



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación “vestible”.**

Autor:

Repiso Acebes, Patricia

Tutor(es):

Lorenzana Ibán, Antolín

Foces Mediavilla, Antonio

Departamento C.A., I.T.,M.M.C. y

Teoría de Estructuras

Valladolid, septiembre 2024.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor, Antolín, y al resto de miembros del departamento, en concreto a Guillermo Fernández, por su disponibilidad y el tiempo dedicado. Sus conocimientos han sido esenciales para la realización de este trabajo y para mi formación como estudiante de Ingeniería en Tecnologías Industriales.

A mi familia, gracias a su apoyo incondicional y animarme en los momentos más difíciles, he conseguido mis metas académicas.

Por último, dar gracias a mis amigos y compañeros, por mostrar su apoyo, han sido un pilar fundamental durante estos años de carrera.



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación "vestible".*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



RESUMEN

En este TFG se estudia tanto el comportamiento dinámico como el estático de una viga biapoyada utilizando sensores portátiles. Este trabajo implica la utilización de sensores inerciales, como son los sensores Xsens DOT y las plantillas Loadsol. Con los datos registrados con estos sensores, se obtienen los parámetros característicos de las ondas y se realiza un estudio para comprobar si los datos registrados son precisos.

Para todo esto, ha sido necesario aprender a utilizar los sensores citados anteriormente y las aplicaciones vinculadas a estos para realizar la toma de datos y el posterior procesamiento de estos. El objetivo de este trabajo es comprobar si estos sensores proporcionan datos fiables y útiles para el análisis de la respuesta dinámica de una viga biapoyada.

PALABRAS CLAVE

Viga biapoyada, estudio dinámico, oscilaciones, sensores inerciales, plantillas sensoriales.

ABSTRACT

This TFG studies both the dynamic and static behavior of a biaxially supported beam using portable sensors. This work involves the use of inertial sensors such as Xsens DOT sensors and Loadsol templates. With the data recorded with this sensors, the characteristic parameters of the waves are obtained and a study is carried out to check if the recorded data are accurate.

For all this, it has been necessary to learn how to use the sensors mentioned above and the applications linked to them for data acquisition and their subsequent processing. The objective of this work is to check if these sensors provide reliable and useful data for the analysis of the dynamic response of a biaxially braced beam.

KEYWORDS

Biaxially supported beam, dynamic study, vibrations, inertial sensors, sensory templates.



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación "vestible".*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Motivación	2
1.3 Antecedentes.....	2
1.4 Objetivos	3
CAPÍTULO 2. Bases teóricas	5
2.1 Comportamiento estático.....	5
2.2 Comportamiento modal	7
2.3 Comportamiento dinámico	10
2.4 Cálculo de errores	13
CAPÍTULO 3. Casos de estudio	15
3.1 Equipo necesario	15
3.2 Descripción del proceso de carga y toma de datos	23
3.3 Métodos	27
CAPÍTULO 4. Ajuste de parámetros	41
4.1 Ajuste fuerzas	41
4.2 Ajuste aceleraciones eje Z	49
4.3 Ajuste giros.....	57
CAPÍTULO 5. Resultados	67
5.1 Resultados analíticos	67
5.2 Resultados experimentales	69
CAPÍTULO 6. Conclusiones y líneas futuras	85
6.1 Conclusiones.....	85
6.2 Líneas futuras	86
6.3 Consideraciones adicionales	87
REFERENCIAS	89
ANEXO 1. Sensores Xsens DOT	91
Usos y aplicaciones de los sensores Xsens DOT.....	91
Conexión Xsens DOT con dispositivo móvil	91
Frecuencia de salida	93
Sincronización	94
Toma de datos.....	96
Plataformas compatibles con el software.	106
ANEXO 2. Plantillas Loadsol.....	109
Usos y aplicaciones de las plantillas Loadsol	109
Conexión plantillas Loadsol con dispositivo móvil	109



Configuración plantillas Loadsol	112
Calibración plantillas Loadsol.....	114
Ajuste del ensayo	116
Toma de datos.....	120



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una viga biapoyada.	5
Figura 2. Estudio teórico de viga biapoyada sometida a carga puntual en el cetro [5].	6
Figura 3. Formas de los tres primeros modos para una viga biapoyada [9].	10
Figura 4. Sistema Subamortiguado, Sobreamortiguado y Críticamente amortiguado [10]. ..	12
Figura 5. Detalle dinamómetro.	16
Figura 6. Detalle del caballete.	17
Figura 7. Detalle de la masa situada en el extremo de la viga.	17
Figura 8. Sensores Xsens DOT en el estuche de carga [11].	20
Figura 9. Sistema de coordenadas del sensor Xsens DOT [11].	21
Figura 10. Plantillas Loadsol [12].	22
Figura 11. Detalle inserción batería y cerrar clip de la batería [13].	23
Figura 12. Croquis escenario 1.	24
Figura 13. Croquis escenario 2.	24
Figura 14. Croquis escenario 3.	24
Figura 15. Detalle del extremo de la viga.	24
Figura 16. Croquis escenario 4.	25
Figura 17. Detalle punto central de la viga caso 1.	25
Figura 18. Detalle punto central de la viga caso 2.	26
Figura 19. Croquis escenario 5.	26
Figura 20. Detalle punto central de la viga caso 3.	26
Figura 21. Croquis escenario 6.	27
Figura 22. Detalle ensayo en el caso 3.	27
Figura 23. Gráfica giro_ensayo.	31
Figura 24. Icono aplicación “Sigview”	31
Figura 25. Datos pasados al Bloc de notas.	32
Figura 26. Detalle de como importar datos en “Sigview”.	32
Figura 27. Datos por segundo registrados.	33
Figura 28. Gráfica en “Sigview” de los datos importados.	33
Figura 29. Detalle de como seleccionar datos en “Sigview”	33
Figura 30. Detalle selección comando “FFT spectrum analysis”	34
Figura 31. Detalle selección comando “Show 5 highest peaks”.	34
Figura 32. Gráfica obtenida con el comando “Show 5 highest peaks”.	35
Figura 33. Detalle de la frecuencia natural de la onda, en Hz.	35
Figura 34. Aproximación de los parámetros.	36
Figura 35. Cálculo del error cuadrático medio.	36
Figura 36. Definir parámetros “Solver”.	37
Figura 37. Gráfica ajustada.	38
Figura 38. Posición sensores Xsens DOT y plantillas Loadsol.	41
Figura 39. Representación de las fuerzas registradas por las plantillas Loadsol.	41
Figura 40. Detalle selección de datos con “Zoom in”.	42
Figura 41. Detalle de pasos para obtener el valor medio.	43
Figura 42. Detalle del valor medio de los datos seleccionados.	43
Figura 43. Representación tramo 1 registros plantillas Loadsol.	44
Figura 44. Representación tramo 2 registros plantillas Loadsol.	45
Figura 45. Representación tramo 3 registros plantillas Loadsol.	46
Figura 46. Representación tramo 4 registros plantillas Loadsol.	46
Figura 47. Representación tramo 5 registros plantillas Loadsol.	47
Figura 48. Representación tramo 6 registros plantillas Loadsol.	48
Figura 49. Representación tramo 7 registros plantillas Loadsol.	49
Figura 50. Representación aceleraciones del eje Z.	50



Figura 51. Representación tramo 1 aceleración eje Z50

Figura 52. Representación tramo 2 aceleración eje Z51

Figura 53. Representación tramo 3 aceleración eje Z52

Figura 54. Representación tramo 4 aceleración eje Z52

Figura 55. Representación tramo 5 aceleración eje Z53

Figura 56. Representación tramo 6 aceleración eje Z55

Figura 57. Representación tramo 7 aceleración eje Z56

Figura 58. Representación ángulos de Euler59

Figura 59. Representación tramo 1 y 2 ángulos de Euler59

Figura 60. Representación tramo 3 ángulos de Euler60

Figura 61. Representación tramo 4 ángulos de Euler61

Figura 62. Representación tramo 5 ángulos de Euler61

Figura 63. Representación tramo 6 ángulos de Euler63

Figura 64. Representación tramo 7 ángulos de Euler64

Figura 65. Medida extremo inicial de la viga.67

Figura 66. Medida extremo final de la viga.67

Figura 67. Croquis caso 1.....69

Figura 68. Ajuste fuerza plantilla 2L, caso1, segunda oscilación.....70

Figura 69. Ajuste fuerza plantilla 4L, caso 1, segunda oscilación.....70

Figura 70. Ajuste giro B7, caso 1, segunda oscilación.....71

Figura 71. Ajuste giro B3, caso 1, segunda oscilación.....71

Figura 72. Ajuste aceleración eje Z, caso 1, segunda oscilación.72

Figura 73. Representación ajustes plantillas de los extremos, caso 1.....72

Figura 74. Representación ajustes giros de los extremos caso 1.73

Figura 75. Croquis caso 2.....73

Figura 76. Ajuste fuerza plantilla 2L, caso 2, primera oscilación.....74

Figura 77. Ajuste fuerza plantilla 5L, caso 2, primera oscilación.....75

Figura 78. Ajuste fuerza plantilla 4L, caso 2, primera oscilación.....75

Figura 79. Ajuste giro B7, caso 2, primera oscilación.76

Figura 80. Ajuste giro B3, caso 2, primera oscilación.76

Figura 81. Ajuste aceleración eje Z, caso 2, primera oscilación.....77

Figura 82. Representación ajustes plantillas de los extremos caso 2.....77

Figura 83. Representación ajustes giros en los extremos caso 2.78

Figura 84. Croquis caso 3.....78

Figura 85. Ajuste fuerza plantilla 2L, caso 3, segunda oscilación.....79

Figura 86. Ajuste fuerza plantilla 5L, caso 3, segunda oscilación.....80

Figura 87. Ajuste fuerza plantilla 4L, caso 3, segunda oscilación.....80

Figura 88. Ajuste giro B7, caso 3, segunda oscilación.....81

Figura 89. Ajuste giro B3, caso 3, segunda oscilación.....81

Figura 90. Ajuste aceleración eje Z, caso 3, segunda oscilación82

Figura 91. Representación ajuste plantillas de los extremos caso 3.....82

Figura 92. Representación ajuste giros en los extremos caso 3.....83

Figura 93. Comparación giros experimentales y giros obtenidos con fórmula del prontuario.83

Figura 94. Pantalla inicial de la aplicación Movella DOT.....92

Figura 95. Conexión de los sensores.....93

Figura 96. Detalles de un sensor.93

Figura 97. Selección frecuencia de salida.94

Figura 98. Pestaña “Measure & Collect”95

Figura 99. Modos de grabación.97

Figura 100. Modo de grabación “Sensor Fusion Data”.....98



Figura 101. Modo de grabación “Interior Data”	98
Figura 102. Modo de grabación “Custom Modes”.	98
Figura 103. Gráficas del modo “Real-time Streaming (Live mode)”	99
Figura 104. Modo de grabación “Recording (offline mode)”	100
Figura 105. Configuración del temporizador.....	101
Figura 106. Grabación.....	102
Figura 107. Selección de archivos de grabación para exportar.	103
Figura 108. Selección de casillas necesarias en función del caso de estudio.....	104
Figura 109. Exportar datos.....	105
Figura 110. Finalizar la exportación de los datos.....	106
Figura 111. Pantalla inicial de la aplicación loadsol-s.	110
Figura 112. Conexión plantillas Loadsol.	111
Figura 113. Plantillas Loadsol conectadas.	112
Figura 114. Detalle configuración plantilla Loadsol.....	113
Figura 115. Detalle calibración plantillas Loadsol.....	114
Figura 116. Detalle proceso de calibración plantillas Loadsol.	115
Figura 117. Detalle pestaña “Basic”.	117
Figura 118. Detalle pestaña “Advanced”.	119
Figura 119. Detalle pestaña “Save data with comment”.....	120



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación "vestible".*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Patrones Led de sensores Xsens DOT v2 [11].	19
Tabla 2. Ejemplo de los valores de partida.	28
Tabla 3. Ejemplo de las tres primeras columnas.	29
Tabla 4. Columnas utilizadas para el estudio.	29
Tabla 5. Parámetros ajustados con “Solver”	37
Tabla 6. Cálculo ($E \cdot I$).	39
Tabla 7. Parámetros tramo 5.	54
Tabla 8. Parámetros ramo 7.	56
Tabla 9. Parámetros comprobación giros caso 2.	62
Tabla 10. Parámetros comprobación giros caso 3.	64
Tabla 11. Incrementos experimentales ángulos de Euler.	65
Tabla 12. Ajuste parámetros caso 1 primera oscilación.	69
Tabla 13. Ajuste parámetros caso 1 segunda oscilación.	69
Tabla 14. Ajuste parámetros caso 2 primera oscilación.	74
Tabla 15. Ajuste parámetros caso 2 segunda oscilación.	74
Tabla 16. Ajuste parámetros caso 3 primera oscilación.	79
Tabla 17. Ajuste parámetros caso 3 segunda oscilación.	79
Tabla 18. Precisión de sincronización [11].	94



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación “vestible”.*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



CAPÍTULO 1. Introducción

1.1 Introducción

El estudio de las propiedades dinámicas de las estructuras es un campo de interés en la ingeniería civil y mecánica, ya que permite comprender cómo responden éstas ante diferentes tipos de cargas y vibraciones. Dentro de este contexto, las vigas biapoyadas representan un elemento fundamental en múltiples aplicaciones, desde la construcción de puentes y edificios hasta la fabricación de componentes mecánicos. La identificación dinámica de una viga biapoyada implica el análisis de sus respuestas a estímulos externos para determinar sus características inherentes, como frecuencias naturales, formas modales y factores de amortiguamiento. Estos parámetros son esenciales para predecir y mejorar el comportamiento estructural bajo condiciones operativas.

Con el avance de la tecnología, la instrumentación empleada en el registro de datos dinámicos ha evolucionado significativamente. Sin embargo, con la aparición de sensores inerciales portátiles y “vestibles” se han abierto nuevas posibilidades en la monitorización estructural. Estos sensores, diseñados para ser transportados fácilmente y para que sea posible adaptarlos a diversas superficies, ofrecen la posibilidad de realizar mediciones precisas en tiempo real.

En este Trabajo Fin de Grado se van a estudiar los movimientos dinámicos de una viga biapoyada utilizando instrumentación “vestible”. Este estudio se va a realizar con el uso de los sensores Xsens DOT y las plantillas Loadsol, con estos sensores se pueden capturar datos sobre la respuesta de la viga ante distintas excitaciones. Ambos sensores, destacan por su pequeño tamaño, fácil configuración y alta precisión, se utilizan para registrar parámetros clave como son la aceleración, velocidad angular y orientación. Estos parámetros son fundamentales para el análisis modal y la caracterización dinámica de la estructura.

La metodología utilizada en este TFG, no solo busca validar la efectividad de los distintos sensores utilizados para la identificación dinámica de la estructura, sino también explorar su potencial para posibles aplicaciones futuras. A través de experimentos controlados y el posterior procesamiento de los datos registrados se obtendrán las características fundamentales de las ondas, con lo que se consigue una comprensión detallada de su comportamiento en condiciones dinámicas.

La posibilidad de utilizar este tipo de sensores en el campo de la ingeniería representa un avance significativo en términos de accesibilidad, flexibilidad y coste. Este TFG es una primera toma de contacto con este tipo de sensores en



este ámbito, ya que la finalidad de utilización de estos sensores no es el estudio dinámico de una viga. En este trabajo se van a estudiar las oscilaciones producidas en una viga ante distintas excitaciones con elementos de bajo coste, que ya estaban disponibles en el laboratorio para otros estudios anteriores.

Este TFG se estructura en varios capítulos en los que se desarrollará de forma detallada la metodología utilizada en los ensayos, los datos registrados, su posterior procesamiento y, por último, las conclusiones a las que se ha llegado con este estudio.

