capacidad de absorber energía de las vibraciones producidas por el paso de bogie, mientras que el modelo 12 Hz al no estar sintonizado con la resonancia del puente, pierde capacidad para recolectar energía.

Por último, en la Figura 5-23 se representan los resultados obtenidos para el resto de eventos. En todos ellos se puede identificar comportamientos similares a los comentados en los anteriores. Dependiendo cual es el modelo más indicado, de las vibraciones del puente para cada caso. Existiendo incluso casos en los cuales el modelo que mejor se adapta es el modelo 4 Hz.

De todo lo anterior podemos concluir que no existe un único modelo que pueda resultar óptimo para todos los casos, de forma que, de cara a un diseño real, sería necesario realizar un estudio de las vibraciones concretas a las que más va a estar sometido el puente, para así poder realizar un diseño centrado en su absorción.



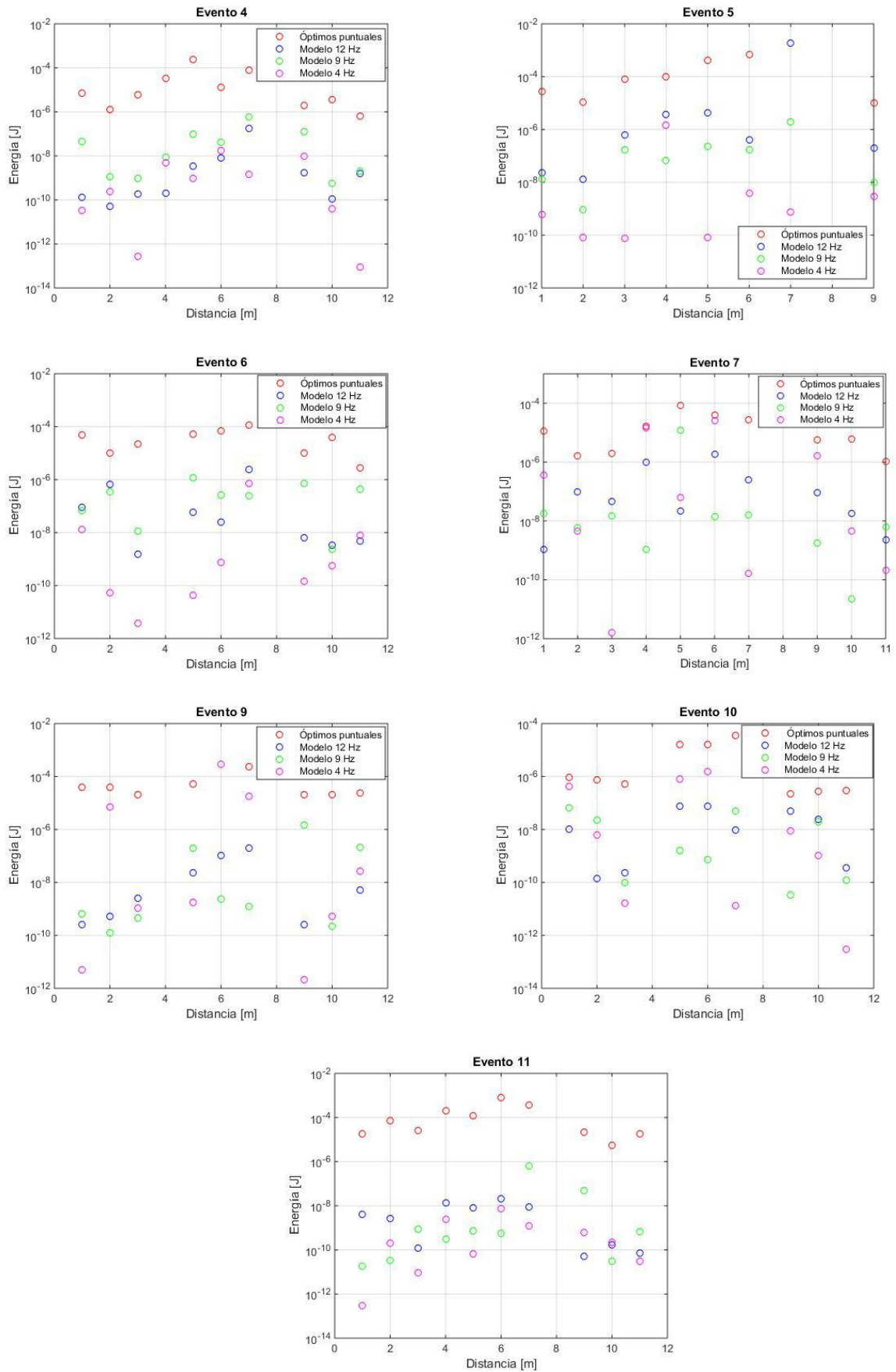


Figura 5-23. Comparación de la energía con los diferentes modelos con respecto a los máximos de la energía en cada punto para los eventos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 y 11. Puente Arroyo Bracea





# 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTUROS

---

En este trabajo se ha realizado la optimización, mediante el uso de algoritmos genéticos, de un sistema piezoeléctrico de recolección de energía. Para ello, se han optimizado las propiedades mecánicas del sistema, usando como valores de entrada diferentes medidas de excitaciones provocadas por el paso de trenes en Líneas de Alta Velocidad. A continuación, se presentan las conclusiones más importantes que se han obtenido.

En primer lugar, en todos los casos estudiados, los valores de energía obtenidos, en cada pasada de un tren, son pequeños. Esto hará necesario que el sistema recolecte y almacene energía durante un periodo de tiempo. Una vez conseguida la energía necesaria, de forma puntual, esta energía podrá ser usada por el sistema electrónico asociado, pudiendo ser por ejemplo un sistema de registro y envío de datos.

En segundo lugar, se ha comprobado que la energía óptima se obtiene cuando la frecuencia natural del sistema se sintoniza con la de las vibraciones. Adicionalmente, se ha podido comprobar que el rendimiento del recolector de energía se limita a una banda de funcionamiento muy estrecha alrededor de su frecuencia de resonancia. Produciéndose una drástica disminución de la energía producida si la frecuencia de las vibraciones se desvía de la frecuencia natural del recolector.

En tercer lugar, se ha comprobado que para maximizar la energía producida el sistema debe tener una masa elevada (dentro de las limitaciones físicas que el diseño permita) y un amortiguamiento pequeño, para permitir al sistema oscilar el mayor tiempo posible, aumentando así la energía recolectada.

Comparando los valores de energía para las diferentes medidas utilizadas. Se ha comprobado que, como era de esperar, la energía recolectada en las medidas de Puente Arroyo Bracea es mayor, en general, que la obtenida, usando las medidas de las LAVs Córdoba-Málaga y París-Bruselas. Esto es debido, principalmente, a que las vibraciones en el puente están menos amortiguadas que en el suelo.

En los casos en los que se han usado de medidas experimentales en el suelo, es decir, los casos Córdoba-Málaga y París-Bruselas. Se ha comprobado como la velocidad de paso del tren no afecta considerablemente a la energía, siendo la distancia al eje de la vía la variable que más condiciona la energía recolectada. Se ha comprobado como en el caso de Córdoba-Málaga (régimen sub-Rayleigh) el resultado óptimo es sintonizar el sistema a una frecuencia cercana a la frecuencia de paso por eje. En París Bruselas (régimen super-Rayleigh), se ha comprobado que el resultado óptimo se obtiene sintonizando el sistema a frecuencias cercanas a la frecuencia de paso por bogie.

En el análisis realizado usando las medidas del Puente Arroyo Bracea. Se ha obtenido que, dependiendo de variables como el tipo de tren, la velocidad del tren o la vía de paso, la frecuencia óptima de sintonización es diferente. En la mayoría de los casos, la frecuencia óptima está asociada a una de las frecuencias naturales del puente o a la frecuencia de paso de bogie. Se ha observado también que, en casos puntuales, la frecuencia óptima puede estar asociada a la frecuencia de paso por eje.

Los resultados obtenidos en este trabajo validan el uso de los algoritmos genéticos para la optimización de problemas de este tipo. Además, dan unos primeros resultados cualitativos y cuantitativos de la optimización de la energía producida por un sistema de recolección piezoeléctrico.

A continuación, se presentan algunas líneas de trabajo futuro relacionadas con este trabajo:

- En primer lugar, se podría usar el algoritmo desarrollado para analizar otras medidas experimentales de vibraciones producidas por trenes. Aumentado así la cantidad de datos disponibles para la creación de modelos óptimos de recolección de energía.
- En segundo lugar, se podría introducir en el algoritmo la optimización de las propiedades del material piezoeléctrico y de la resistencia de la carga. Esto llevaría asociado un aumento de tiempo de computación, ya que se pasaría de tres variables de optimización a seis, pero permitiría una mejora en la cantidad de energía recolectada.
- En tercer lugar, se podría modificar el modelo usado. Podría desarrollarse un modelo de dos grados de libertad. Usando una segunda masa conectada a la primera con una muelle y un amortiguador. En este caso tendríamos un sistema con seis variables de optimización, considerando fijas las propiedades piezoeléctricas del material y la resistencia de la carga.
- Por último, como trabajo futuro se propone la fabricación de un recolector de energía. Esto permitiría tener un valor experimental de la energía producida por el sistema de recolección, que podría ser comparada con el valor que predice el modelo. Para el diseño de este recolector sería necesario también realizar un trabajo previo, asociado a la búsqueda de los materiales piezoeléctricos disponibles en el mercado. Buscando el tipo de material y la geometría del diseño que proporcione las variables óptimas, tanto mecánicas como eléctricas, necesarias.

# 7 ANEXO LAV PARÍS-BRUSELAS

## 7.1 Gráficas Medidas Experimentales en el dominio de la frecuencia

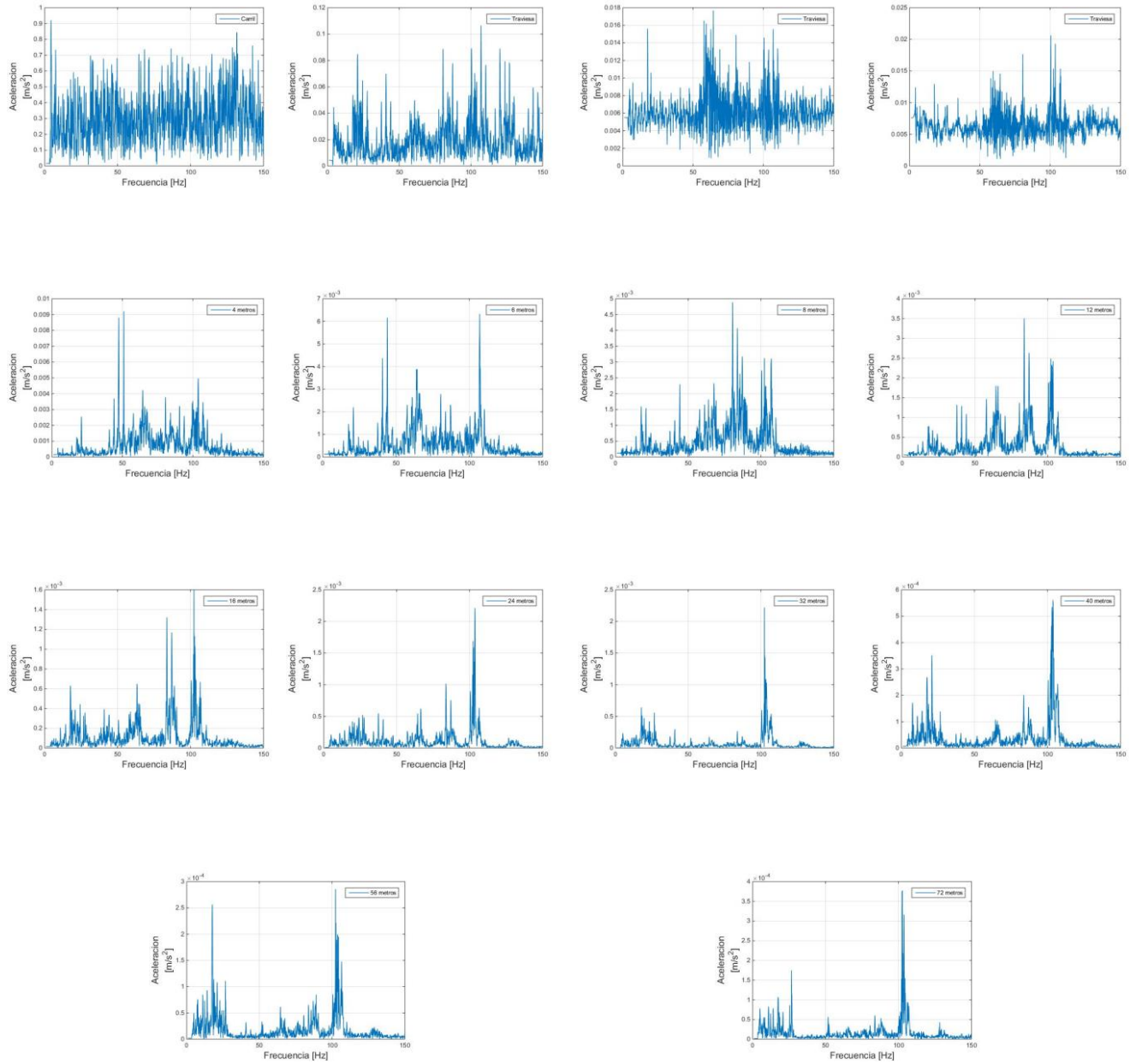


Figura 7-1. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 11 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