1.2 Motivación

En el laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Valladolid se trabaja en varios temas en los que se utilizan los sensores Xsens DOT y las plantillas Loadsol, por ejemplo, en temas de interacción entre peatones y estructuras ligeras como pasarelas peatonales.

El desarrollo de este TFG surge debido a la importancia de la identificación de los movimientos dinámicos en las estructuras, ya sean de pequeña o gran escala, están constantemente sujetas a vibraciones y cargas dinámicas que pueden afectar a su integridad y funcionalidad a lo largo del tiempo. Comprender cómo estas estructuras responden a dichas fuerzas es esencial para garantizar su seguridad y durabilidad. Este TFG se enfoca en el análisis dinámico de una viga biapoyada, un elemento fundamental en la ingeniería civil, utilizando tecnología avanzada de instrumentación portátil.

Una de las principales motivaciones para realizar este TFG radica en la necesidad de innovar en los métodos de monitorización y análisis estructural. La aparición de estos sensores, ofrece una solución moderna y versátil con la que se pueden medir distintos parámetros en tiempo real para su posterior procesamiento y estudio de los datos registrados.

1.3 Antecedentes

En el laboratorio de estructuras se han realizado varios Trabajos Fin de Grado haciendo uso de estos sensores, tanto los Xsens DOT como las plantillas Loadsol.

En algún trabajo se han utilizado los sensores Xsens DOT y las plantillas Loadsol simultáneamente, uno de ellos con el objetivo de identificar patrones de movimiento al caminar y correr [1]. Otro parecido, con el fin de asociar también



patrones de movimiento al caminar y correr, pero dependiendo de las frecuencias de paso durante dichas actividades [2].

En otros solo se han utilizado los sensores Xsens DOT, uno con el fin de estimar los ángulos relativos de movimiento entre cabeza y torso [3]. Y otros en los que solo se han utilizado las plantillas Loadsol, uno con el objetivo de estudiar la influencia de la velocidad en las GRFs (Ground Reaction Forces) [4].

Todos ellos relacionados con el ámbito de la biomecánica y el movimiento del cuerpo humano, que es el fin con el que se han diseñado estos sensores. En este TFG se ha innovado, utilizando estos sensores ya disponibles en el laboratorio para medir los ángulos de giro de una viga, la aceleración con la que se mueve y las fuerzas producidas.

1.4 Objetivos

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo principal evaluar la utilidad y efectividad de sensores inerciales portátiles en el estudio dinámico de estructuras, en este caso, de una viga biapoyada. A lo largo del desarrollo de este trabajo se pretende determinar si estos sensores que están diseñados para aplicaciones biomecánicas, pueden proporcionar datos precisos y fiables que sean aplicables al análisis estructural.

En el laboratorio de Estructuras de la Universidad de Valladolid se trabaja con vigas de diferentes pesos y tamaños. En este TFG se van a utilizar los sensores Xsens DOT y las plantillas Loadsol, que ya están disponibles en este laboratorio, para comprobar si miden con precisión distintas variables, como son las reacciones en los apoyos y el giro de la viga, ya sea por el propio peso de ésta o por masas que se añaden encima de ésta. Con esto, las personas que trabajan en este laboratorio lo podrían utilizar en un futuro para registrar estos datos y se les facilitaría el trabajo en algunas ocasiones.

Uno de los objetivos es validar si estos sensores son capaces de captar con precisión las respuestas dinámicas de la viga, como las frecuencias naturales y los modos de vibración bajo diferentes condiciones de carga y apoyo. Este objetivo es esencial, ya que una identificación precisa de las características dinámicas de una estructura es fundamental para garantizar su seguridad y estabilidad en aplicaciones reales.

Otro objetivo clave es analizar el grado de precisión de los datos obtenidos por los sensores, comparándolo con el método analítico. Este análisis permitirá identificar las limitaciones y ventajas de utilizar tecnología “vestible”. En este sentido, se evaluará si la resolución y la sensibilidad de los sensores son



adecuadas para detectar la respuesta dinámica de la viga, considerando posibles errores en las mediciones y cómo estos podrían reducirse.

Por último, con este TFG se pretende ofrecer una base sobre la cual futuros proyectos puedan expandir el uso de sensores portátiles en este ámbito de la ingeniería. Esto incluye, estudiar configuraciones estructurales más complejas y someter a los sensores a condiciones más exigentes, con el fin de mejorar la exactitud de las mediciones y ampliar su aplicación.

CAPÍTULO 2. Bases teóricas

En ingeniería y arquitectura, una viga biapoyada se define como un componente estructural lineal que trabaja principalmente a flexión. En este elemento, la longitud es la dimensión más importante frente a las otras dos dimensiones y generalmente se encuentra en posición horizontal.

Cuando una viga biapoyada soporta cargas, se generan esfuerzos de flexión que provocan tensiones normales. Estas tensiones pueden ser de tracción o de compresión, y se calculan mediante la relación entre el momento flector y el momento de inercia del perfil de la viga. Es esencial considerar estas tensiones normales, ya que determinan cuanta carga puede soportar la viga sin fallar.

En las zonas cercanas a los apoyos, se producen esfuerzos cortantes que también provocan tensión normal. Las tensiones resultantes debidas a estos esfuerzos son insignificantes en comparación con las tensiones normales de flexión.

El aspecto común que muestra una viga biapoyada se muestra en la Figura 1:



Figura 1. Esquema de una viga biapoyada.

2.1 Comportamiento estático

Las tensiones y los desplazamientos deben cumplir con ciertas limitaciones establecidas por motivos de seguridad, comodidad o estética. Por lo tanto, los elementos estructurales se dimensionarán no solo para garantizar su resistencia, sino también para asegurar que las deformaciones máximas no excedan los valores permitidos.

Para llevar a cabo este estudio, se utiliza un prontuario básico de estructuras simples que recopila un conjunto de fórmulas analíticas y tablas de cálculo. Este prontuario es una herramienta esencial, ya que facilita el análisis de las estructuras más utilizadas en la actualidad, permitiendo a los ingenieros y arquitectos obtener rápidamente las reacciones y deformaciones que sufre una viga bajo diversas condiciones de carga. Así, es posible simplificar el proceso de diseño y verificación de las estructuras, asegurando que cumplan con los estándares requeridos.

En la Figura 2, se muestra el caso estudiado en este trabajo, una viga biapoyada con una fuerza genérica en su punto central. Además, se muestra la solución analítica de las reacciones, giros y deformaciones que sufre una viga biapoyada en el caso específico de una carga puntual aplicada en el centro.

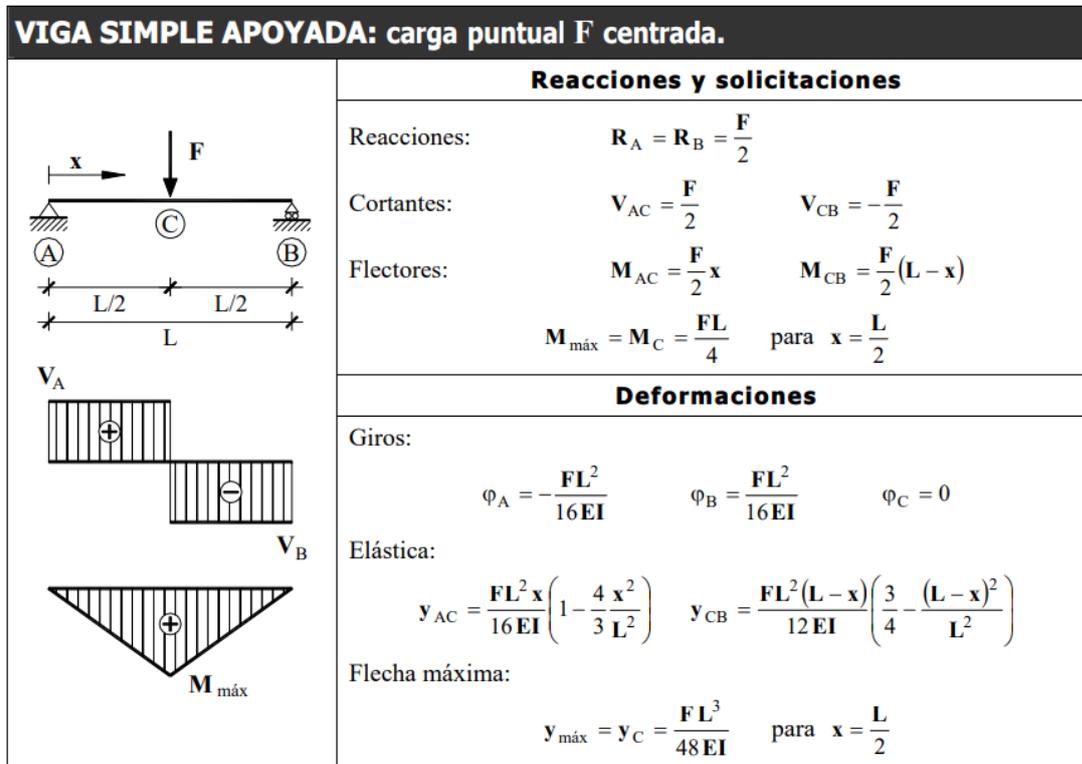


Figura 2. Estudio teórico de viga biapoyada sometida a carga puntual en el centro [5].

Para este caso, siendo la carga puntual en el centro, F , y L la longitud total de la viga, podemos ver que las reacciones en los apoyos son:

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} \quad (1)$$

Los giros en los extremos:

$$\varphi_B = -\varphi_A = \frac{FL^2}{16EI} \quad (2)$$

Y el desplazamiento máximo, en el centro:

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (3)$$

Siendo:

- F : fuerza puntual aplicada (N).



- L : longitud de la viga (m).
- E : módulo de Young (N/m^2).
- I : momento de inercia (m^4).

2.2 Comportamiento modal

[6] El comportamiento modal es un método teórico y experimental que se utiliza para obtener las propiedades y características dinámicas propias de una estructura a través de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y formas modales. El método teórico se basa en técnicas analíticas o simulaciones y, el experimental, se basa en la realización de ensayos.

Este análisis, es fundamental para entender cómo una estructura responde a diversas excitaciones y se puede representar matemáticamente mediante una ecuación de onda. Esta ecuación puede describir la dinámica del conjunto de vibraciones de un sistema dinámico y se pueden obtener de ella las frecuencias naturales y las formas modales. Las formas modales son los patrones de vibración que muestra una estructura a ciertas frecuencias naturales.

Para realizar el análisis modal de este trabajo, se han realizado una serie de ensayos en el laboratorio, excitando la viga para producir oscilaciones.

[7] El análisis modal describe las diversas formas en las que una estructura puede vibrar de manera natural sin la influencia de fuerzas externas o excitaciones.

Las frecuencias naturales y las formas modales de una viga se determinan en función de un índice entero i . Para cada valor de i , existe una frecuencia natural específica y una forma modal correspondiente. Aplicando el principio de superposición, se puede expresar la deformación transversal total de la viga como la suma de las deformaciones modales:

$$Y(x, t) = \sum_{i=1}^n A_i \tilde{y}_i(x) \text{sen}(\omega_i t + \varphi_i) e^{-\zeta_i \omega_i t} \quad (4)$$

Donde:

- \tilde{y}_i : forma modal asociada con la i -ésima vibración modal.
- A_i : constante de la i -ésima vibración modal, con unidades de longitud.
- ω_i : frecuencia natural de la i -ésima vibración modal (Hz).
- φ_i : ángulo de fase i -ésima vibración modal (rad).
- ζ_i : factor de amortiguamiento de la i -ésima vibración modal.



A_i y φ_i son definidos por los medios utilizados para poner la viga en movimiento.

La frecuencia natural se puede expresar de dos formas en función de las unidades:

- Frecuencia natural en Hercios (Hz):

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}} ; \quad i = 1,2,3 \dots \quad (5)$$

- Frecuencia natural en radianes segundo (rad/s):

$$\omega_i = \frac{\lambda_i^2}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}} ; \quad i = 1,2,3 \dots \quad (6)$$

Donde para ambos casos:

λ_i : parámetro adimensional el cual depende de las condiciones de frontera aplicadas a la viga.

L : longitud de la viga (m).

E : módulo de elasticidad del material de la viga (N/m²).

I : momento de inercia de la sección transversal de la viga (m⁴).

ρ : masa por unidad de longitud de la viga (kg/m).

Estos valores son únicos para cada estructura y están definidos por sus propiedades físicas (geometría, masa, rigidez, etc.) y sus condiciones de contorno, sin depender de las fuerzas que actúan sobre ella.

El valor de λ_i , el parámetro adimensional, depende de las condiciones de contorno de la viga. La viga que se está analizando es una viga biapoyada, por lo que tiene ambos extremos apoyados. Se sustituye, $\lambda_i = i\pi$ [8], en la ecuación (5), y se obtiene la siguiente ecuación:

- Frecuencia natural en Hercios (Hz):

$$f_i = \frac{i^2 \pi^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}} ; \quad i = 1,2,3 \dots \quad (7)$$



Simplificándola:

$$f_i = \frac{i^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}} ; \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (8)$$

Si se añaden masas a la viga biapoyada, las ecuaciones (7) y (8) varían. En los casos de estudio, las masas se colocaron en el punto central de la viga, es decir, a $L/2$ de cada extremo. Se obtiene la ecuación (9) [8], con la que se calcula la frecuencia natural de la viga.

$$f = \frac{2}{\pi} \left(\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3 \cdot (M_i + 0,4857 \cdot m_b)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Donde:

L : longitud de la viga (m).

E : módulo de elasticidad del material de la viga (N/m^2).

I : momento de inercia de la sección transversal de la viga (m^4).

M_i : masa situada en el punto central de la viga (Kg).

m_b : peso de la viga (kg).

El sistema de una viga biapoyada es un sistema continuo, que tiene infinitos modos propios de vibración. Estos modos de vibración describen el comportamiento dinámico de la viga y cada modo propio corresponde a una frecuencia natural de ésta. Los primeros modos tienen frecuencias más bajas y formas de vibración más simples, mientras que los modos superiores tienen frecuencias más altas y formas de vibración más complejas. Habrá tantos modos propios como grados de libertad tenga el sistema.

Cuando se procede a discretizar un sistema de una viga biapoyada, es suficiente con usar uno o dos modos propios para capturar el comportamiento dinámico esencial en muchas aplicaciones prácticas. Esto se debe a que los primeros modos dominan la respuesta del sistema a bajas frecuencias.

Los modos de vibración son propios de cada estructura y son la forma o patrón característico de una estructura en el que ésta vibrará si es excitada por un impulso repentino. Para una viga biapoyada, como es el caso de estudio, las formas de estudio de los tres primeros modos propios de vibración se presentan en la Figura 3:

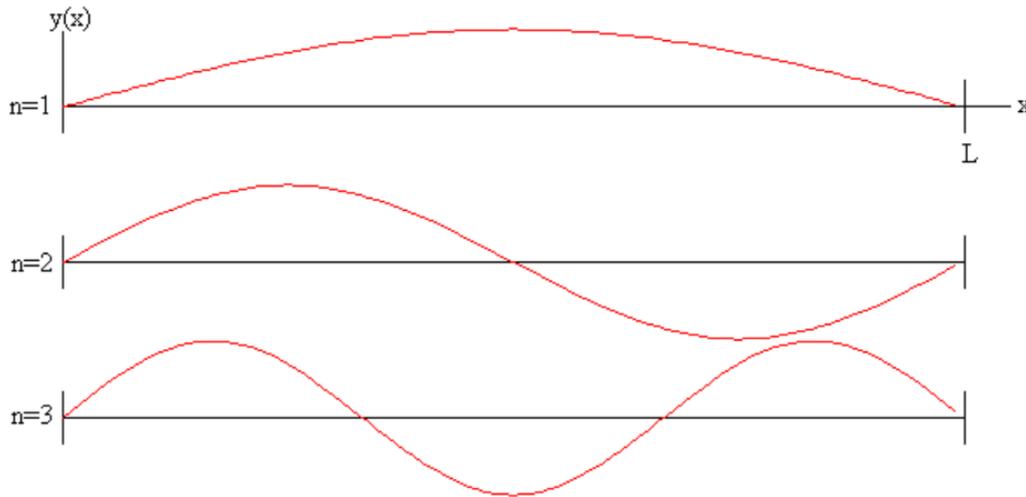


Figura 3. Formas de los tres primeros modos para una viga biapoyada [9].

En el ensayo, solo se ha excitado el primer modo de vibración, por lo que se va a identificar la frecuencia de este modo. Para todos los casos se tendrá $i = 1$.

2.3 Comportamiento dinámico

Las vibraciones estructurales son movimientos oscilatorios que se repiten con regularidad en una estructura cuando actúa sobre ella alguna fuente de excitación. Estas oscilaciones pueden ser originadas por cargas externas, eventos sísmicos, acción del viento, operación de maquinaria, o perturbaciones iniciales. El estudio de las vibraciones estructurales es fundamental, ya que permite evaluar la seguridad y conocer el comportamiento de las estructuras bajo condiciones de carga dinámica.

Este análisis es esencial ya que ayuda a prever y mitigar posibles fallos estructurales, garantizando que las estructuras puedan soportar y funcionar de manera segura durante terremotos, fuertes vientos o vibraciones generadas por el tráfico y la maquinaria industrial.

Las vibraciones estructurales se pueden clasificar en función de distintos criterios:

Existencia de fuerzas externas:

- **Vibraciones libres:** se presentan cuando una estructura oscila sin la presencia de fuerzas externas después de haber sido perturbada inicialmente. En este escenario, la estructura vibra de manera natural debido a sus propias características, como su rigidez y masa. Estas oscilaciones ocurren porque, tras la perturbación inicial, la estructura busca volver a su estado de equilibrio. La frecuencia y amplitud de estas



vibraciones dependen de las propiedades físicas del sistema, como la distribución de masa y la rigidez estructural.

- **Vibraciones forzadas:** ocurren cuando una estructura está expuesta a una fuerza externa que puede ser periódica o no periódica. En este caso la estructura responde a la aplicación de estas fuerzas externas que pueden variar en intensidad y frecuencia con el tiempo. Estas vibraciones pueden mantener una amplitud constante o puede variar a lo largo del tiempo, dependiendo de las características de la fuerza aplicada.

Existencia de amortiguamiento:

- **Sistemas no amortiguados:** es un caso ideal en el que no se tiene en cuenta la disipación de energía que puede ocurrir debido a la fricción o resistencia del medio. En estos sistemas ideales, una vez que las vibraciones se inician, permanecen constantes de forma indefinida. La amplitud de la vibración permanece constante a lo largo del tiempo, ya que no se disipa energía. Este es un caso teórico idealizado debido a que en aplicaciones reales es inevitable la pérdida de energía.
- **Sistemas amortiguados:** en estos sistemas, se incorpora una fuerza de amortiguamiento que disipa energía a lo largo del tiempo. Como resultado, las vibraciones disminuyen su amplitud hasta detenerse. Estos sistemas se pueden clasificar en función del valor que toma el parámetro de amortiguamiento crítico (ζ). Este tipo de sistemas se muestran en la Figura 4.
 - **Sistemas subamortiguados:** aquellos que tienen un coeficiente de amortiguamiento menor que 1 ($0 < \zeta < 1$). En este tipo de sistemas, cuando se produce una perturbación inicial, se generan oscilaciones amortiguadas que disminuyen progresivamente con el tiempo. Estos sistemas tardan un tiempo limitado en volver a su posición de equilibrio después de ser perturbados. La amplitud de las oscilaciones va disminuyendo progresivamente con el tiempo.
 - **Sistemas sobreamortiguados:** aquellos que tienen un coeficiente de amortiguamiento mayor que 1 ($\zeta > 1$). El amortiguamiento es tan fuerte que hace que sean prácticamente inapreciables. En lugar de oscilar, el sistema vuelve a su posición de equilibrio sin experimentar oscilaciones relevantes. La respuesta a una perturbación en los sistemas sobreamortiguados es más rápida que en los sistemas subamortiguados.
 - **Sistemas críticamente amortiguados:** aquellos que tienen un coeficiente de amortiguamiento igual a 1 ($\zeta = 1$). Estos sistemas alcanzan rápidamente la posición de equilibrio sin oscilar. Cuando se aplica una perturbación inicial, el sistema críticamente

amortiguado, se ajusta rápidamente y retorna a su posición de equilibrio en el menor tiempo posible sin experimentar oscilaciones.

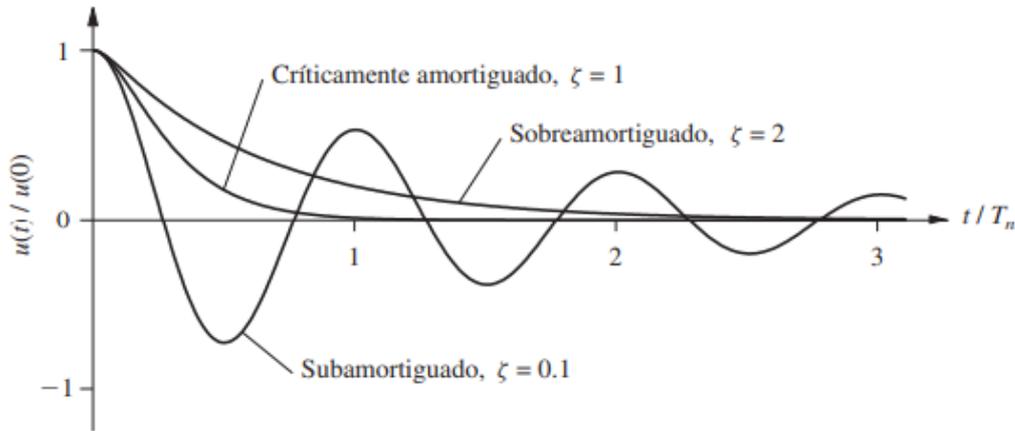


Figura 4. Sistema Subamortiguado, Sobreamortiguado y Críticamente amortiguado [10].

Grados de libertad de un sistema

El grado de libertad de un sistema es el número mínimo de coordenadas independientes necesarias para describir por completo el estado del sistema. En el caso de las vibraciones estructurales, los sistemas se clasifican en dos grupos principales según su número de grados de libertad:

- **Sistemas de un grado de libertad (1 gdl):** sistemas que solo necesitan una coordenada para describir completamente su estado.
- **Sistemas de n grados de libertad (n gdl):** sistemas que necesitan dos o más coordenadas independientes para describir su estado por completo.

Identificación del sistema a estudiar

En este trabajo se van a estudiar y analizar las vibraciones producidas en una viga de aluminio ante una perturbación inicial. Este sistema, es un sistema amortiguado, ya que se produce disipación de energía y un sistema no amortiguado solo existiría en una situación ideal en la que no haya presencia de fuerzas externas como la de rozamiento. En concreto, es subamortiguado, $0 < \zeta < 1$, ya que el sistema oscila debido a una perturbación inicial y tarda un tiempo limitado en volver a su posición de equilibrio. Además, es de vibración libre debido a que oscila sin la presencia de fuerzas externas después de haber sido perturbada inicialmente.



2.4 Cálculo de errores

A lo largo del desarrollo de este trabajo, se procederá a calcular errores absolutos y errores relativos con el fin de poder considerar los datos registrados y los cálculos realizados como válidos o no. La evaluación del error absoluto y del error relativo es esencial para analizar la precisión y exactitud de las mediciones realizadas

Error absoluto

El error absoluto se calcula como la diferencia entre el valor medio de forma experimental o calculado a través de fórmulas analíticas y el valor verdadero o aceptado. Este valor verdadero se definirá según el tipo de ensayo y los datos obtenidos. La fórmula para calcular el error absoluto es:

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor medio} - \text{Valor verdadero}| \quad (10)$$

Error relativo

El error relativo se encarga de medir el error absoluto en relación con el valor verdadero. Se expresa en forma de porcentaje y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Error relativo} = \left(\frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

Estos cálculos permitirán determinar la validez de los parámetros en función de los ensayos realizados y los datos obtenidos, proporcionando así una medida de la exactitud y precisión de los resultados.



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación "vestible".*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



CAPÍTULO 3. Casos de estudio

3.1 Equipo necesario

Se explicará el equipo utilizado para llevar a cabo este estudio, basado en adquirir datos de desplazamientos, giros y fuerzas en diferentes puntos de una viga, para después analizarlos.

Viga

Para el estudio se utilizará una viga de aluminio con un perfil hueco rectangular de 80x40x1,5 mm (ancho x canto x espesor), a continuación, se detallan las características de la viga:

- Momento de inercia: $I = 101.643,25 \text{ mm}^4$.
- Longitud de la viga: $L = 6,01 \text{ m}$.
- Masa por unidad de longitud de la viga: $\frac{5,2}{6,01} \text{ kg/m}$.

Las características del material de la viga no son conocidas. Por ello, se va a comenzar utilizando los datos generales del aluminio:

- Módulo de Young: 70.000 MPa.
- Densidad: 2700 kg/m³.
- Límite elástico: 80 MPa.

Para la caracterización completa de la viga, es necesario conocer su peso. Para pesar un objeto de grandes dimensiones se utiliza un dinamómetro (véase Figura 5). El procedimiento consiste en situar la viga en el suelo y colocar el dinamómetro en un extremo mientras el otro está apoyado en el suelo, obteniendo así el primer peso. Después, se coloca el dinamómetro en el extremo opuesto, obteniendo el segundo peso. Para calcular el peso total de la viga se suman ambos pesos, obteniendo un peso total de 5,2 kg.



Figura 5. Detalle dinamómetro.

A continuación, se va a comprobar la fórmula del volumen de la viga utilizada, ecuación (12):

$$M = \rho \cdot V \quad (12)$$

Para ello, se va a comenzar calculando el volumen de la viga, ya que la masa de ésta y la densidad del aluminio son conocidas.

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{5,2}{2700} = 1,925 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (13)$$

A continuación, se calcula el área de la sección transversal de la viga utilizada, ecuación (14), con el fin de obtener el volumen total, ecuación (15):

$$\text{Área} = (80 \cdot 40) - (77 \cdot 37) = 351 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

$$\text{Volumen total} = 6,01 \cdot 351 \cdot 10^{-6} = 2,10951 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (15)$$

Con los valores del volumen obtenidos en las ecuaciones (13) y (15) se calcula el error del volumen de la viga:

$$\text{Error absoluto} = |2,10951 \cdot 10^{-3} - 1,93 \cdot 10^{-3}| = 179,51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (16)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{179,51 \cdot 10^{-6}}{1,925 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 9,33 \% \quad (17)$$

Estos errores se deben principalmente a que la viga no solo está formada de aluminio. La viga utilizada está recubierta de una pintura cuya densidad es desconocida.



Caballetes

Como se mencionó previamente, la viga se apoya en dos caballetes de acero, como se muestra en la Figura 6. Estos caballetes trabajan como soportes de la viga y se consideran perfectos e ideales, es decir, no se desplazan. Se asemejan a dos apoyos fijos que solo permiten el giro de la viga en el eje horizontal, pero no permiten el desplazamiento.



Figura 6. Detalle del caballete.

Masas

Para los ensayos se van a utilizar un total de 4 masas de 3 kg cada una. Dos de ellas se van a colocar en los extremos, justo encima de los caballetes, como se puede observar en la Figura 7, para garantizar la estabilidad de la estructura.



Figura 7. Detalle de la masa situada en el extremo de la viga.



Las otras dos masas se utilizarán durante el ensayo para añadir peso en el centro de la viga.

Instrumentación

A continuación, se detallan los dispositivos utilizados durante este TFG para el registro y procesamiento de los datos registrados por los instrumentos de medición. Así, se consigue alcanzar un conocimiento y dominio tanto de su modo de utilizarlos como de la extracción y manipulación de los datos registrados. En este TFG se emplean los sensores “Xsens DOT v2” y las plantillas “Loadsol” como instrumentos de medición.

Sensores Xsens DOT

Los sensores Xsens DOT son unos sensores vestibles que incorporan un acelerómetro 3D, un giroscopio y un magnetómetro para proporcionar una orientación 3D precisa. Estos sensores proporcionan resultados fiables y facilitan el análisis y la interpretación de los datos registrados gracias a su capacidad para recolectar información en tiempo real y su integración con otros sistemas y software.

Con la transmisión inalámbrica de datos a través de Bluetooth 5.0, Xsens DOT es capaz de proporcionar orientación 3D en tiempo real, datos calibrados de aceleración lineal 3D, velocidad angular y campo magnético (terrestre) a un dispositivo receptor. La transmisión de datos se realiza mediante una conexión Bluetooth de baja energía, BLE (Bluetooth Low Energy) lo que amplía las áreas de aplicación de estos sensores y hace que estos sean muy prácticos.

Estos señores son pequeños y ligeros, de cómoda portabilidad y se configuran de forma rápida y fácil. Tienen un grado de impermeabilidad IP68, lo que garantiza que el equipo pueda sumergirse hasta 1,5 metros durante 30 minutos.

Cada sensor tiene unas dimensiones de 36,3 x 30,35 x 10,85 mm y un peso de 11,2 gramos. Además, tienen una luz tipo LED en la parte superior del sensor que luce de distintos colores y en distintas frecuencias en función del estado del sensor (ver Tabla 1):

Tipo	Color LED	Patrones de LED	Estado del sensor
Estados generales	Verde	Encendida 2 segundos	Encendiendo
	Verde	Encendida 1 segundo	Apagando



	-	Apagada	Ahorro de energía o apagado
	Amarilla	Parpadea 1 vez por segundo	Esperando emparejamiento Bluetooth
	Verde	Parpadea 1 vez cada 10 segundos	Listo para usar (Bluetooth conectado)
	Verde	Encendido durante el periodo de sincronización, todos los sensores parpadean (muy rápido) de forma sincronizada durante 3 segundos si la sincronización tiene éxito	Sincronizando
	Verde	Parpadea 2 veces (muy rápido) cada 2 segundos	Midiendo datos después de una sincronización exitosa
	Rojo	Parpadea 8 veces (ultrarrápido) y una breve pausa, durante 10 segundos	Identificando sensor
	Verde	Parpadea 2 veces (muy rápido) y una pausa larga	Arranque – estado normal. Este estado de Led aparecerá brevemente después de una actualización exitosa del firmware
Estado de carga	Amarillo	Aparece y desaparece en un ciclo de 2 segundos	Cargando (batería $\leq 20\%$)
	Verde	Aparece y desaparece en un ciclo de 2 segundos	Cargando ($20\% < \text{batería} \leq 90\%$)
	Verde	Encendida	Cargado (batería $> 90\%$)
Estados de error	Rojo	Encendida	Arranque – estado de error
	Rojo	Parpadea 8 veces por segundo	Sobrecalentamiento durante la carga de la unidad del microcontrolador (MCU) o la batería

Tabla 1. Patrones Led de sensores Xsens DOT v2 [11].

Estos sensores se venden en estuches de carga con capacidad para cinco sensores, que incluye una cubierta de plástico y un cable de alimentación USB (véase Figura 8). Cada departamento cuenta con un puerto micro USB integrado, los sensores se cargan enchufándose a las respectivas ranuras y

otro puerto micro-USB situado en el lado derecho del cargador Xsens DOT se utiliza para encender y cargar todos los sensores acoplados en el cargador. Para alimentar este puerto micro-USB es suficiente con un adaptador 5 V/300 mA aunque se recomienda utilizar un adaptador de 5 V/500 mA basado en una fuente de alimentación.



Figura 8. Sensores Xsens DOT en el estuche de carga [11].

Los sensores Xsens DOT v2 utilizan un giroscopio de tres ejes para proporcionar una velocidad en 3D, un acelerómetro de tres ejes para proporcionar una aceleración en 3D y un magnetómetro de tres ejes para proporcionar un campo magnético terrestre en 3D. Estos componentes recopilan sus propios datos, pero cuando se combinan se obtiene una orientación 3D y una orientación libre [11].