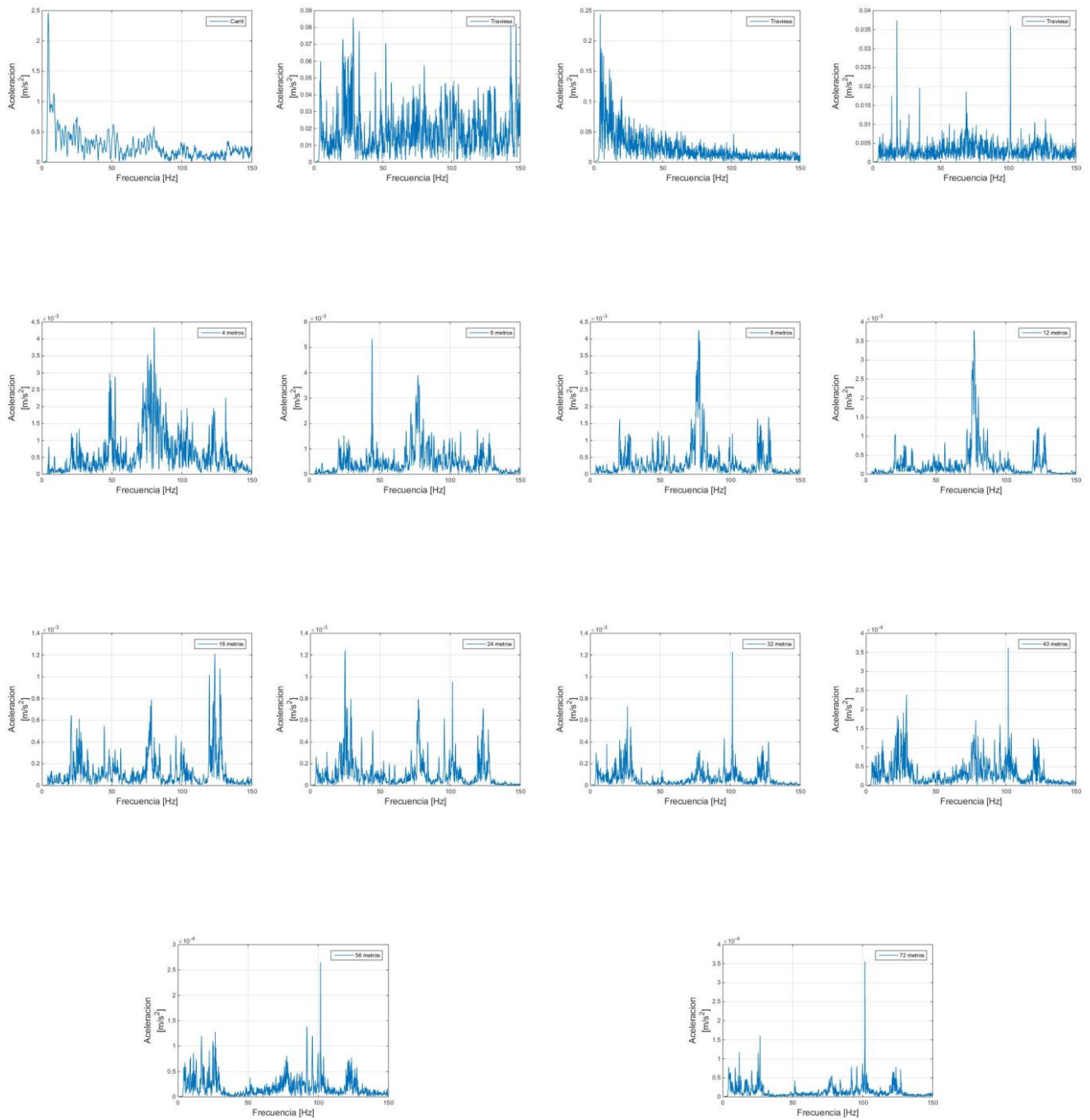


Figura 7-2. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 12 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

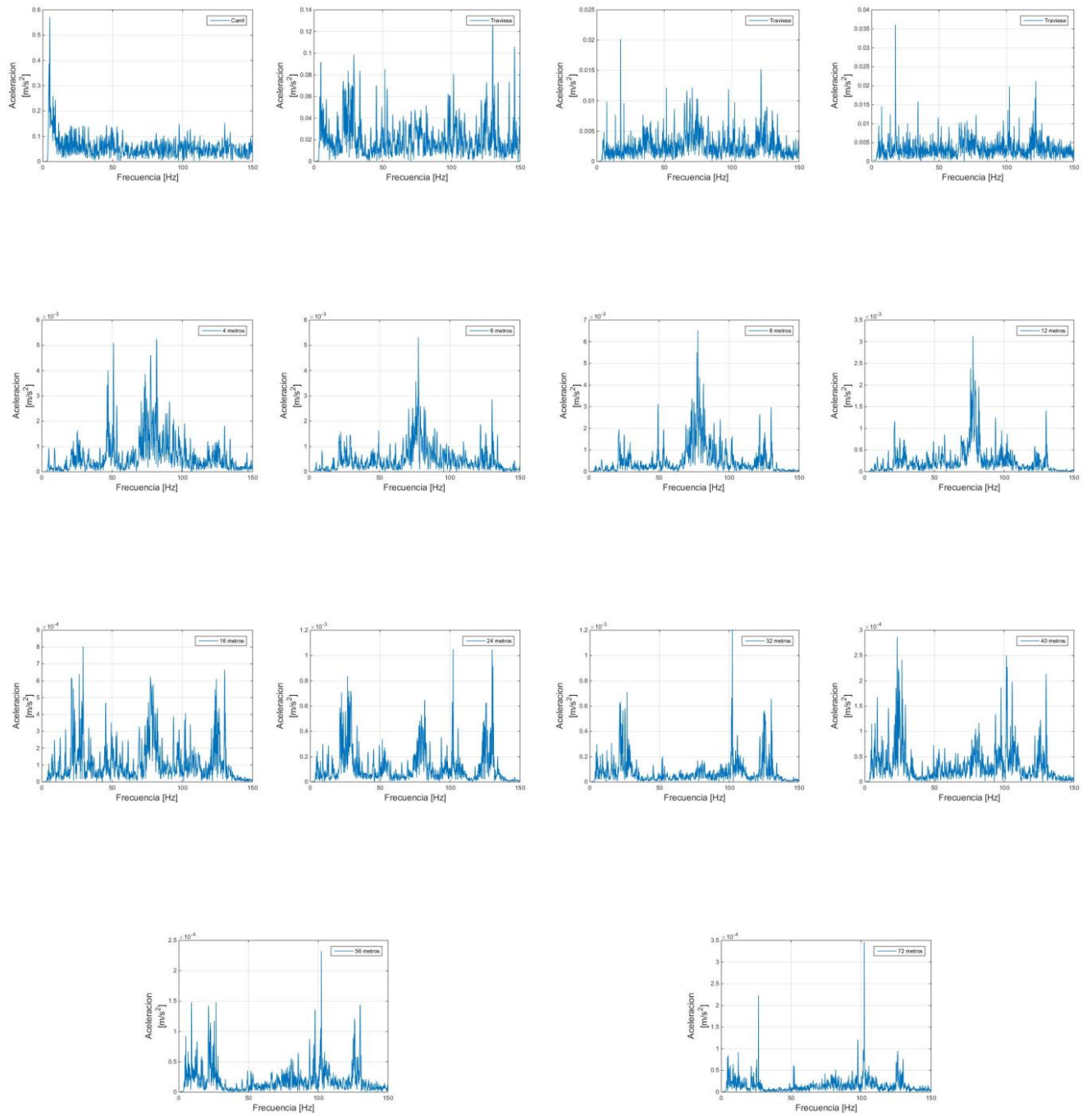


Figura 7-3. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 13 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

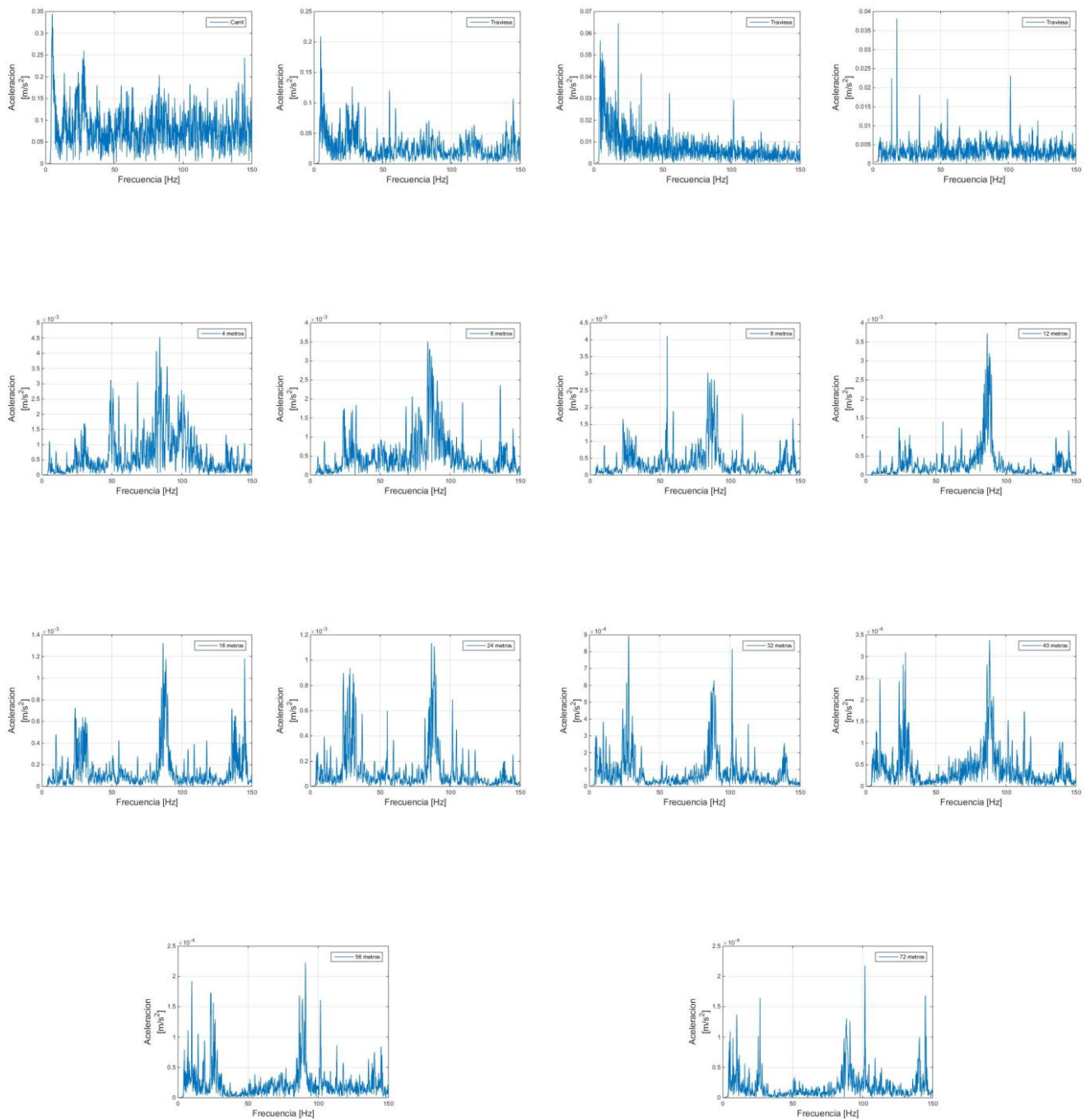


Figura 7-4. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 14 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

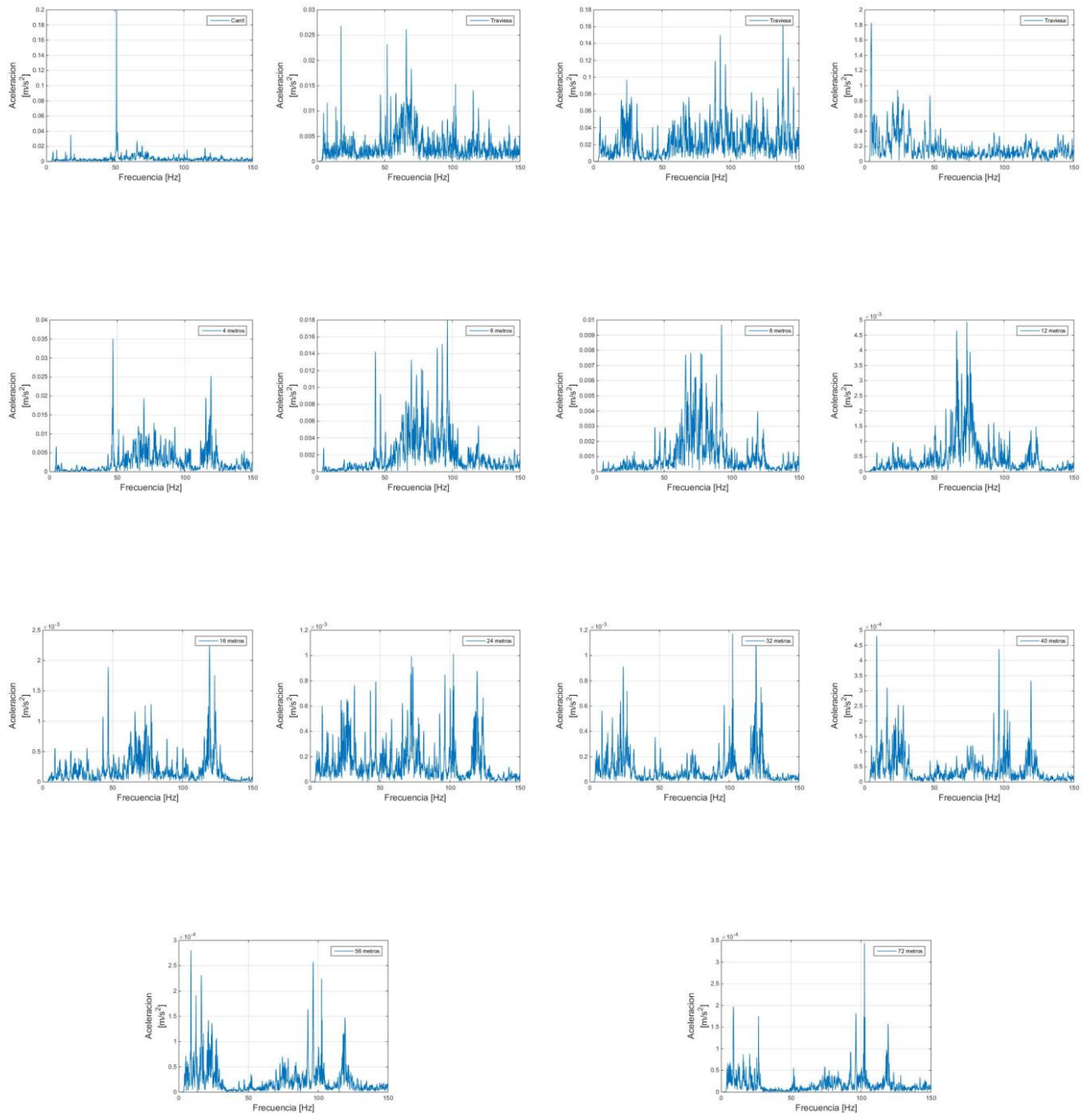


Figura 7-5. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 21 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

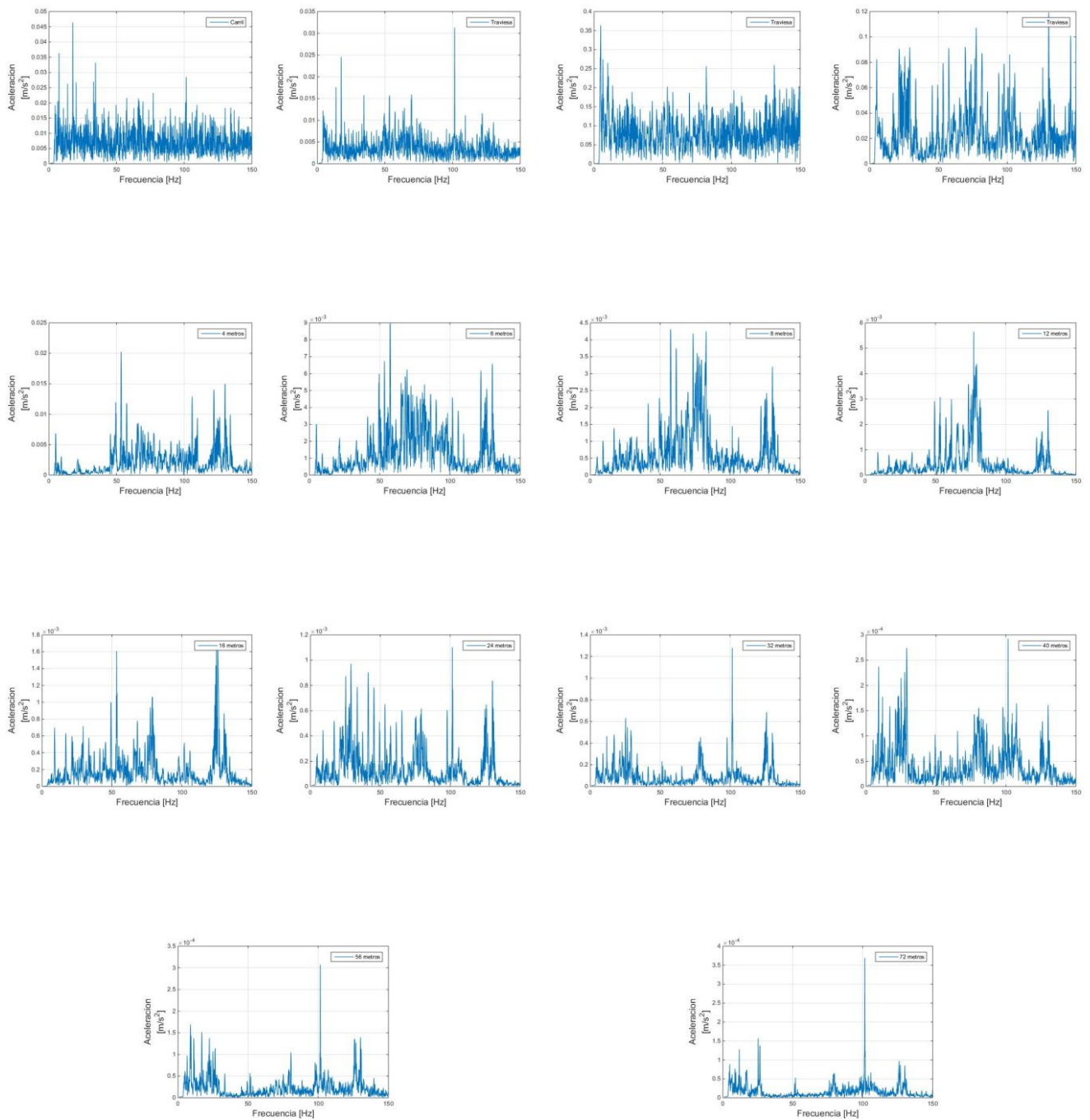


Figura 7-6. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 22 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas



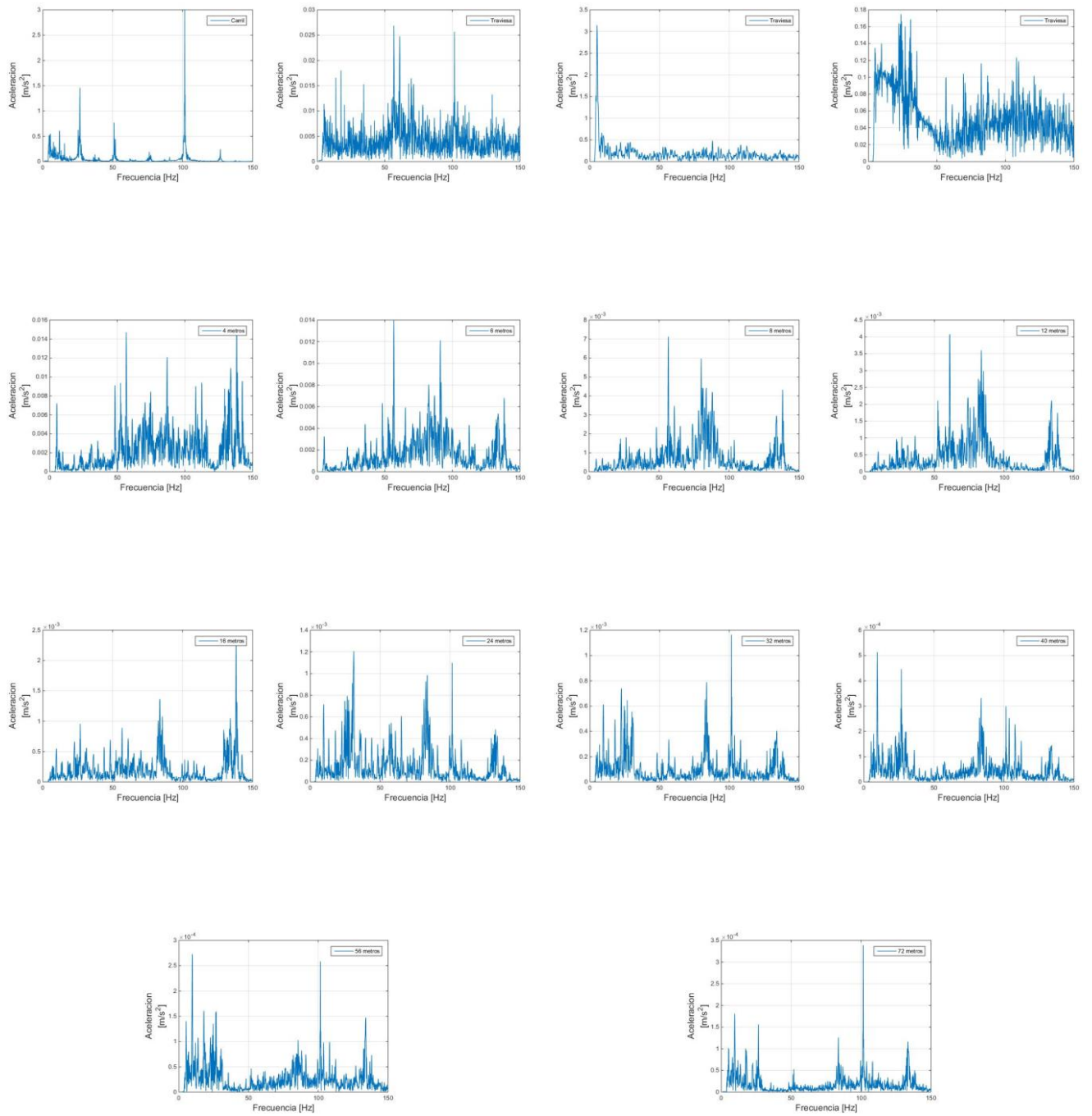


Figura 7-7. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 23 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

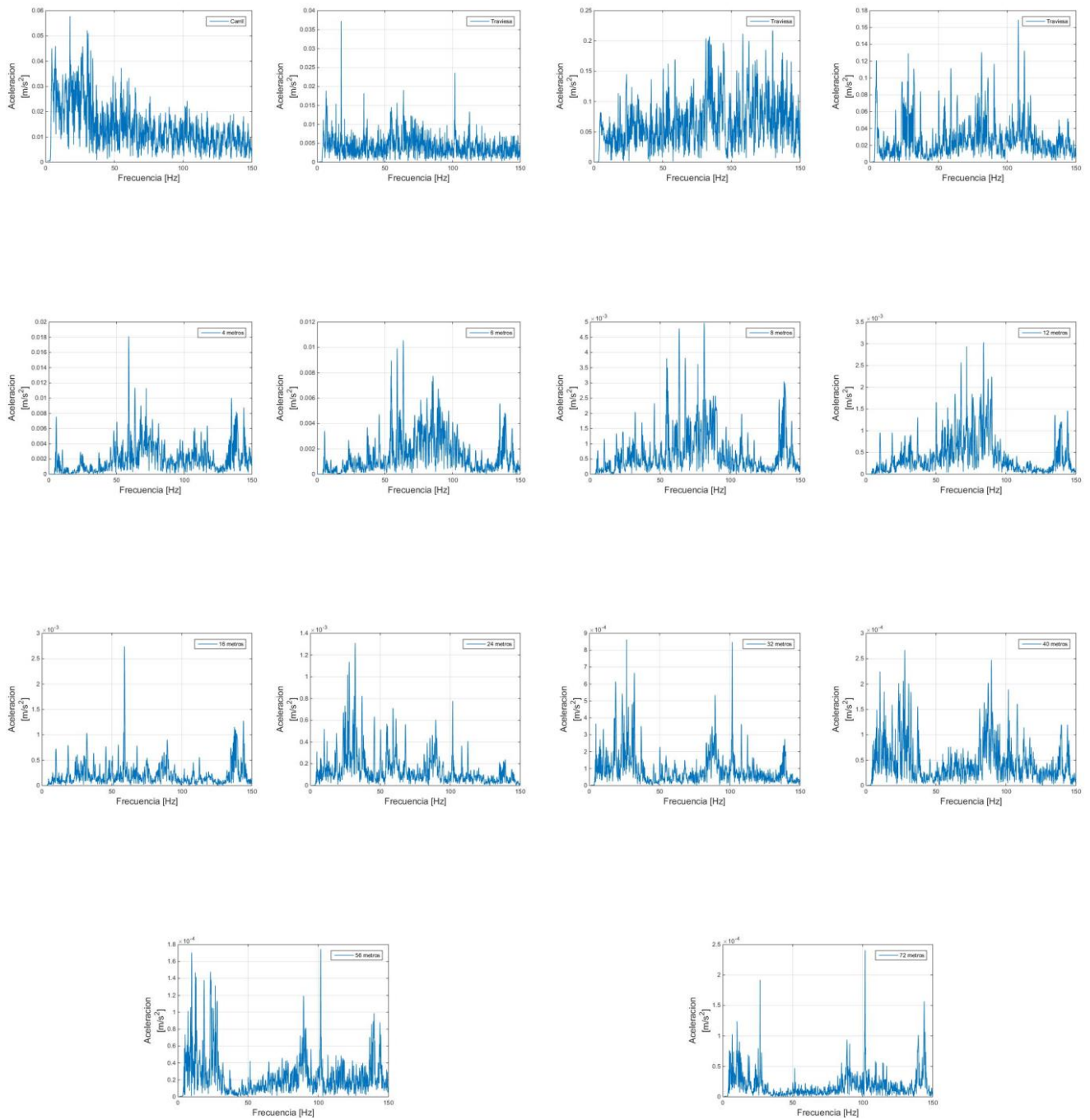


Figura 7-8. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 24 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas

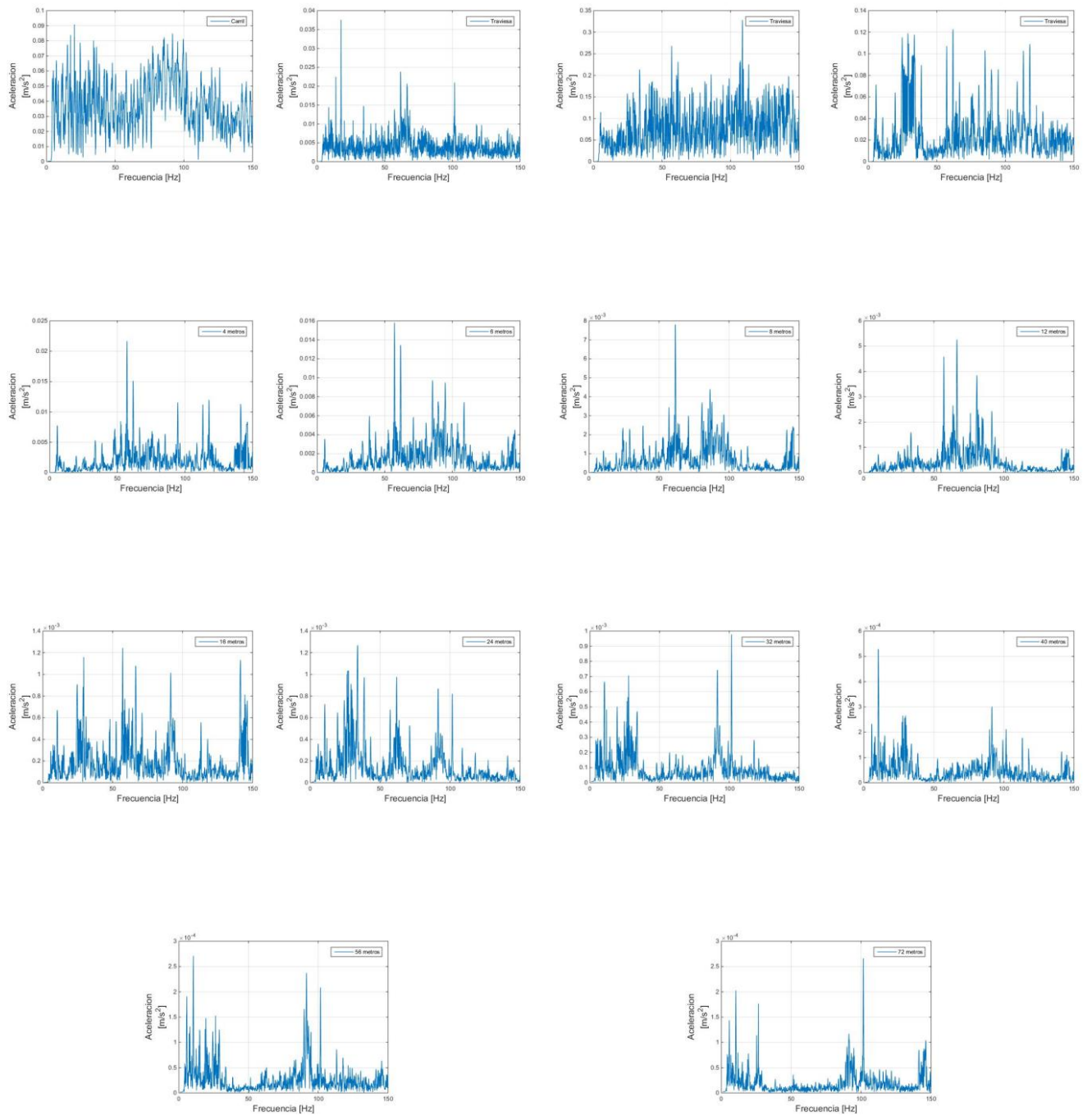


Figura 7-9. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 25 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 4-11. LAV París-Bruselas



# 8 ANEXO PUENTE BRACEA

## 8.1 Gráficas Medidas Experimentales en el dominio de la frecuencia

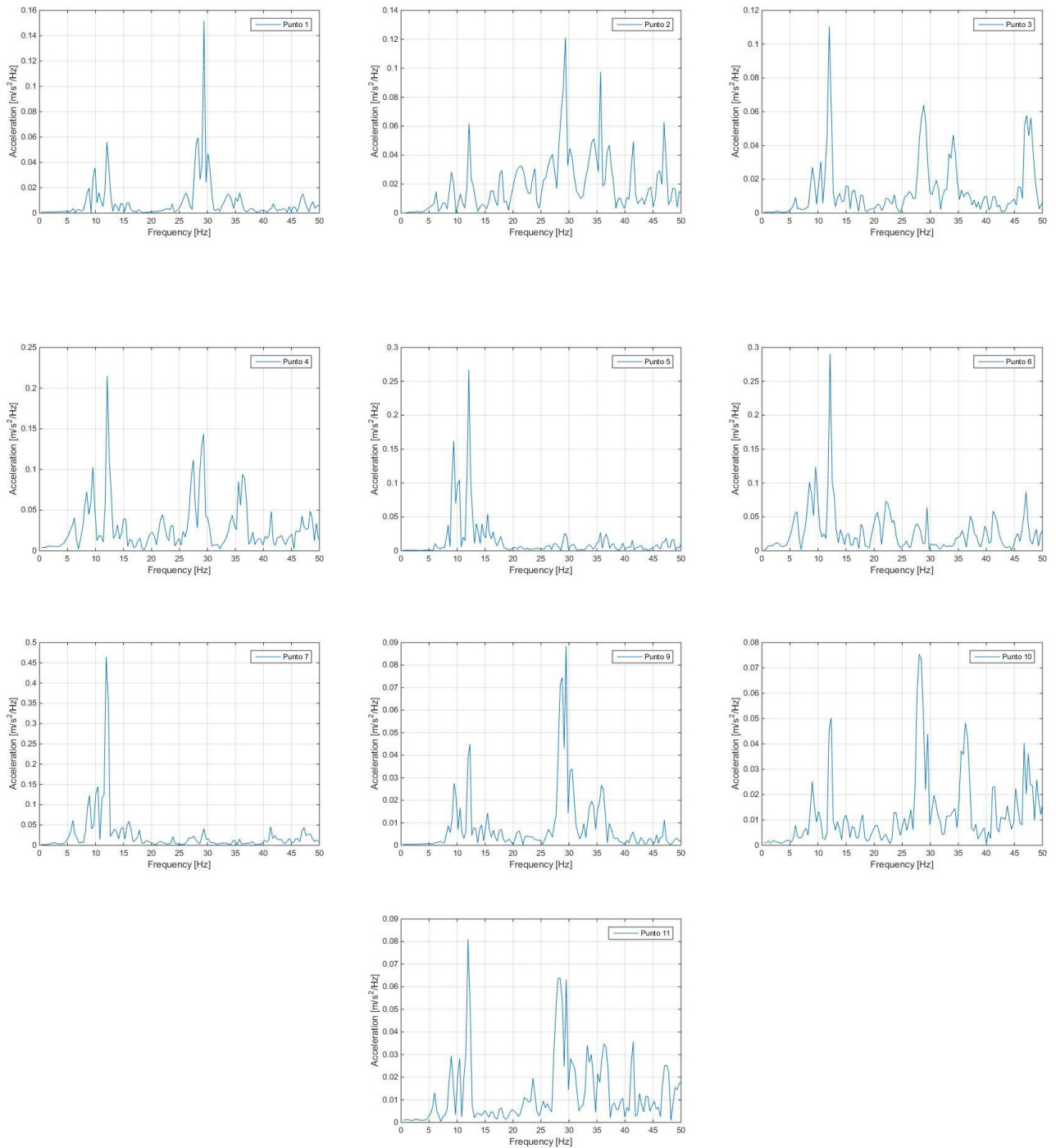


Figura 8-1. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 1 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea

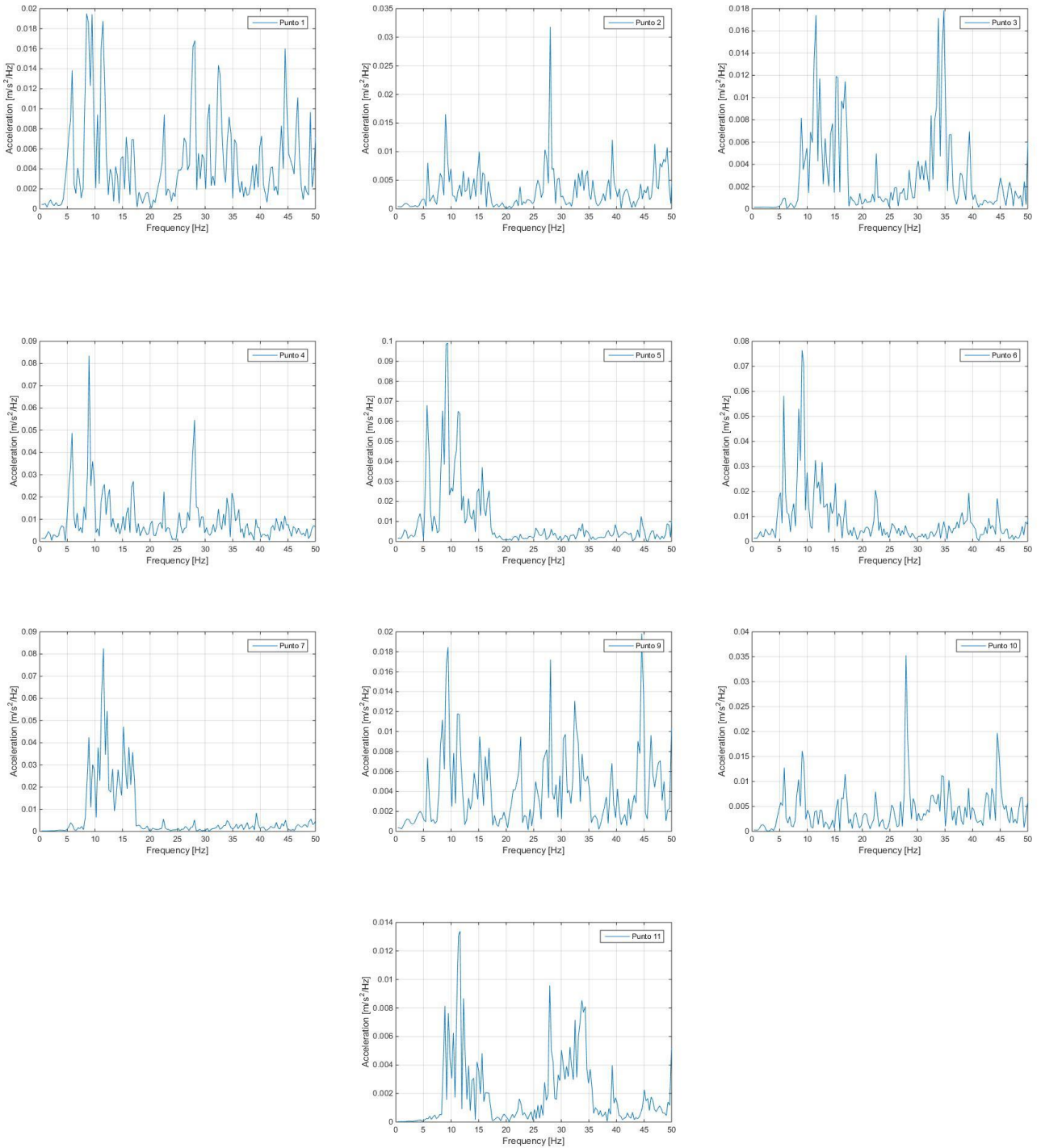


Figura 8-2. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 2 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracca

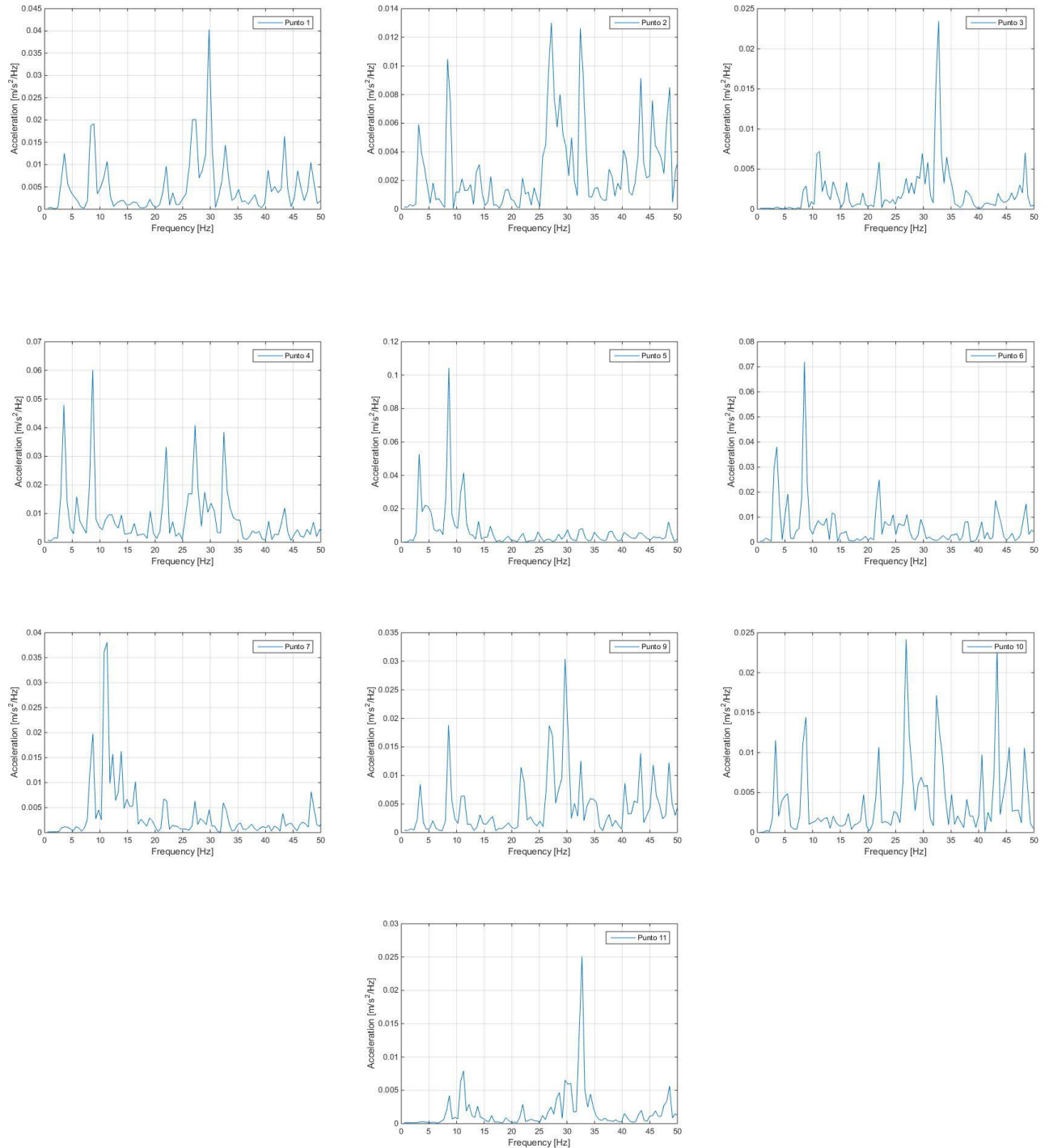


Figura 8-3. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 3 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea



Figura 8-4. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 4 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea



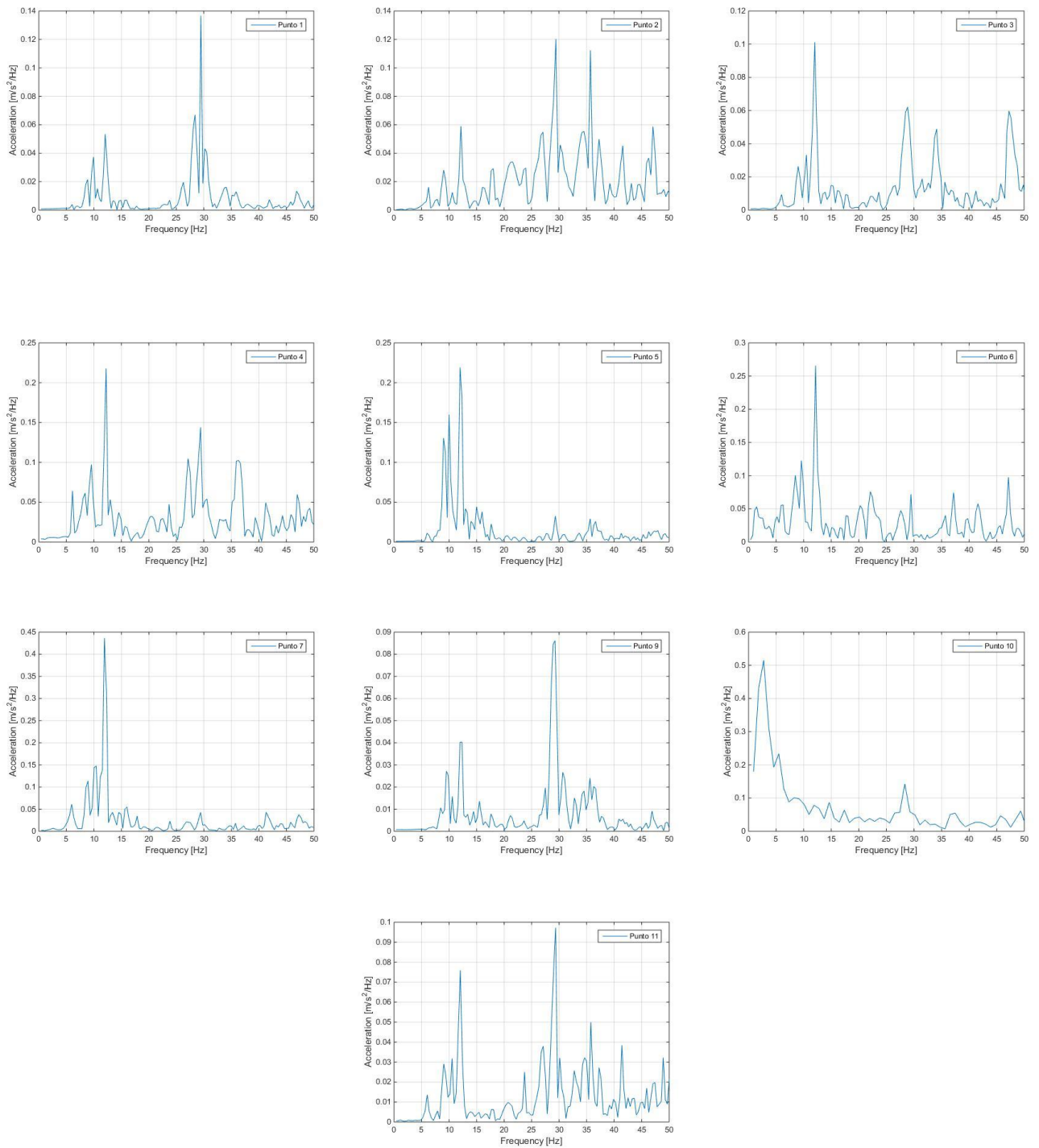


Figura 8-5. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 5 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea

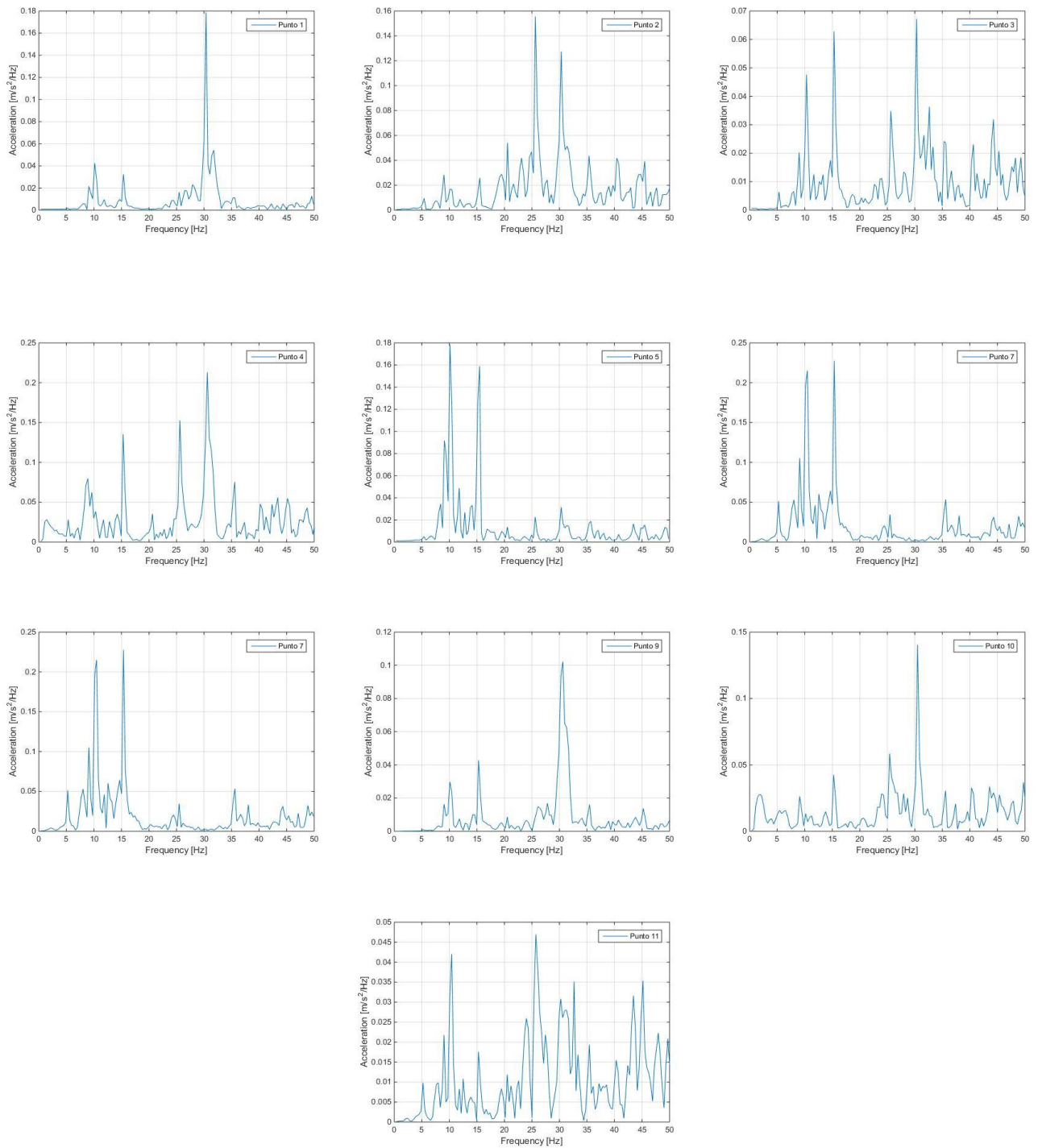


Figura 8-6. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 6 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea



Figura 8-7. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 7 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea



Figura 8-8. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 8 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea

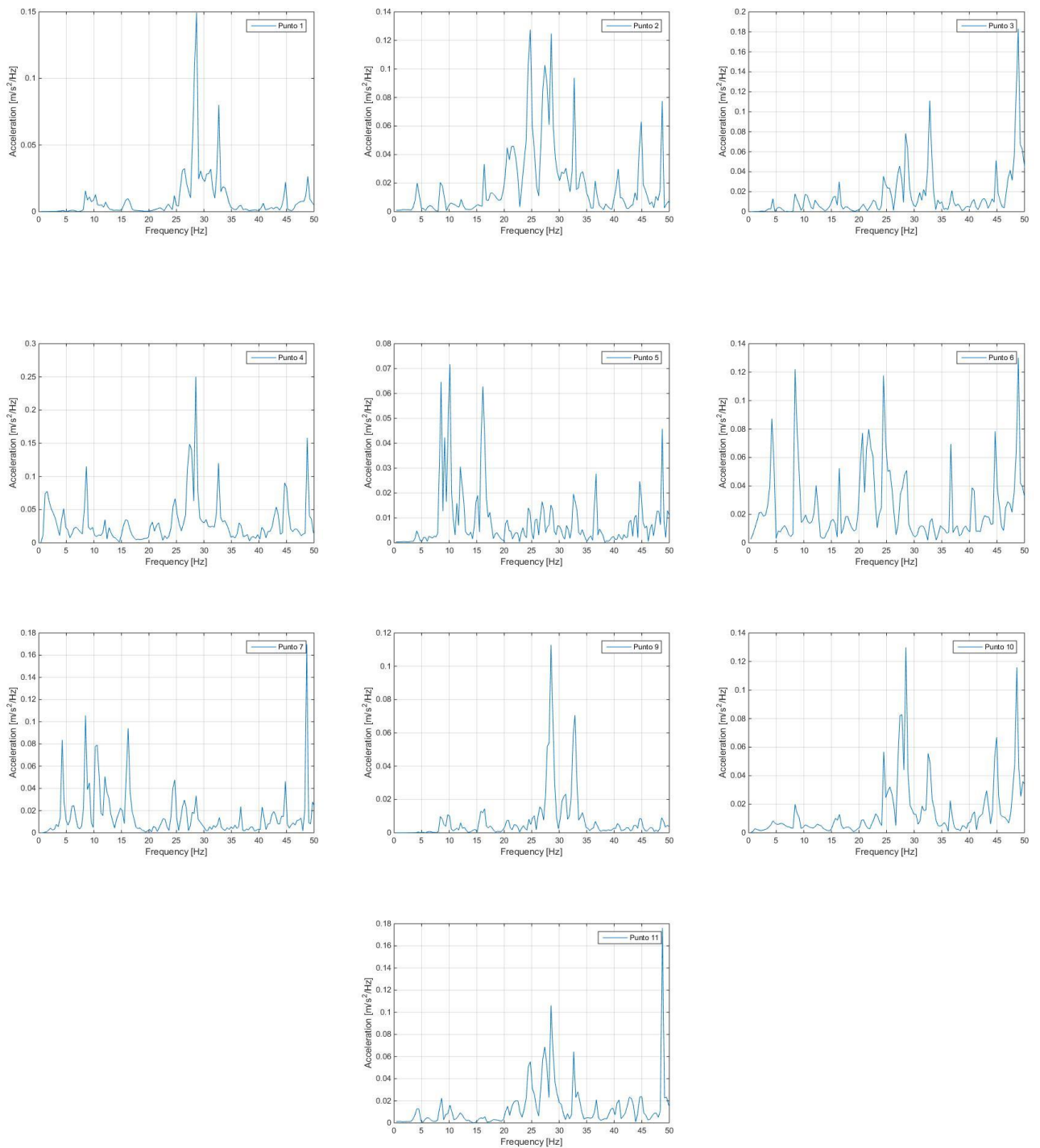


Figura 8-9. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 9 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea



Figura 8-10. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 10 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea

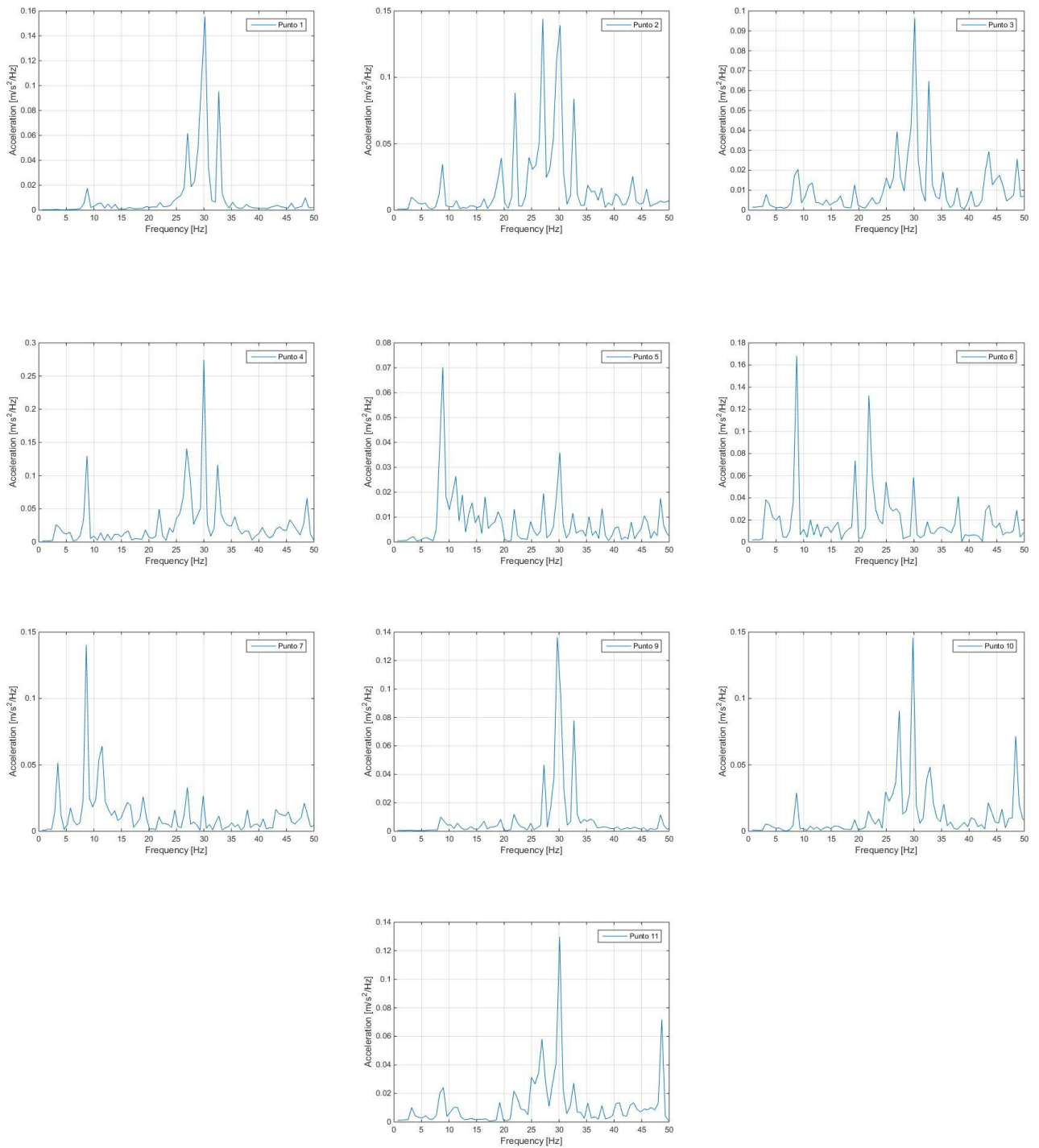


Figura 8-11. Aceleraciones en el dominio de la frecuencia para el evento 11 en los diferentes puntos de medida indicados en la Figura 5-2. Puente Arroyo Bracea

## 8.2. Resultados de la optimización para los diferentes eventos

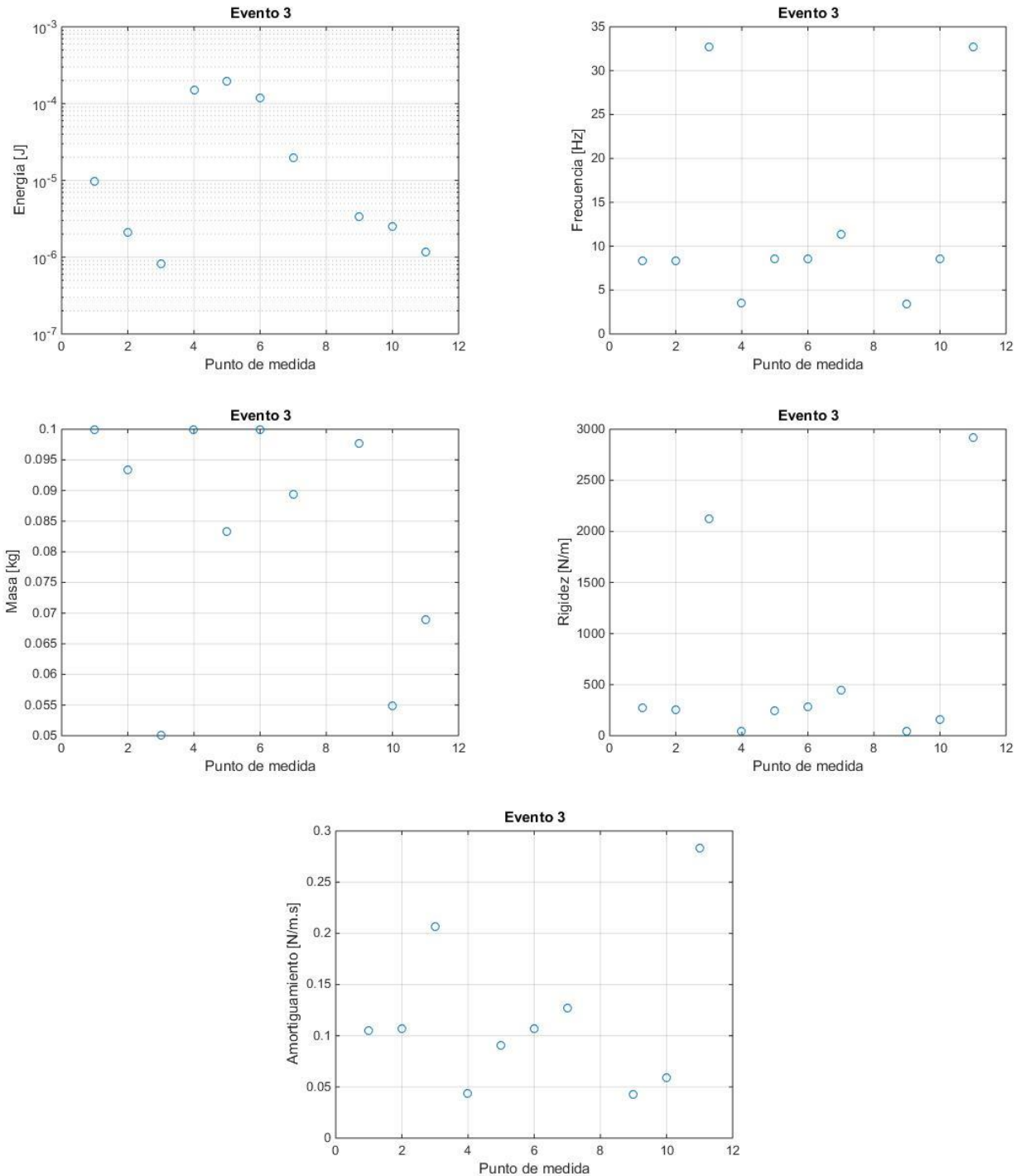


Figura 8-12. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 3. Puente Arroyo Bracea



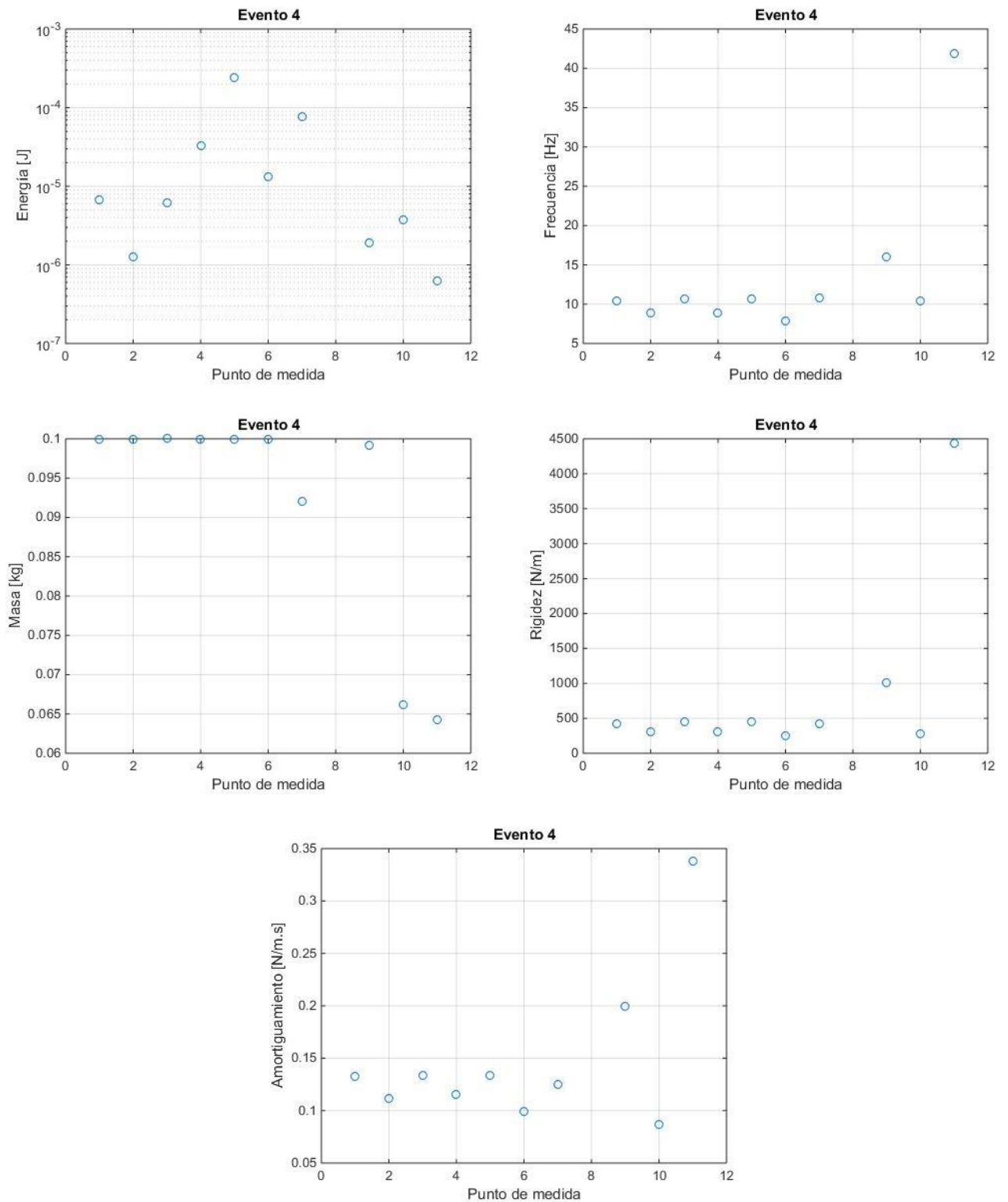


Figura 8-13. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 4. Puente Arroyo Bracea