El funcionamiento de estos sensores se fundamenta en la medición de las fuerzas de aceleración y las velocidades angulares que actúan de manera independiente sobre pequeñas masas ubicadas en su interior. Estas mediciones son procesadas mediante algoritmos internos, lo que permite calcular los ángulos de Euler con suficiente precisión.

La tecnología inercial que contienen estos sensores se basa en las dos primeras leyes de Newton. La primera afirma que un cuerpo permanecerá en movimiento uniforme y rectilíneo a menos que una fuerza externa actúe sobre él. La segunda establece que una fuerza aplicada a una masa generará una aceleración proporcional a dicha fuerza.

Todos los sensores Xsens DOT disponen de un sistema de coordenadas cartesiano que se encuentra fijado al cuerpo del sensor. En la Figura 9, se muestra el sistema de coordenadas del sensor utilizando las letras "x", "y" y "z".



Figura 9. Sistema de coordenadas del sensor Xsens DOT [11].

Por defecto, el sistema de coordenadas local fijo a tierra (L) utilizado se define como un sistema de coordenadas cartesianas derechas con “x” positivo hacia el Este (E), “y” positivo hacia el Norte (N) y “z” positivo cuando apunta hacia arriba. Este sistema de coordenadas utilizado se conoce como Este-Norte-Arriba (ENU del inglés “*East-North-Up*”) y es el estándar de navegación inercial para aviación y geodésicas.

Con el sistema de coordenadas ENU la salida de los ángulos de estos sensores se corresponde a la orientación del sistema de coordenadas del sensor (S) con respecto al sistema de coordenadas terrestre local (L).

Estos sensores utilizan los ángulos de Euler denominados balanceo, cabeceo y guiñada conocidos como ángulos Cardan o Tait-Bryan. Por defecto, la salida de la orientación está en el marco Este-Norte-Arriba (ENU), lo que significa que balanceo, cabeceo y guiñada serán iguales a 0 grados cuando el eje “x” del sensor esté alineado con el Este, el eje “y” con el Norte y el eje “z” hacia arriba.

En este trabajo se van a utilizar estos sensores para registrar los ángulos de Euler y la aceleración en el eje z, tanto en los extremos como en el punto central de la viga, por lo que se necesitan tres sensores Xsens DOT.

Plantillas Loadsol

Las plantillas Loadsol (véase Figura 10), son instrumentos creados por Novel con el fin de medir la carga y la distribución de presión ejercida por los pies durante la marcha y otras actividades. Estas plantillas tienen incorporados sensores de presión que registran datos en tiempo real con el objetivo de proporcionar información detallada sobre la distribución del peso en los pies.

Sus principales características son:

- Sensores de Presión Integrados: las plantillas Loadsol contienen una matriz de sensores de presión distribuidos de forma estratégica a lo

largo de la superficie de la plantilla. Con estos sensores se registra la presión ejercida en diferentes áreas de la plantilla.

- **Medición en Tiempo Real:** los sensores integrados en las plantillas Loadsol registran datos de presión en tiempo real, lo que permite el seguimiento continuo de la distribución de carga a lo largo de una actividad.
- **Inalámbricas:** las plantillas Loadsol son inalámbricas, por lo que no hay cables que obstaculicen la movilidad del usuario. Los datos son transmitidos a un dispositivo móvil según se van registrando.
- **Recopilación de datos de alta resolución:** los sensores de presión integrados en las plantillas Loadsol registran datos de alta resolución, con lo que se consigue una representación detallada de cómo el peso se distribuye en ambos pies.
- **Software de análisis:** estas plantillas disponen de un software específico para el análisis de los datos registrados con las plantillas Loadsol. Este software permite visualizar y analizar la distribución de la presión en diferentes condiciones.



Figura 10. Plantillas Loadsol [12].

Al lado del botón de encendido/apagado de las plantillas, hay una luz tipo LED que luce en distintas frecuencias en función del estado del sensor. A continuación, se detallan los estados en los que se pueden encontrar las plantillas Loadsol.

- El LED parpadea en verde, aproximadamente 1 vez cada 1,4 segundos:
 - Listo para conectar vía Bluetooth. Permanecerá en este estado durante 5 minutos y si no se establece conexión el LED se apagará y la plantilla estará en modo ahorro de energía.
- El LED parpadea en verde, aproximadamente 1 vez cada 5 segundos:
 - El sistema está midiendo.

- El LED está apagado:
 - Conexión establecida pero no está midiendo.
 - Sensor en modo ahorro de energía o batería no insertada.

La duración de la batería depende principalmente de la frecuencia y del tiempo de uso, aunque también depende de la temperatura y de la calidad de la batería.

Si el dispositivo no se utiliza durante varios días, la batería debe retirarse del compartimento. Si la batería se dejó en el compartimento y el sistema no se utilizó durante varios días, se debe comprobar el nivel de carga de la batería, y si está vacía, se debe reemplazar. El nivel de batería debe de ser al menos del 10%.

En caso de que el nivel de la batería sea del 0% (casi vacío), se da una advertencia sobre la batería baja durante la conexión a la aplicación. Si se ignora la advertencia y se inicia una medición, ésta se detendrá y se reproducirá un sonido de alarma, entonces, la batería debe cambiarse para continuar con la medición.

La inserción de la batería debe hacerse como se muestra en la Figura 11. El tipo de batería CR2032 se debe situar con el lado "+" hacia arriba, y después se debe cerrar el compartimento con el clip de la batería.



Figura 11. Detalle inserción batería y cerrar clip de la batería [13].

En este TFG el uso de estos sensores no será el habitual, ya que no se van a utilizar para medir fuerzas generadas por la marcha humana, sino que su finalidad es la de medir las fuerzas que genera una viga en los apoyos y en el centro al impulsarla mecánicamente.

3.2 Descripción del proceso de carga y toma de datos

Para realizar el ensayo, primero se van a colocar los caballetes a 6 m de distancia y la viga encima de estos, como se puede ver en el croquis de este primer escenario, mostrado en la Figura 12. Después, se va a colocar una masa

de 24,5 kg sobre los pies de cada caballete con el fin de lastrarle y evitar su movimiento, (véase Figura 15).

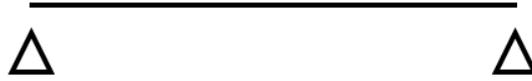


Figura 12. Croquis escenario 1.

Con estos elementos colocados, se comienza a tomar datos de los sensores Xsens DOT y de las plantillas Loadsol. En un extremo de la viga se coloca la plantilla, la viga encima de ésta, después una masa de 3 kg y el sensor Xsens DOT encima, tal como se muestra en la Figura 13. Con estos elementos colocados se consigue el escenario 2.



Figura 13. Croquis escenario 2.

Se sigue el mismo procedimiento para el otro extremo, colocando los sensores, la viga y la masa (véase Figura 14). Con lo que se obtiene el tercer escenario.

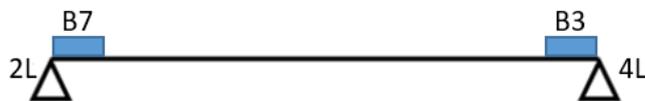


Figura 14. Croquis escenario 3.

Con estos elementos colocados, ambos extremos se presentan como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Detalle del extremo de la viga.

En este momento comienza el primer caso de estudio:

CASO 1

En el primer caso, correspondiente al escenario 4, no hay ninguna masa en el punto central de la viga, por lo que se coloca una plantilla y un sensor Xsens DOT en ese punto. En la Figura 16 se muestra el croquis de este primer caso con los sensores utilizados en cada posición.

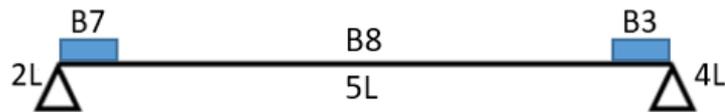


Figura 16. Croquis escenario 4.

Como se puede ver en la Figura 16, en el extremo izquierdo se ha colocado la plantilla Loadsol 2L y el sensor Xsens DOT B7, en el extremo derecho la plantilla 4L y el sensor B3, y en el punto central la plantilla 5L y el sensor B8.

A continuación, en la Figura 17, se muestra un detalle del punto central de la viga en este caso. Aunque la plantilla se encuentra situada encima de la viga, no registra datos significativos ya que no hay ninguna masa encima de ella y el peso del sensor Xsens DOT es despreciable.



Figura 17. Detalle punto central de la viga caso 1.

Cuando están colocados todos los sensores, se excita la viga con un impulso en el punto central, se espera el tiempo necesario a que el sistema deje de oscilar y se vuelve a impulsar. Cuando el sistema deja de oscilar después del segundo impulso, comienza el segundo caso.

CASO 2

En el segundo caso hay que añadir una masa de 3 kg en el punto central de la viga. Para ello, se quita el sensor Xsens DOT de este punto, se pone la masa y se vuelve a colocar el sensor Xsens DOT encima de la masa (véase Figura 18).



Figura 18. Detalle punto central de la viga caso 2.

A continuación, en la Figura 19, se muestra el croquis del caso 2, en el que se ha añadido una masa en el centro de la viga. Este segundo caso de estudio corresponde al escenario 5.

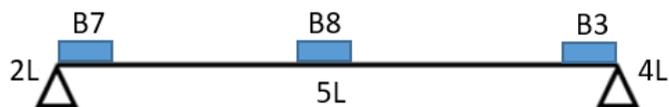


Figura 19. Croquis escenario 5.

En este caso, se vuelve a excitar la viga dos veces al igual que en el caso anterior. Cuando el sistema se estabilice después del segundo impulso, comienza el tercer y último caso.

CASO 3

En el último caso se añade una segunda masa de 3 kg en el centro de la viga. Para ello, se quita el sensor Xsens DOT, se sitúa esta segunda masa encima de la que ya estaba y se vuelve a colocar el sensor Xsens DOT encima de la masa (véase Figura 20).



Figura 20. Detalle punto central de la viga caso 3.

A continuación, en la Figura 21, se muestra el croquis del caso 3, correspondiente al escenario 6, con todos los sensores Xsens DOT y plantillas Loadsol utilizadas.

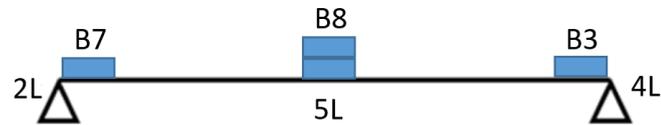


Figura 21. Croquis escenario 6.

En este último caso, se vuelve a impulsar la viga dos veces al igual que en los casos anteriores. Cuando el sistema se estabiliza se procede a detener la toma de datos tanto de los sensores como de las plantillas.

A continuación, en la Figura 22, se muestra la disposición de todos los dispositivos durante este tercer caso.

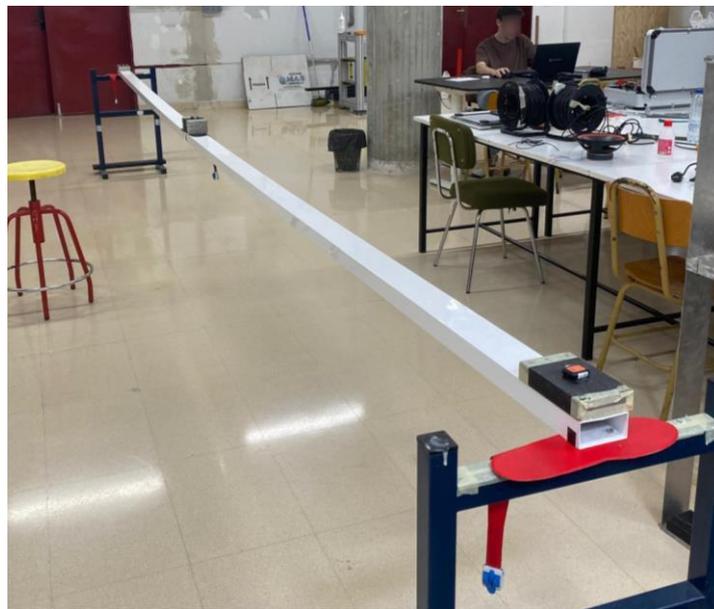


Figura 22. Detalle ensayo en el caso 3.

3.3 Métodos

En este apartado, se va a explicar los diferentes procedimientos utilizados para el análisis de los datos obtenidos en los ensayos realizados. Con el objetivo de estudiar la respuesta ante los impulsos realizados sobre la viga y ajustarlos.

Para el procesamiento de los datos registrados y su posterior análisis se ha utilizado una hoja Excel, que se explica a continuación. Además, se ha



empleado un programa llamado “Sigview” para obtener la frecuencia natural de cada onda.

A continuación, se detalla la elaboración de la tabla Excel utilizada. Se va a mostrar el procedimiento utilizado para la segunda onda del primer caso, es decir, los datos registrados entre 59 y 60,9 segundos por el sensor Xsens DOT B7, situado en el extremo izquierdo de la viga. De todos los datos registrados por este sensor, se van a utilizar los ángulos de Euler.

Se utiliza una tabla distinta para los datos registrados por cada sensor, ya sea Xsens DOT o Loadsol. A continuación, se copian los datos comprendidos entre los tiempos de 59 y 60,9 segundos, en la Tabla 2, se muestra un ejemplo de estos datos registrados por un sensor Xsens DOT situado en un extremo de la viga.

Tiempo	Giro
s	°
59	1,03092176
59,005	1,00339722
59,01	0,97710729
59,015	0,95813152
59,02	0,9444878
59,025	0,93484474
59,03	0,92981769
59,035	0,92417435
59,04	0,92457542
59,045	0,9302621
59,05	0,94187473
59,055	0,96185683
59,06	0,98424628

Tabla 2. Ejemplo de los valores de partida.

Una vez que se han copiado estos datos, se crean tres columnas (véase Tabla 3), para poder analizar y procesar los datos de una forma más sencilla. La primera columna (tiempo(muestras)), es un contador de los datos seleccionados para el estudio. Para este caso, el primero corresponde al tiempo 0 y el último dato al tiempo 380. Con lo que, para este estudio se van a utilizar un total de 380 datos. La segunda columna (tiempo(s)), es el tiempo de muestreo, es decir, cada cuanto tiempo los sensores han registrado un dato de fuerza y la tercera columna son los datos de giro elegidos para el estudio.



Tiempo muestras	Tiempo s	Giro °
0	0	1,03092176
1	0,005	1,00339722
2	0,01	0,97710729
3	0,015	0,95813152
4	0,02	0,9444878
5	0,025	0,93484474
6	0,03	0,92981769
7	0,035	0,92417435
8	0,04	0,92457542
9	0,045	0,9302621
10	0,05	0,94187473
11	0,055	0,96185683
12	0,06	0,98424628

Tabla 3. Ejemplo de las tres primeras columnas

Una vez rellenas estas columnas, se amplía la tabla con las columnas mostradas en la Tabla 4.

Tiempo muestras	Tiempo s	Giro °	giro_ensayo °	giro_ajustado °	error^2 °^2
0	0	1,03092176	-0,2411051	-0,260380197	0,0003715
1	0,005	1,00339722	-0,2686296	-0,288057989	0,0003775
2	0,01	0,97710729	-0,2949196	-0,311844612	0,0002865
3	0,015	0,95813152	-0,3138953	-0,33146123	0,0003086
4	0,02	0,9444878	-0,3275391	-0,346684502	0,0003665
5	0,025	0,93484474	-0,3371821	-0,357349063	0,0004067
6	0,03	0,92981769	-0,3422092	-0,363349254	0,0004469
7	0,035	0,92417435	-0,3478525	-0,36464007	0,0002818
8	0,04	0,92457542	-0,3474514	-0,361237317	0,0001901
9	0,045	0,9302621	-0,3417648	-0,353216992	0,0001312
10	0,05	0,94187473	-0,3301521	-0,340713894	0,0001116
11	0,055	0,96185683	-0,3101700	-0,323919489	0,0001890
12	0,06	0,98424628	-0,2877806	-0,303079055	0,0002340

Tabla 4. Columnas utilizadas para el estudio.

La cuarta columna, (giro_ensayo) representa el giro en torno al valor 0°. Es un ajuste de los datos registrados, debido a que estos datos no están ajustados a ningún valor cero de gráficas. Es decir, esta columna tiene el objetivo de que los datos recogidos oscilen entorno a cero. Para ello, se coge cada valor registrado y se le resta el promedio de todos los valores seleccionados para este primer ensayo. Esta operación se realiza usando el comando



"PROMEDIO()") de Excel para obtener la media aritmética de los valores del ensayo.

La siguiente columna (giro_ajustado) representa el giro ajustado, es decir, es una función creada para tratar los datos. Esta función depende de cuatro parámetros que se explican a continuación.

Para conseguir la función (giro_ajustado) se aplica la expresión del MAS [14], mostrada a continuación:

$$y(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi) \cdot e^{-\zeta\omega t} \quad (18)$$

Donde:

A: Amplitud (°).

ω : frecuencia natural (rad/s).

φ : ángulo de fase inicial (rad).

ζ : factor de amortiguamiento.

La columna error² (°²) representa el valor del error entre las dos curvas representadas, es decir, entre los datos recogidos experimentalmente (giro_ensayo) y los datos obtenidos de forma teórica (giro_ajustado). Los valores de esta columna se obtienen haciendo la diferencia entre ambos giros y se eleva al cuadrado para quitar el signo ya que más adelante se van a sumar todos los errores. Si no se elevase al cuadrado para eliminar el signo, se podría anular un error con signo positivo y otro con signo negativo cuyo módulo sea el mismo y obtener en la suma de los errores un cero cuando en realidad hay errores apreciables entre puntos.

Al representar los valores normalizados de la fuerza del ensayo frente al tiempo (Figura 23) se puede observar que la onda está formada por una única contribución, lo que significa, que esta onda va a tener solo una frecuencia natural, esto corresponde a un único modo de vibración.

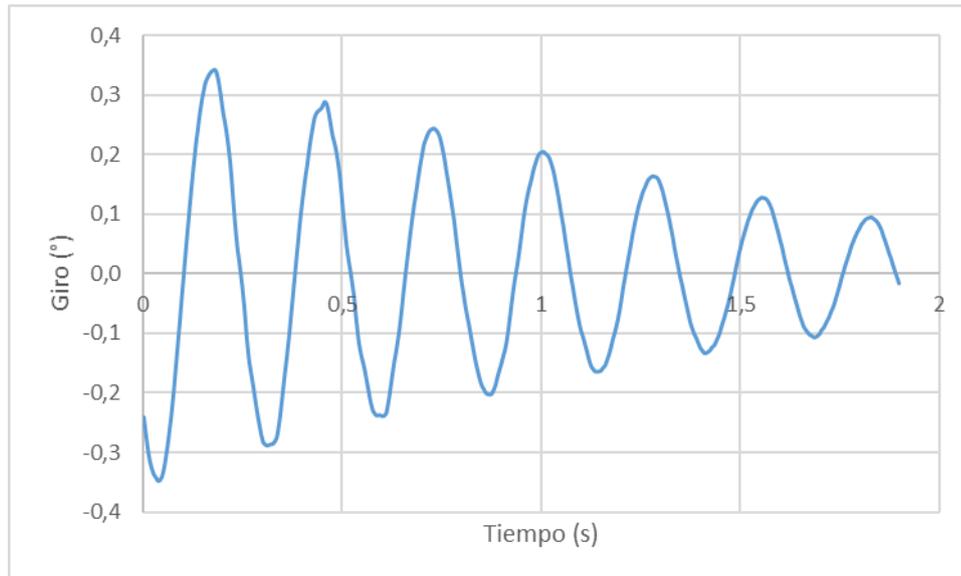


Figura 23. Gráfica giro_ensayo.

Se crea otra tabla en Excel con los parámetros de la ecuación (18), con el fin de obtener la columna de giro_ajustado. Para conseguir estos datos, se va a utilizar una herramienta de Excel usada para analizar datos, llamada “Solver”. Esta herramienta, necesita partir de una estimación inicial bastante precisa. Por lo que se va a usar un programa, llamado “Sigview”, para obtener una aproximación de la frecuencia natural de la onda. Con esta frecuencia se aproximarán el resto de valores.

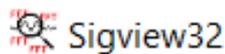


Figura 24. Icono aplicación “Sigview”.

“Sigview” es un completo paquete de software diseñado para el análisis de señales, ofreciendo tanto capacidades de procesamiento en tiempo real como análisis fuera de línea. Este programa incluye una extensa variedad de herramientas que permiten realizar análisis de señales y funciones estadísticas de manera eficiente. Además, “Sigview” destaca por su avanzado sistema de visualización, el cual proporciona una representación clara y detallada de los datos analizados.

El software está diseñado para poder personalizarlo y adaptarlo a diversas necesidades, permitiendo a los usuarios modificar y ajustar sus funciones según las necesidades de cada proyecto. Una de las grandes ventajas de “Sigview” es su facilidad de uso, ya que no es necesario tener conocimientos de programación para usarlo eficazmente [15].

A continuación, se va a explicar el funcionamiento de este software:

- Para analizar los datos con “Sigview”, lo primero es hacer una copia de los datos que se desea analizar en un Bloc de notas (.txt), quedando como se muestra en la Figura 25.

Euler B7.txt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

-1,706977582
-1,905105997
-1,624268387
-1,646726558
-1,776972504
-1,706790779
-1,664024922
-1,725839613
-1,720600672
-1,68730434
-1,706472521
-1,71550824
-1,702511704
-1,703671703

Figura 25. Datos pasados al Bloc de notas.

- Después, se abre la aplicación “Sigview” y se cargan los datos del Bloc de notas que se ha creado anteriormente. Para esto, se siguen los pasos mostrados en la Figura 26: File → ASCII files → Import signal (decimal comma) → se selecciona el Bloc de notas creado en el paso anterior.

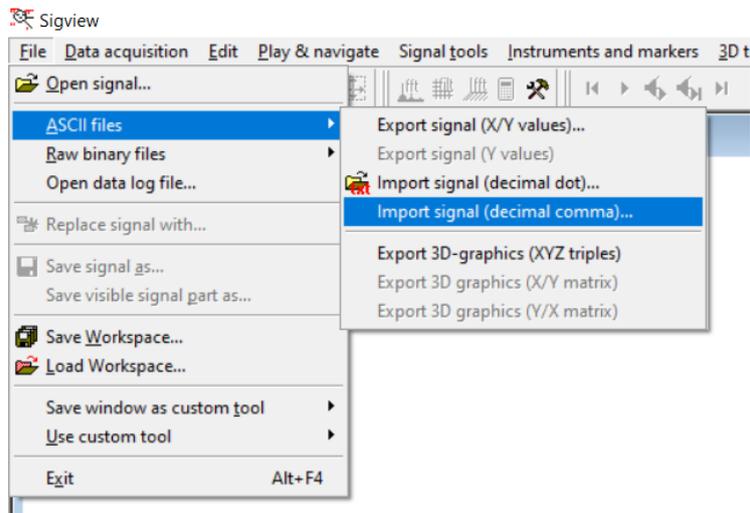


Figura 26. Detalle de como importar datos en “Sigview”.

- Cuando se selecciona el archivo, aparece una ventana como la mostrada en la Figura 27, en la que hay que indicar el número de muestras recogidas por los sensores en un segundo. Para el caso de estudio, los sensores recogen 200 datos por segundo.

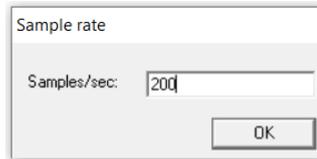


Figura 27. Datos por segundo registrados.

- Con esto, aparecerá una gráfica como la mostrada en la Figura 28. Lo siguiente es seleccionar el rango de valores a estudiar, en este caso, se selecciona la onda representada entre 59 y 60,9 s.

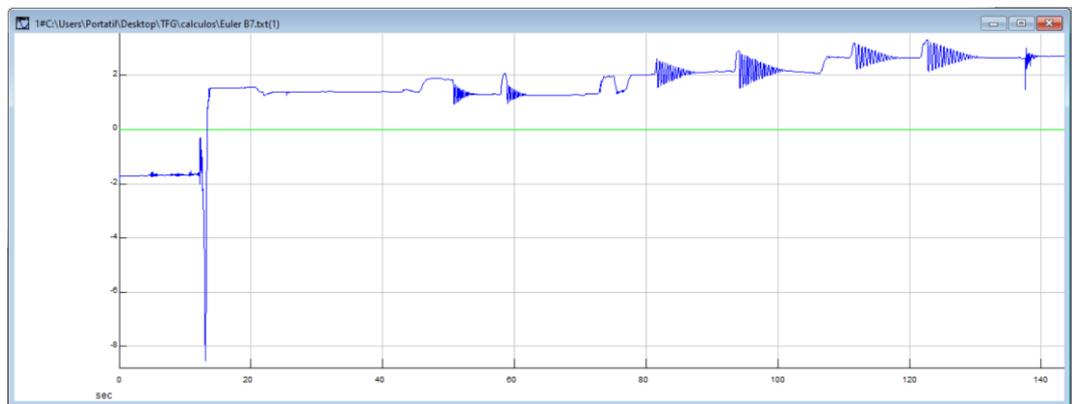


Figura 28. Gráfica en “Sigview” de los datos importados.

- Se seleccionan los valores arrastrando la flecha con el botón izquierdo del ratón clicado, y después, se clicca con el botón derecho dentro de la gráfica y se selecciona “Zoom in”.

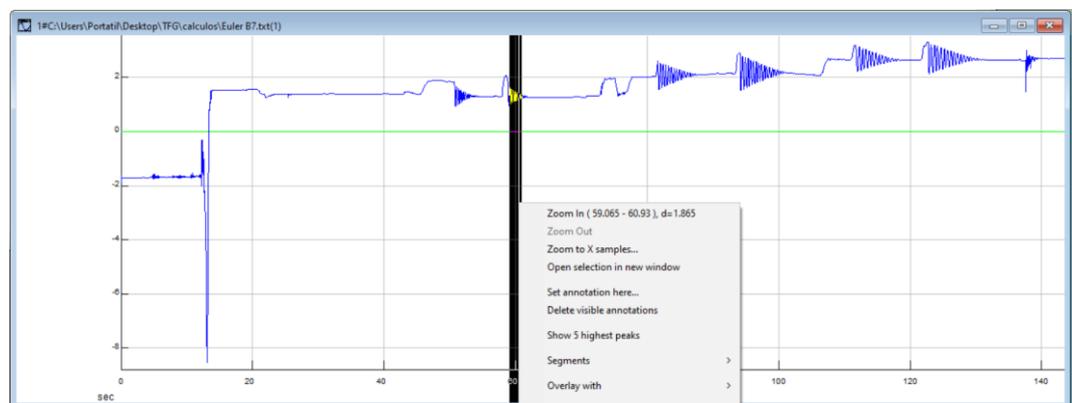


Figura 29. Detalle de como seleccionar datos en “Sigview”.

- Con los datos seleccionados, se selecciona el comando “Signal tools” → “FFT spectrum analysis”.

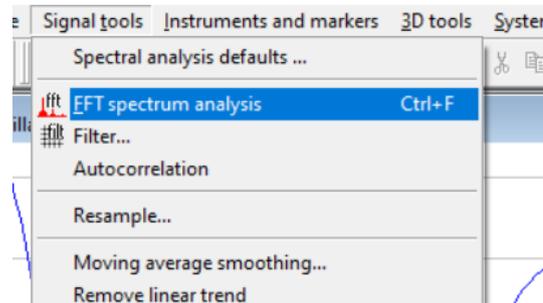


Figura 30. Detalle selección comando “FFT spectrum analysis”.

- Con esto, aparece la gráfica mostrada en la Figura 31, se clicla con el botón derecho del ratón dentro de la gráfica y se selecciona “Show 5 highest peaks”, para obtener los valores numéricos de la frecuencia de los cinco puntos más significativos en el tramo de datos seleccionado.

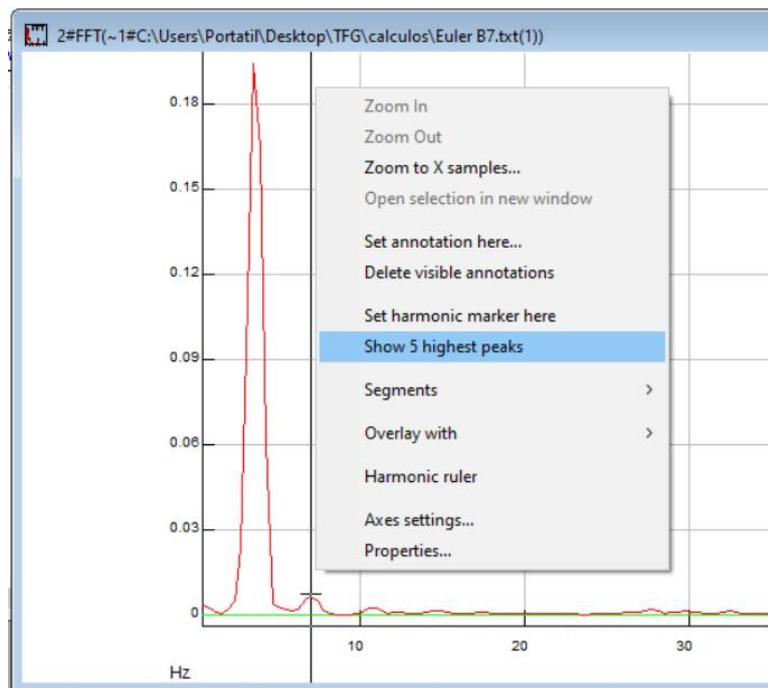


Figura 31. Detalle selección comando “Show 5 highest peaks”.

- Con este comando, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 32, la frecuencia del pico más alto, es el necesario para obtener la gráfica en Excel.

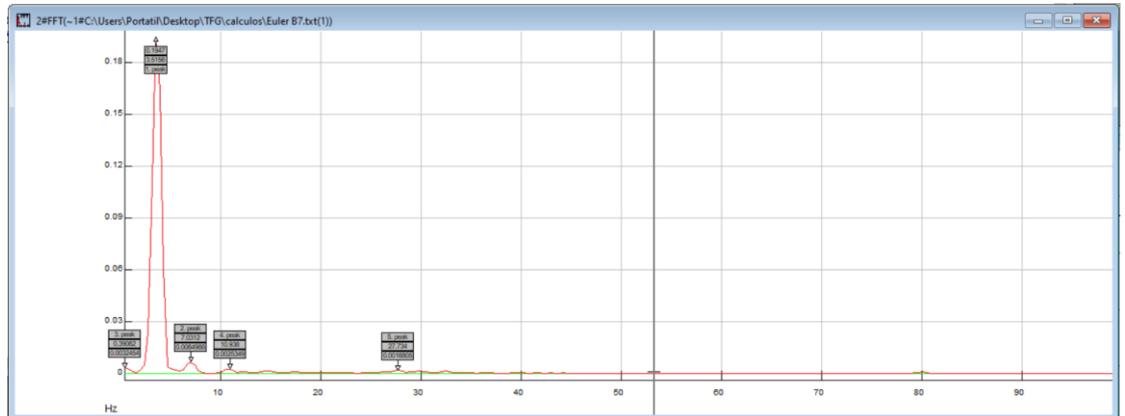


Figura 32. Gráfica obtenida con el comando "Show 5 highest peaks".

- La frecuencia, es el segundo valor que aparece en el pico más alto, en este caso, se obtiene una frecuencia de 3,5156 Hz, pasándolo a rad/s, 22,089 rad/s.