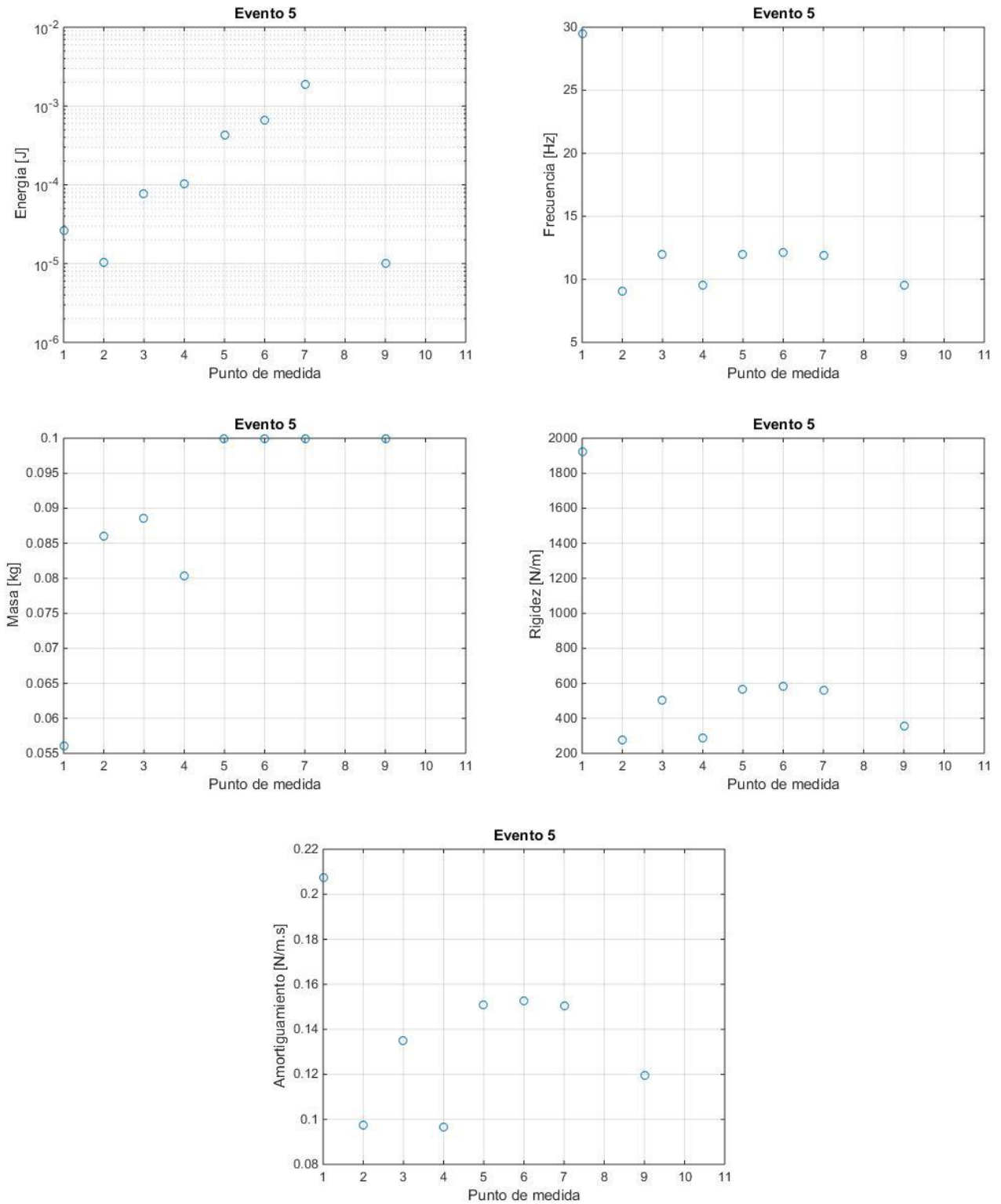


Figura 8-14. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 5. Puente Arroyo Bracea

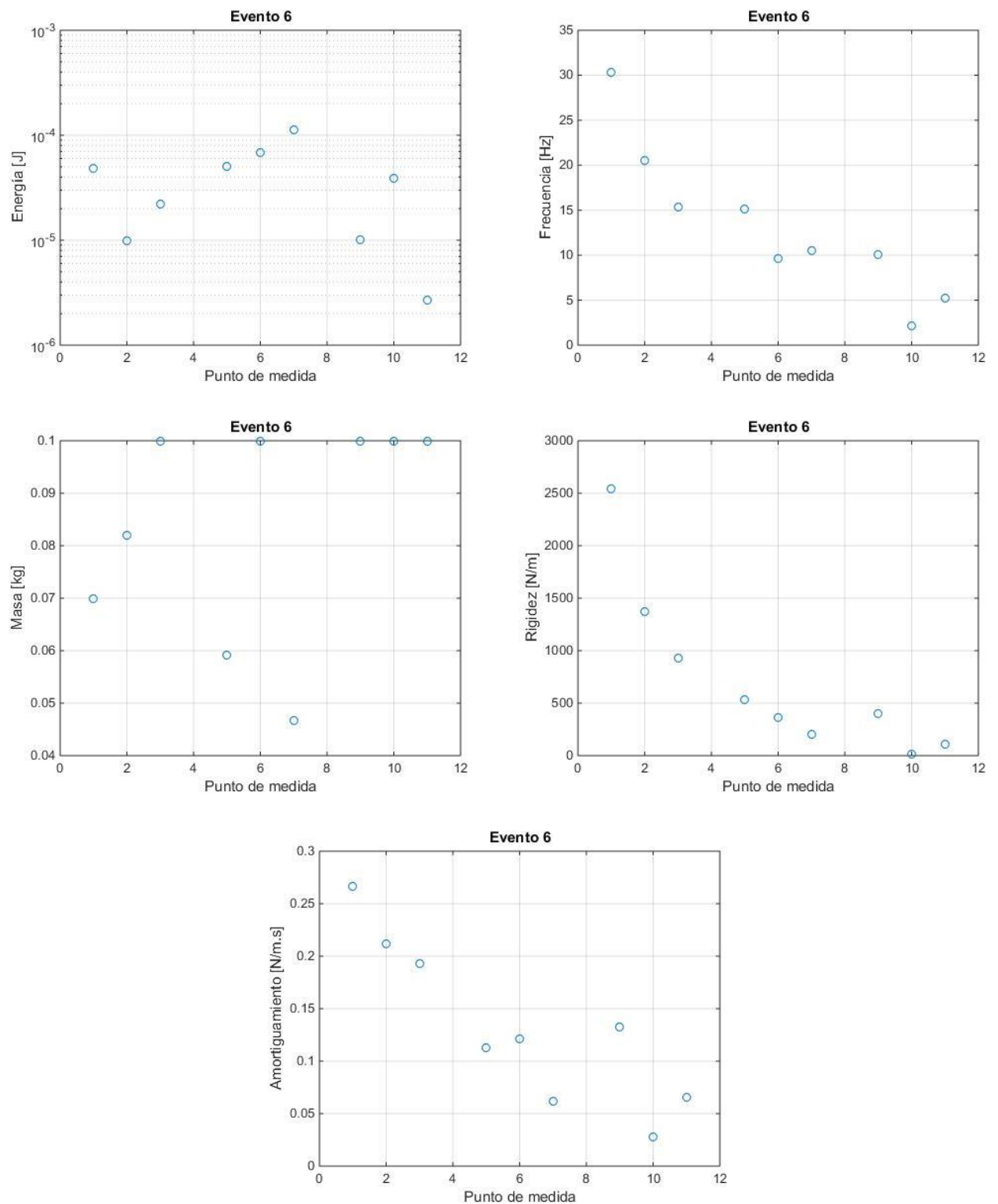


Figura 8-15. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 6. Puente Arroyo Bracea

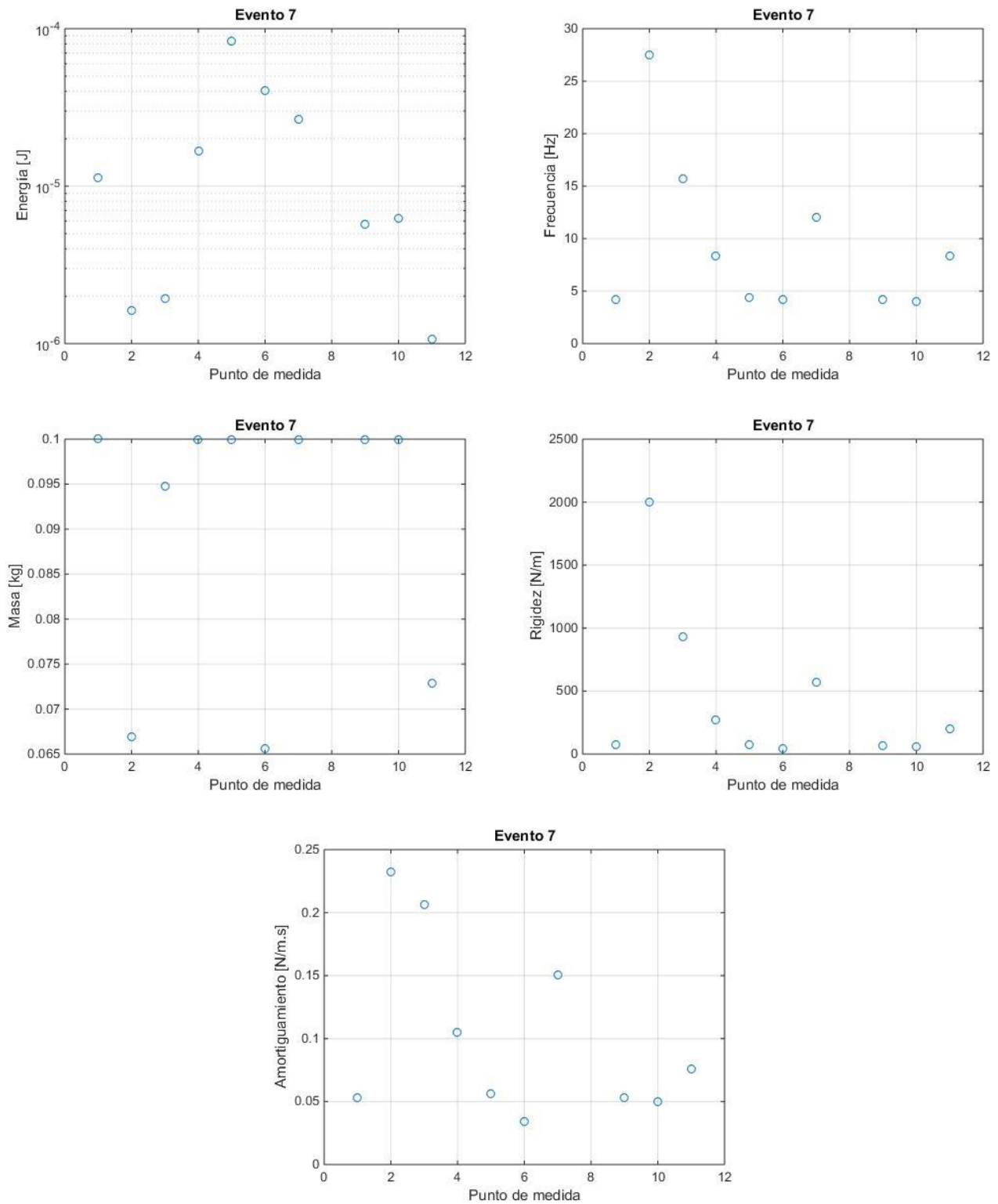


Figura 8-16. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 7. Puente Arroyo Bracea

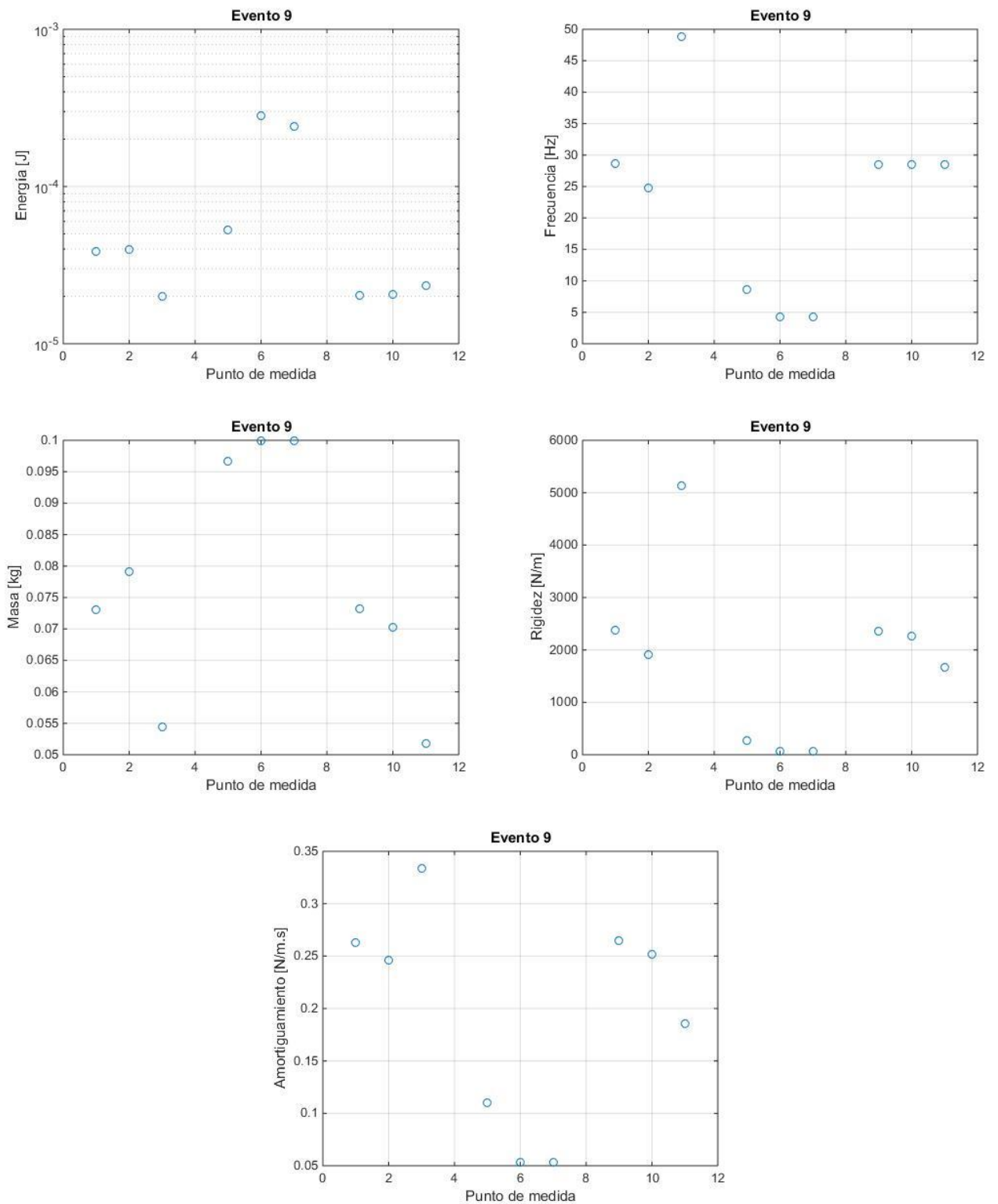


Figura 8-17. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 9. Puente Arroyo Bracea