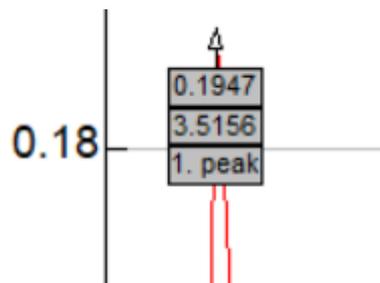


Figura 33. Detalle de la frecuencia natural de la onda, en Hz.

Usando la frecuencia de 24,5434 rad/s, se ajustan en Excel el resto de parámetros. El valor de la amplitud (A), estira la gráfica en el eje vertical. Tras probar con distintos datos, se determina que el valor de la amplitud será aproximadamente $0,37^\circ$.

El amortiguamiento (d), modifica la onda aguas abajo, disminuyendo más la amplitud cuanto mayor sea el amortiguamiento. Después de probar con diversos valores, se elige 0,03 como aproximación del amortiguamiento.

El desfase (f), modifica el punto donde empieza la gráfica, es decir, el valor de giro para un tiempo igual a 0. Tras probar varios valores se escoge una aproximación de 3,9 rad para el valor del desfase.

Con estos valores, se obtiene una aproximación de la gráfica ajustada, mostrada en la Figura 34.

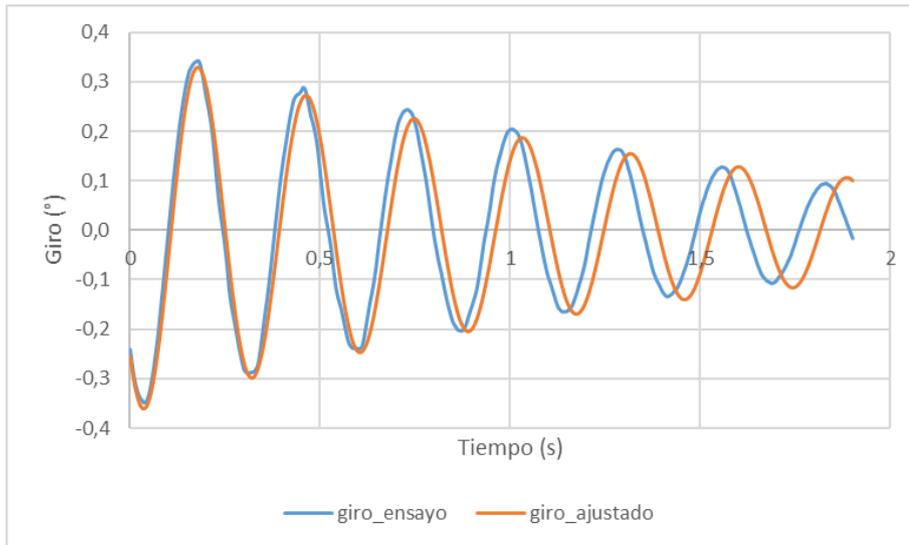


Figura 34. Aproximación de los parámetros.

Para conseguir ajustar totalmente la gráfica, se usará una herramienta disponible en Excel para realizar ajustes de datos, llamada "Solver". Esta herramienta, se basa en el ajuste de las dos curvas por mínimos cuadrados, reduciendo el error cuadrático medio (la media de todos los errores al cuadrado).

Para ello, en la columna (error²) se calcularán los errores de cada dato registrado, restando los valores de (giro_ensayo) y (giro_ajustado).

$$error = giro_ensayo - giro_ajustado \quad (19)$$

Estos valores se elevan al cuadrado (^2), para facilitar el cálculo del error cuadrático. Después de esto, se añade una celda denominada error (véase Figura 35), en la que se calculará el promedio de la suma de todos los errores, usando el comando "PROMEDIO()", y a este valor se le realiza la raíz cuadrada para reducir el valor del resultado, quedando la ecuación como "RAIZ(PROMEDIO())".

El objetivo es que ese valor sea prácticamente nulo ya que cuanto más se acerque dicho valor a cero, menor será la distancia entre ambas curvas.

fx		=RAIZ(PROMEDIO(I3:I383))			
	I	J	K	L	M
	error^2		Giro B7		
	°^2				
79	0,0001787		A	°	0,37
13	0,0001681		w	rad/s	22,089
15	0,0001039		d	-	0,03
14	0,0001181		f	rad	3,9
13	0,0001638		error		0,0726487

Figura 35. Cálculo del error cuadrático medio.

Cuando se haya realizado el cálculo del error cuadrático medio, se hace uso de la herramienta “Solver”, para disminuir dicho error. La ventana que aparece para definir los parámetros es la mostrada en la Figura 36. En esta ventana se establece el objetivo en la celda en la que se ha calculado el error, y el objetivo definido, es que minimice dicho valor.

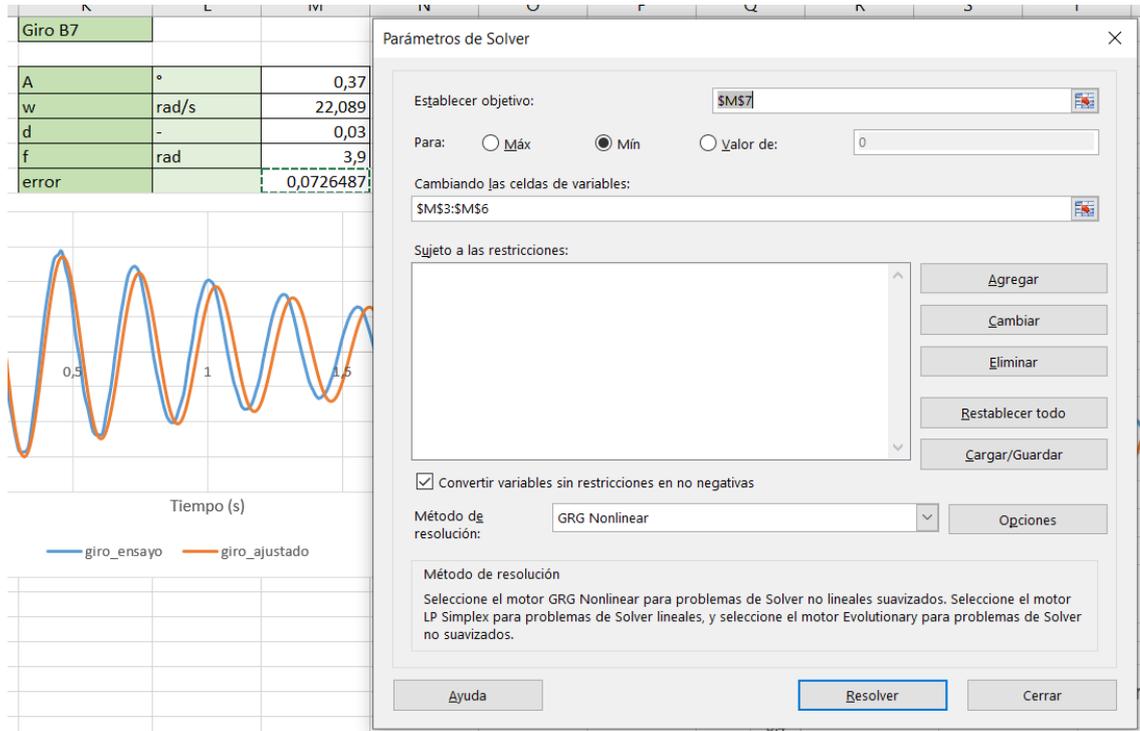


Figura 36. Definir parámetros “Solver”.

Las variables para conseguir minimizarlo son las celdas de la amplitud, la frecuencia natural, el amortiguamiento y el desfase. Parámetros de los que depende el valor de (giro_ajustado).

Realizando el ajuste con “Solver”, se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 5:

A	°	0,37355781
w	rad/s	22,7101534
d	-	0,03039018
f	rad	3,91283004
error		0,0119668

Tabla 5. Parámetros ajustados con “Solver”.

Con estos valores ajustados, se consigue la gráfica mostrada en la Figura 37.

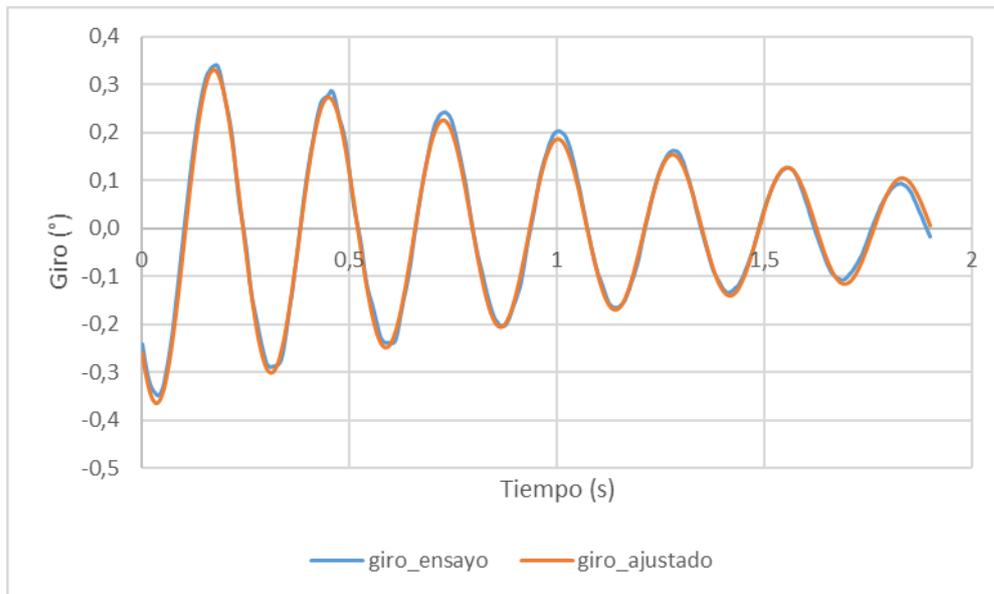


Figura 37. Gráfica ajustada.

Como se ve en la Figura 37, los valores de los ángulos de Euler obtenidos en el ensayo, y los valores del giro ajustado con los parámetros, coinciden con una buena precisión.

Se seguirá el mismo procedimiento para ajustar el resto de datos recogidos por los sensores tanto Xsens DOT como Loadsol. Con este ajuste se obtienen todos los parámetros de cada oscilación registrada en el ensayo por cada sensor. Las frecuencias obtenidas en este ajuste se van a utilizar para calcular la constante ($E \cdot I$) de la viga utilizada en el ensayo.

Es necesario calcular este término debido a que la viga no solamente está compuesta de aluminio, sino que está lacada en la parte exterior, con lo cual, el módulo de Young de la viga no coincide con el del aluminio. Por otra parte, las medidas de la viga tampoco son exactas, por lo que el momento de inercia de la viga tampoco se sabe con exactitud.

Para cada caso del ensayo se va a hacer la media de todas las frecuencias obtenidas tanto de los sensores Xsens DOT como de las plantillas Loadsol. Después, con las fórmulas mencionadas en el apartado 2.2, ecuaciones (8) y (9), se calcula un ($E \cdot I$) para cada caso, y por último se hace la media de los ($E \cdot I$) obtenidos en los tres casos de estudio.



A continuación, en la Tabla 6, se muestran las frecuencias medias y el valor de $(E \cdot I)$ obtenido en cada caso.

	Frecuencia media (Hz)	$(E \cdot I)$
Caso 1	3,6228	5885,489262
Caso 2	2,4426	5798,415648
Caso 3	1,9892	5933,431635

Tabla 6. Cálculo $(E \cdot I)$.

Se hace la media de los valores obtenidos de $(E \cdot I)$ en los tres casos y se obtiene un valor medio de 5872,445515. Este valor se va a utilizar para todos los cálculos realizados a lo largo de este TFG.



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación “vestible”.*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

CAPÍTULO 4. Ajuste de parámetros

En este capítulo se pretende calcular los errores cometidos por los sensores Xsens DOT, en cuanto al registro de aceleraciones y ángulos de Euler y por las plantillas Loadsol en el registro de fuerzas.

A continuación, en la Figura 38, se muestran los puntos en los que se han colocado cada sensor Xsens DOT y cada plantilla Loadsol con el objetivo de que sea más fácil interpretar las gráficas mostradas en este capítulo.

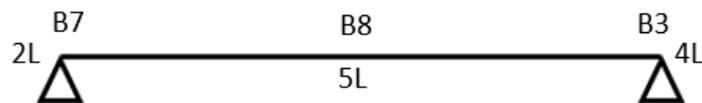


Figura 38. Posición sensores Xsens DOT y plantillas Loadsol.

4.1 Ajuste fuerzas

En primer lugar, se exportan los datos de las plantillas Loadsol a Excel para proceder a su estudio. A continuación, en la Figura 39, se representan las fuerzas registradas por las tres plantillas frente al tiempo.

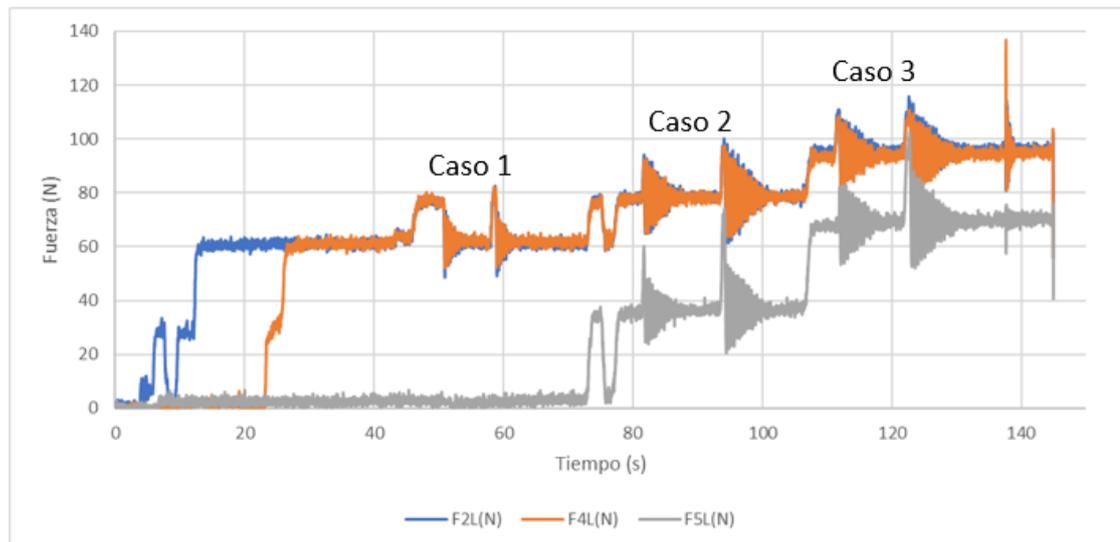


Figura 39. Representación de las fuerzas registradas por las plantillas Loadsol.

En la Figura 39, se puede ver con claridad el proceso de toma de datos. El primer escalón de la plantilla 2L, representada en azul, es la consecuencia de colocar la viga encima de la plantilla. El segundo salto se debe a situar la masa de 3 kg encima de la viga. Estos dos primeros saltos se repiten en la plantilla 4L y se deben a lo mismo, al posicionamiento de la viga y de la masa. Después,

se dan dos impulsos, lo que produce dos oscilaciones (caso 1). Luego, se produce un salto en las tres plantillas que se debe a situar una masa de 3 kg en el centro de la viga. Después, se producen otras dos oscilaciones debido a dos impulsos (caso 2). Por último, se añade la última masa en el centro de la viga y se dan los dos últimos impulsos (caso 3).

En este apartado se va a verificar que las fuerzas registradas por las plantillas Loadsol se corresponde con el peso de las masas situadas en cada momento del ensayo. Para esto, se va a utilizar un valor medio obtenido de las gráficas a través de "Sigview". A continuación, se va a explicar el proceso para obtener estos valores medios.

Lo primero que se debe hacer es una copia de los datos de los cuales se van a obtener valores medios de la fuerza en un Bloc de notas (.txt). Después, se abre la aplicación "Sigview" y se cargan los datos del Bloc de notas. Para esto, se deben seguir los pasos: File → ASCII files → Import signal (decimal comma) → se selecciona el Bloc de notas creado anteriormente.