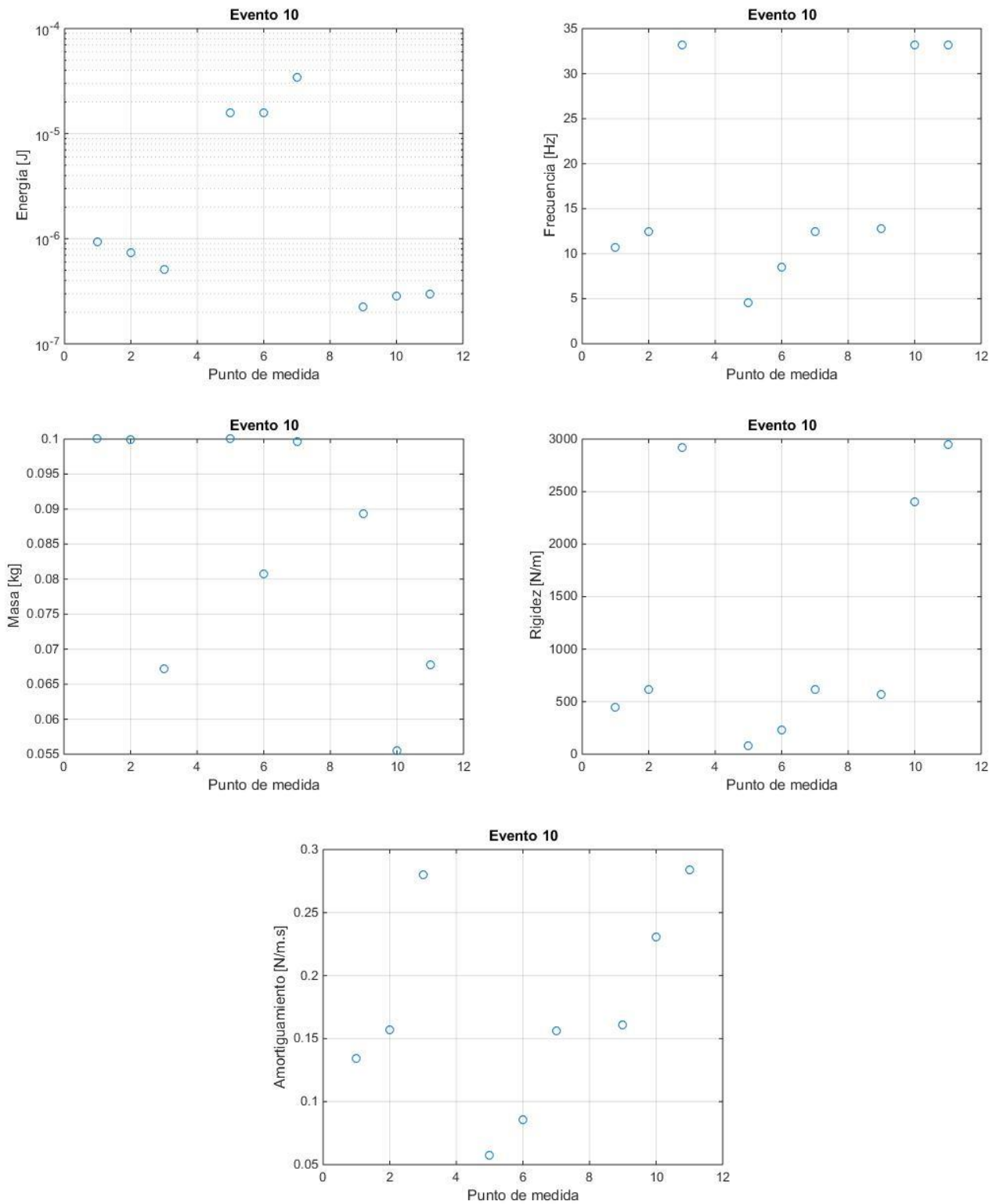


Figura 8-18. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 10. Puente Arroyo Bracea

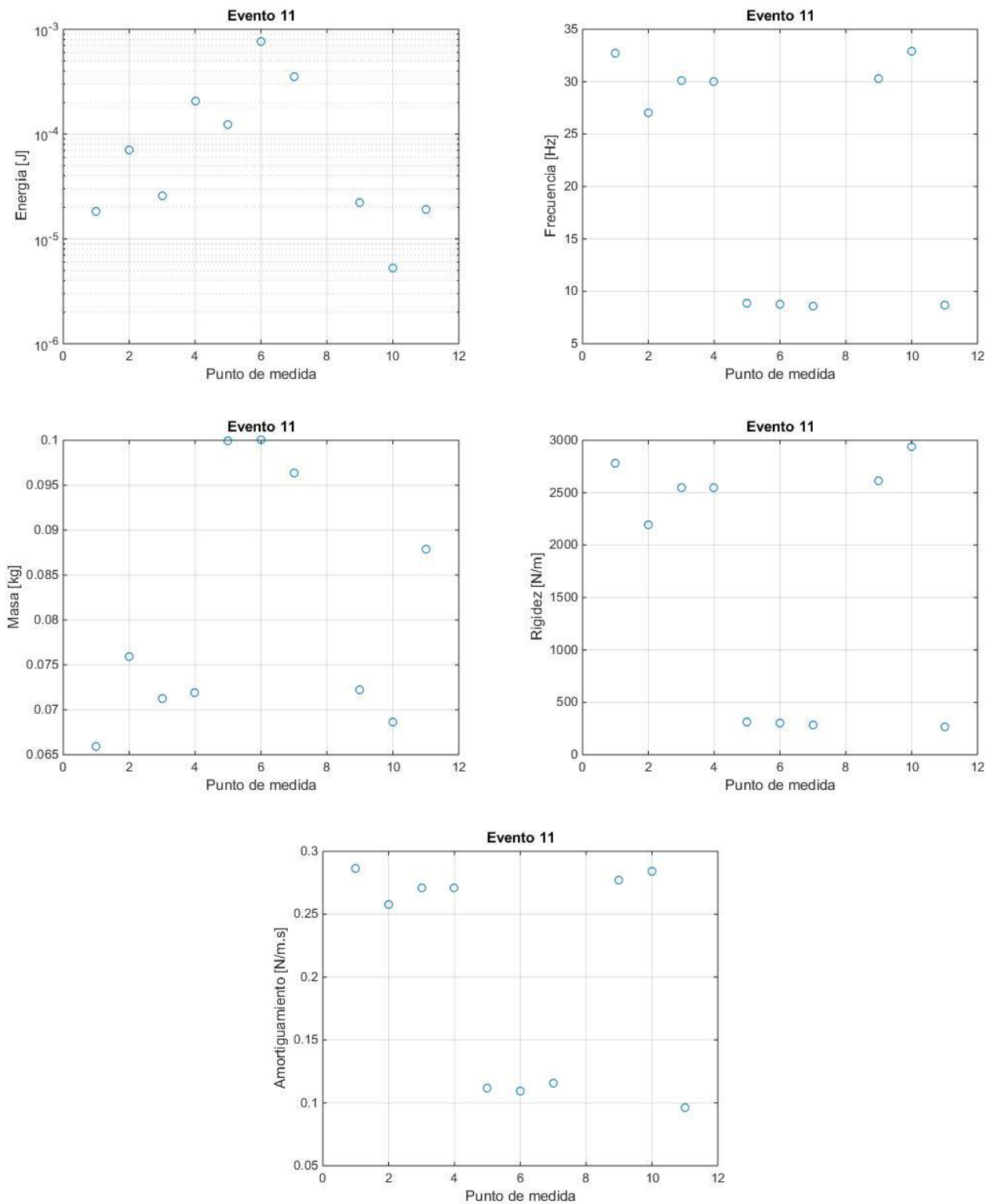


Figura 8-19. Energía máxima recolectada y valores óptimos de la frecuencia natural, masa, rigidez y amortiguamiento. En cada punto de medida experimental del evento 11. Puente Arroyo Bracea





# REFERENCIAS

---

- [1] C.B. Williams, R.B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensors and Actuators, A: Physical* 1996;52(1-3):8–11.
- [2] C. Wei , X. Jing, A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017;74:1–18.
- [3] C.B. Williams, R.B. Yates, Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensors and Actuators, A: Physical* 1996;52(1-3):8–11.
- [4] N.G. Stephen, On energy harvesting from ambient vibration. *Journal of Sound and Vibration* 2006;293:409–425.
- [5] R. Palomera-Arias, J.J. Connor, J.A. Oschendorf, Feasibility study of passive electromagnetic damping systems. *Journal of Structural Engineering* 2008;134(1):164-170
- [6] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, Y. Zhou, Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions, *Smart Materials and Structures* 2010; 19(4):045003
- [7] T. Yuan, J. Yang, R. Song, X. Liu, Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles, *Smart Materials and Structures* 2014;23(12):125046.
- [8] G. Gatti, M.J. Brennan, M.G. Tehrani, D.J. Thompson, Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2016;66–67:785–92.
- [9] T. Yuan, J. Yang, R. Song, X. Liu, Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles, *Smart Materials and Structures* 2014;23(12):125046.
- [10] C.A. Nelson, S.R. Platt, D. Albrecht, V. Kamarajugadda, M. Fateh. Power Harvesting for Railroad Track Health Monitoring Using Piezoelectric and Inductive Devices. *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*, edited by Mehdi Ahmadian, *Proceedings of SPIE* 2008;6928;69280R.
- [11] M.J. Brennan, B. Tang, G.P. Melo, V. Lopes, An investigation into the simultaneous use of a resonator as an energy harvester and a vibration absorber, *Journal of Sound and Vibration* 2014;333(5):1331–1343
- [12] K. Takeya, E. Sasaki, Y. Kobayashi, Design and parametric study on energy harvesting from bridge vibration using tuned dual-mass damper systems, *Journal of Sound and Vibration* 2016;361:50–65.
- [13] Y. Cheng, N. Wu , Q. Wang, An efficient piezoelectric energy harvester with frequency self-tuning, *Journal of Sound and Vibration* 2017;396:69–82.
- [14] J. Li, S. Jang, J. Tang, Modeling and analysis of a biomorph piezoelectric energy harvester for railway

- bridge monitoring. Proceedings of SPIE 8348, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2012, 834827.
- [15] A. Erturk, D.J. Inman, Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. *Journal of Sound and Vibration* 2011;330(10):2339–53.
- [16] I.L. Cassidy, J.T. Scruggs, S. Behrens, Design of electromagnetic energy harvesters for large-scale structural vibration applications. Proceedings of SPIE 7977, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2011, 79770P (27 April 2011); doi: 10.1117/12.880639
- [17] A. Aladwani, M. Arafa, O. Aldraihem A. Baz, Cantilevered Piezoelectric Energy Harvester With a Dynamic Magnifier. *Journal of Vibration and Acoustics* 2012, 134(3): 031004
- [18] Y. Liao, H.A Sodano Modeling and Comparison of Bimorph Power Harvesters with Piezoelectric Elements Connected in Parallel and Series. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2010: 149-159
- [19] M. Peigney, D. Siegert. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, 2013, 22, pp.095019
- [20] P. Galvín, J. Domínguez, Experimental and Numerical Analysis of Vibrations Induced by High-Speed Trains on the Cordoba-Malaga Line. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2009;29:641-657.
- [21] Degrande G. Free field vibrations during the passage of a high speed train: experimental results and numerical predictions, in: V. Krylov (Ed.), *Noise and vibration from high-speed trains*, Thomas Telford Publishing, London, 2001.
- [22] A. Romero, Tesis Doctoral, Predicción, medida experimental y evaluación de las vibraciones producidas por el tráfico ferroviario, 2012.
- [23] P. Galvín, A. Romero, E. Moliner, M.D. Martínez-Rodrigo. Two FE models to analyse the dynamic response of short span simply-supported oblique High-Speed railway bridges: comparison and experimental validation. *Engineering Structures* 2018;167:48-64