Cuando se selecciona el archivo, aparecerá una ventana en la que hay que indicar el número de datos recogidos por segundo, en este caso serán 200 muestras/segundo.

Después, aparecerá una representación de los datos, se deben seleccionar aquellos de los que se desea obtener la media. Para esto, se debe arrastrar la flecha con el botón izquierdo del ratón clicado y se clicca con el botón derecho dentro del rango de datos seleccionados y pulsa sobre "Zoom in" tal como se ve en la Figura 40.

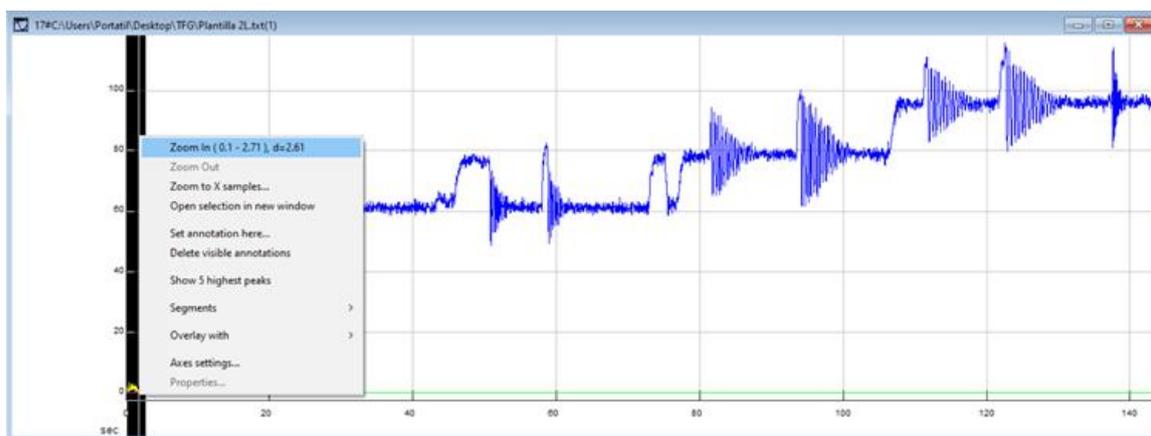


Figura 40. Detalle selección de datos con "Zoom in".

Después, se siguen los pasos: “Instruments and markers” → “Mean” tal como se puede observar en la Figura 41.

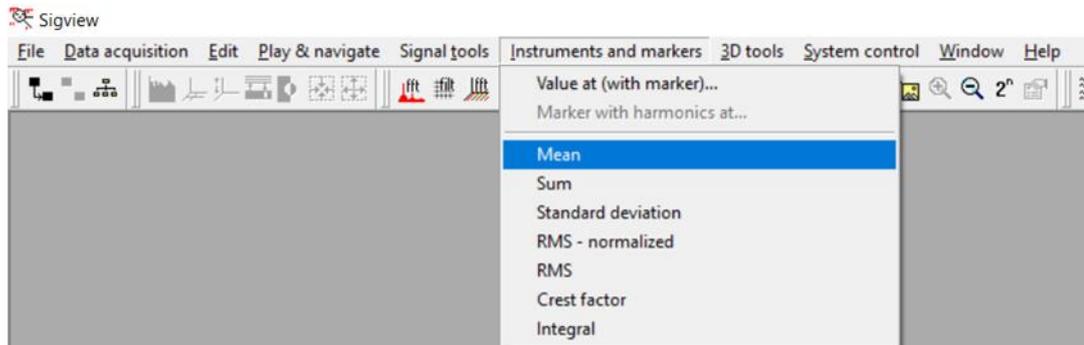


Figura 41. Detalle de pasos para obtener el valor medio.

Con esto, aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura 42, en la que se indica el valor medio de los datos seleccionados.

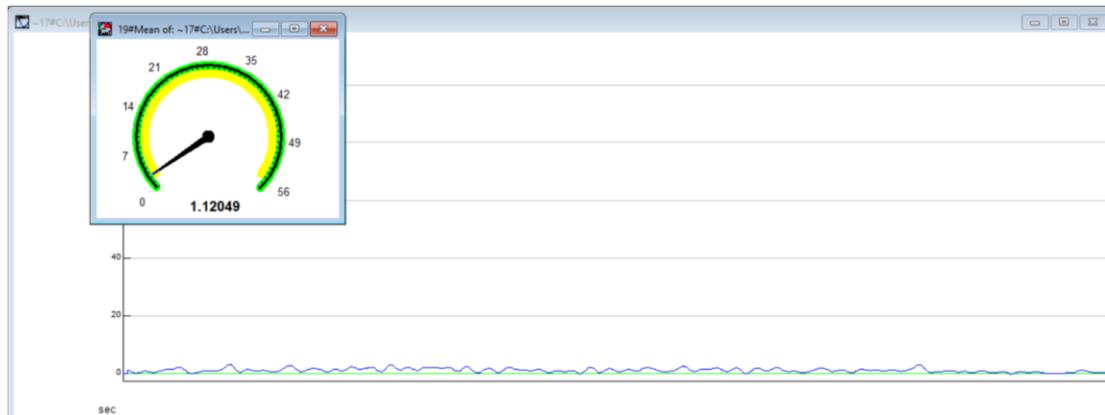


Figura 42. Detalle del valor medio de los datos seleccionados.

Se seguirá este procedimiento para obtener todos los valores de fuerzas citados a lo largo de este apartado.

A continuación, se va a mostrar la gráfica de la Figura 39, separada en siete tramos en los que se va a ir comprobando los valores de las fuerzas registradas por las plantillas Loadsol.

En la gráfica de la Figura 43, se empiezan a registrar datos con las plantillas Loadsol en $t=0$. En ese momento, los caballetes y la viga se encuentran colocados. En esta gráfica, el tramo 1 abarca desde $t=0$ hasta $t=15$ s, solo varía la fuerza registrada por la plantilla 2L, situada en el extremo izquierdo de la viga. El primer incremento de fuerza se debe al propio peso de la viga. La fuerza aquí aumenta hasta 28 N, pero el incremento es $(28,02-1,12=)$ 26,9 N, y esto se debe a la mitad del peso de la viga, 2,6 kg, ya que el peso total de la viga se divide entre los dos apoyos.

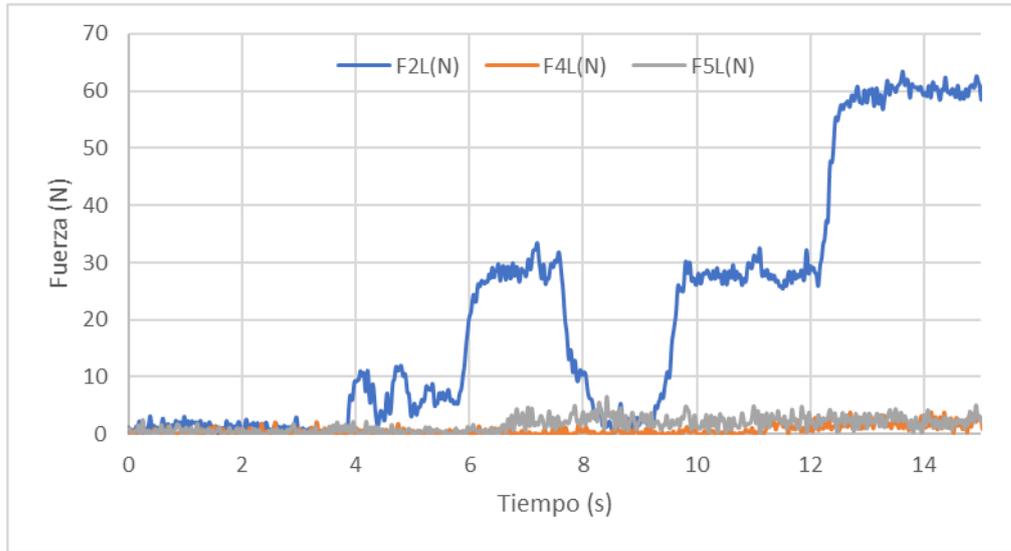


Figura 43. Representación tramo 1 registros plantillas Loadsol.

Se calculan los kilogramos que soporta el caballete debido al incremento de fuerza en la ecuación (20), y se obtiene 2,74 kg.

$$\frac{26,9N}{9,81 N/kg} = 2,74 \text{ kg} \quad (20)$$

Se obtiene el error absoluto calculando la diferencia entre ambos valores:

$$Error \text{ absoluto} = |2,74 - 2,6| = 0,14 \text{ kg} \quad (21)$$

Se realiza el cociente entre el error absoluto y el peso de la viga, y se obtiene el error relativo:

$$Error \text{ relativo} = \frac{0,14}{2,6} \cdot 100 = 5,38 \% \quad (22)$$

El siguiente incremento de fuerza se debe al peso de la masa de 3 kg que se sitúa sobre el apoyo. Este incremento de fuerza será $(60,9-28,02=)$ 32,88 N, pasándolo a kilogramos como se muestra en la ecuación (23), se obtiene 3,35 kg.

$$\frac{32,88N}{9,81 N/kg} = 3,35 \text{ kg} \quad (23)$$

Se calcula el error cometido:

$$Error \text{ absoluto} = |3,35 - 3| = 0,35 \text{ kg} \quad (24)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,35}{3} \cdot 100 = 11,67 \% \quad (25)$$

El segundo tramo, mostrado en la Figura 44, abarca desde 15 hasta 40 s. En este tramo varía la fuerza de la plantilla 4L, situada en el extremo derecho de la viga. El primer incremento de fuerza se debe a la mitad del peso de la viga, 2,6 kg. El incremento de fuerza registrado en este primer salto es de $(28,81 - 0,89) = 27,92$ N. Se pasa a kilogramos al igual que en el primer tramo y se obtiene 2,85 kg.

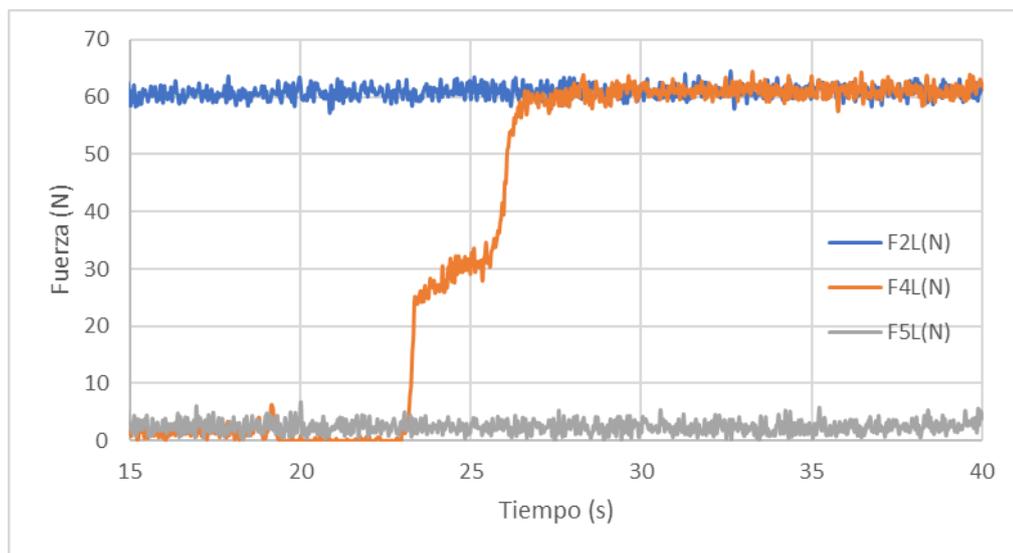


Figura 44. Representación tramo 2 registros plantillas Loadsol.

A continuación, en las ecuaciones (26) y (27) se calcula el error cometido:

$$\text{Error absoluto} = |2,85 - 2,6| = 0,25 \text{ kg} \quad (26)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,25}{2,6} \cdot 100 = 9,62 \% \quad (27)$$

El siguiente incremento de fuerza se debe al peso de la masa de 3 kg que se sitúa sobre el apoyo. Este incremento de fuerza será $(61,06 - 28,81) = 32,25$ N, pasándolo a kilogramos se obtiene 3,29 kg. El error cometido es de:

$$\text{Error absoluto} = |3,29 - 3| = 0,29 \text{ kg} \quad (28)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,29}{3} \cdot 100 = 9,67 \% \quad (29)$$

En la Figura 45 se representa el tramo 3, que comprende desde 40 hasta 70 s. Este tramo corresponde al caso 1 explicado anteriormente, en el que se impulsa la viga dos veces esperando a que el sistema deje de oscilar en cada una de ellas.

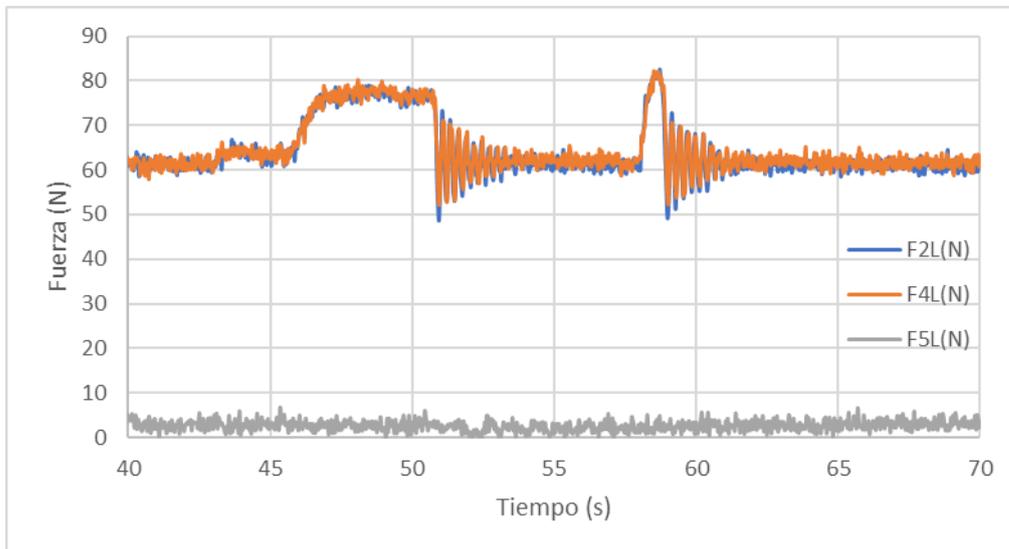


Figura 45. Representación tramo 3 registros plantillas Loadsol.

El tramo 4 (véase Figura 46) comprende desde 70 hasta 80 s. La plantilla 5L, situada en el punto central de la viga sufre un incremento de fuerza que se debe al momento en el que se sitúa la masa de 3 kg en el punto central de la viga. La fuerza registrada sufre un incremento de $(35,1-2,57=)$ 32,53 N pasándolo a kilogramos, 3,32 kg.

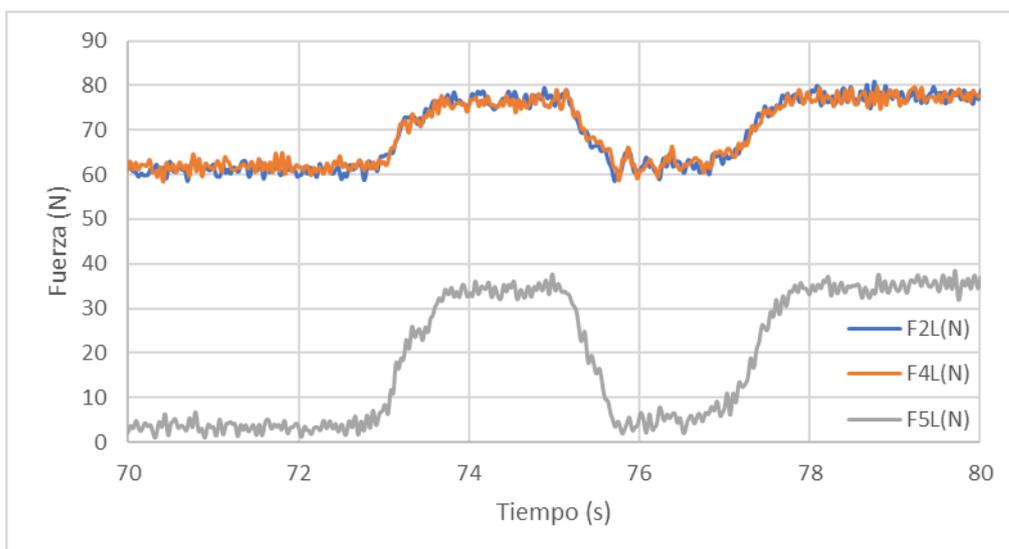


Figura 46. Representación tramo 4 registros plantillas Loadsol.

A continuación, se calcula el error cometido:

$$\text{Error absoluto} = |3,32 - 3| = 0,32 \text{ kg} \quad (30)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,32}{3} \cdot 100 = 10,67 \% \quad (31)$$

La fuerza de las plantillas situadas en los extremos, 2L y 4L, también se incrementa por situar la masa de 3 kg en el punto central de la viga. En este caso, los 3 kg se dividen entre los dos extremos, con lo que el incremento de fuerza equivale a 1,5 kg en cada plantilla.

El incremento de fuerza de la plantilla 2L es de $(77,9-61,01=)$ 16,89 N pasándolo a kilogramos, 1,72 kg. A continuación, en las ecuaciones (32) y (33) se calcula el error.

$$\text{Error absoluto} = |1,72 - 1,5| = 0,22 \text{ kg} \quad (32)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,22}{1,5} \cdot 100 = 14,67 \% \quad (33)$$

El incremento de fuerza de la plantilla 4L es de $(77,69-61,74=)$ 15,95 N pasándolo a kilogramos, 1,63 kg. Aquí el error es de:

$$\text{Error absoluto} = |1,63 - 1,5| = 0,13 \text{ kg} \quad (34)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,13}{1,5} \cdot 100 = 8,67 \% \quad (35)$$

El tramo 5, mostrado en la Figura 47, comprende desde 80 hasta 105 segundos. Este caso corresponde al caso 2, en el que impulsa la viga 2 veces esperando a que el sistema deje de oscilar en ambas.

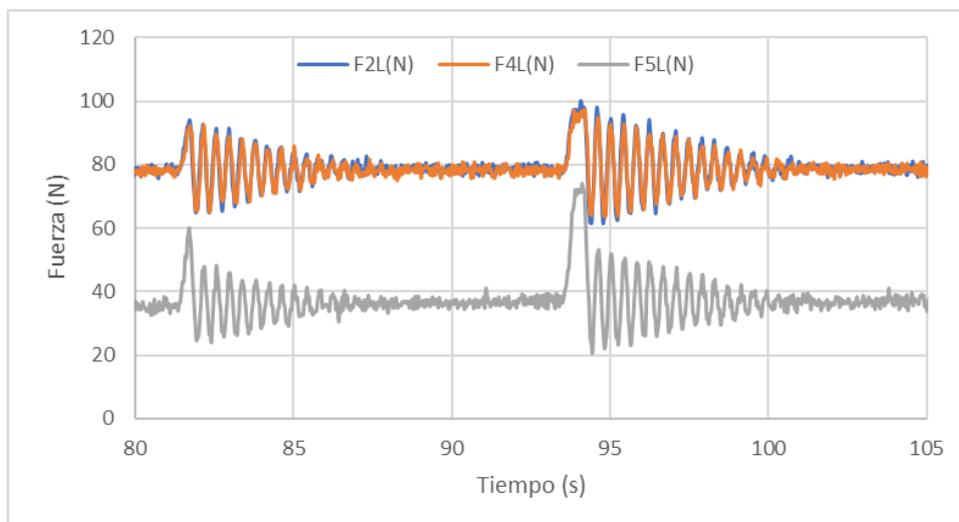


Figura 47. Representación tramo 5 registros plantillas Loadsol.

En la representación del tramo 6 (véase Figura 48), que abarca desde 105 hasta 110 s, se puede observar que todas las plantillas sufren un aumento de fuerza. Esto se debe a que se coloca una segunda masa de 3 kg en el centro de la viga. El incremento de fuerza de la plantilla central equivale a los 3 kg de la masa y los incrementos de las plantillas situadas en los extremos, 2L y 4L, equivalen a la mitad del peso de la masa, 1,5 kg.

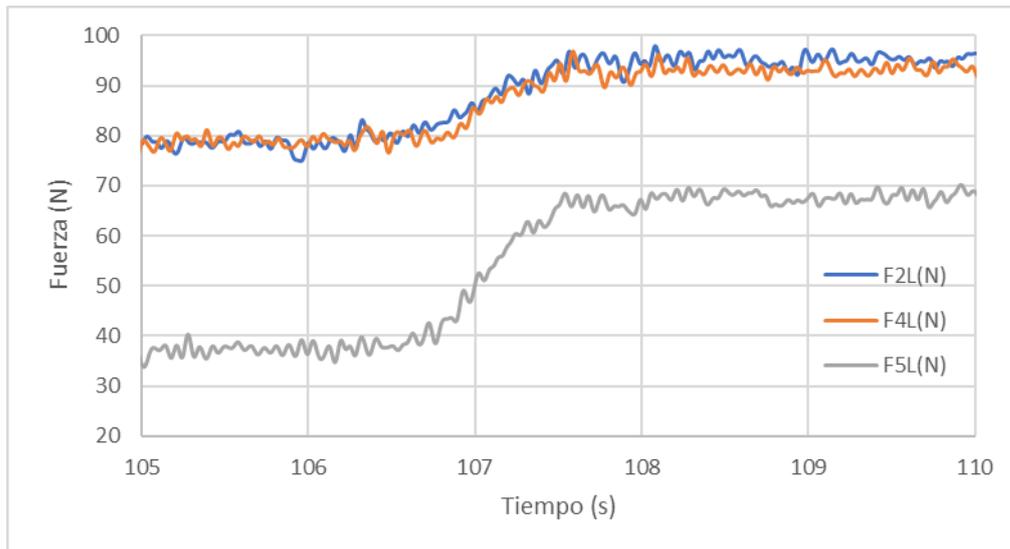


Figura 48. Representación tramo 6 registros plantillas Loadsol.

En la plantilla central, 5L, la fuerza se incrementa $(67,78-36,94=)$ 30,84 N pasándolo a kilogramos, 3,14 kg. El error cometido es de:

$$\text{Error absoluto} = |3,14 - 3| = 0,14 \text{ kg} \quad (36)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,14}{3} \cdot 100 = 4,67 \% \quad (37)$$

En las plantillas 2L y 4L, situadas en los extremos, la fuerza se incrementa $(95,32-78,63=)$ 16,69 N pasándolo a kilogramos, 1,7 kg. En este caso, los errores van a ser los mismos en ambas plantillas:

$$\text{Error absoluto} = |1,7 - 1,5| = 0,2 \text{ kg} \quad (38)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,2}{1,5} \cdot 100 = 13,33 \% \quad (39)$$

El tramo 7, mostrado en la Figura 49, representa el último tramo de la gráfica, entre 110 y 150 s. Este tramo corresponde al caso 3, en el que se producen los dos últimos impulsos esperando a que el sistema deje de oscilar en los dos impulsos.

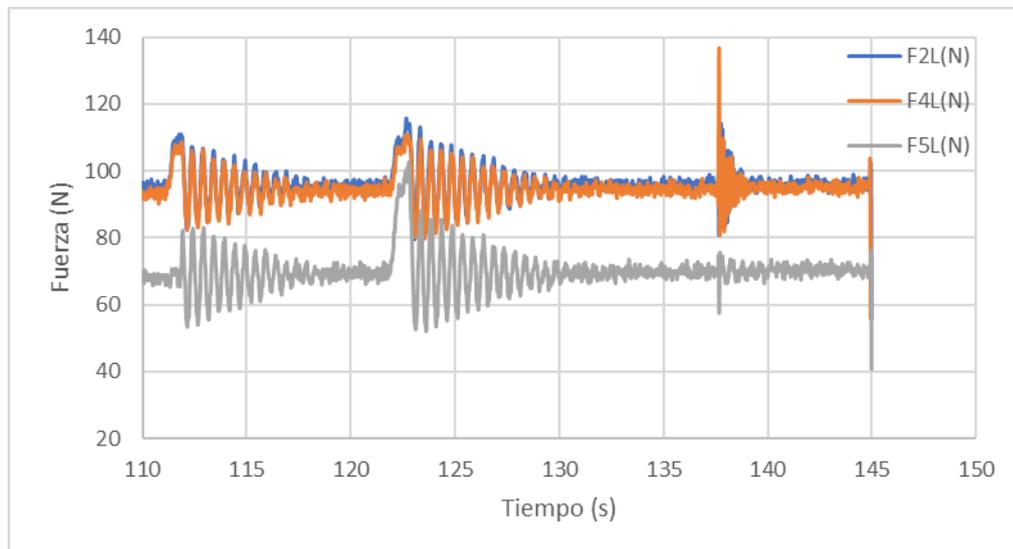


Figura 49. Representación tramo 7 registros plantillas Loadsol.

La mayor parte de los errores obtenidos con las plantillas Loadsol en este estudio se sitúan en torno al 10%, que es el margen de error máximo indicado por el fabricante. Sin embargo, en ciertos casos se ha superado este error máximo, lo cual se debe a que las plantillas se han utilizado en un contexto para el que no han sido diseñadas. Las plantillas Loadsol, se han fabricado con el fin de medir la carga y distribución de presión ejercida por los pies durante la marcha y otras actividades relacionadas con el movimiento humano, y no para el análisis estructural para el que se han utilizado en este trabajo.

4.2 Ajuste aceleraciones eje Z

En este apartado se va a comprobar la fórmula mostrada en la ecuación (40), en la que se multiplica el incremento de masa de cada tramo y la aceleración media registrada por los sensores Xsens DOT para comparar dicho valor con los incrementos de fuerza registrados por las plantillas Loadsol.

$$F = m \cdot a \quad (40)$$

Para ello, primero se exportan los datos registrados de los Xsens DOT a Excel. A continuación, en la Figura 50, se va a mostrar la representación de las aceleraciones registradas por los Xsens DOT en el eje Z frente al tiempo.

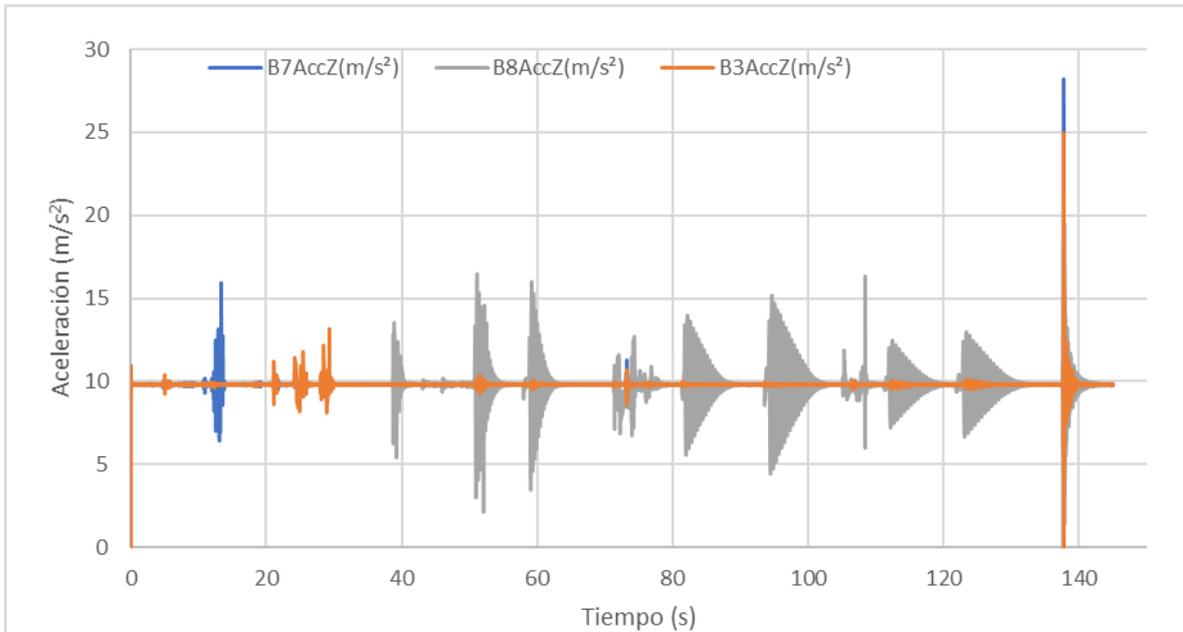


Figura 50. Representación aceleraciones del eje Z.

Ahora, se va a mostrar la gráfica de la Figura 50, separada en siete tramos en los que se va a ir comprobando la ecuación (40).

En este primer tramo mostrado en la Figura 51, solo varía la fuerza de la plantilla 2L, que corresponde al sensor B7. Con "Sigview" se obtiene una aceleración media de 9,8 m/s².

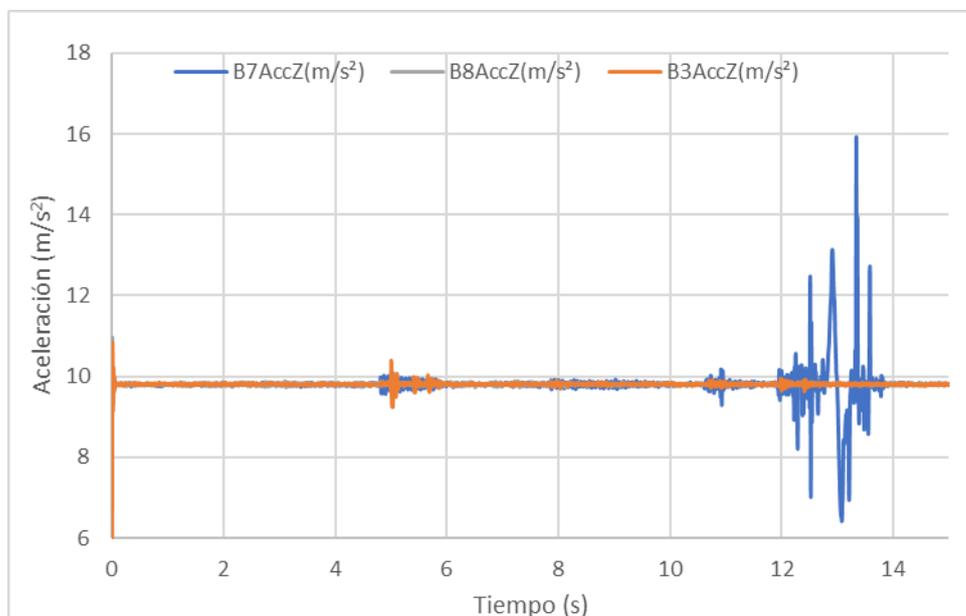


Figura 51. Representación tramo 1 aceleración eje Z.

Tal como se ha visto anteriormente, el incremento de fuerza de 26,9 N se debe a la mitad de la masa de la viga, 2,6 kg. Comprobando la fórmula en la ecuación (41), se obtiene un valor muy próximo a los 26,9 N.

$$F = 2,6 * 9,8 = 25,48 \text{ N} \quad (41)$$

El segundo incremento de fuerza es de 32,88 N y se debe a la colocación de la masa de 3 kg. Se vuelve a comprobar la fórmula en la ecuación (42) y se obtiene un valor de 29,4 N.

$$F = 3 * 9,8 = 29,4 \text{ N} \quad (42)$$

A continuación, en la Figura 52, se muestra el segundo tramo, en el que solo varía la fuerza de la plantilla 4L, que corresponde al sensor B3. Se obtiene una aceleración media de 9,8 m/s².

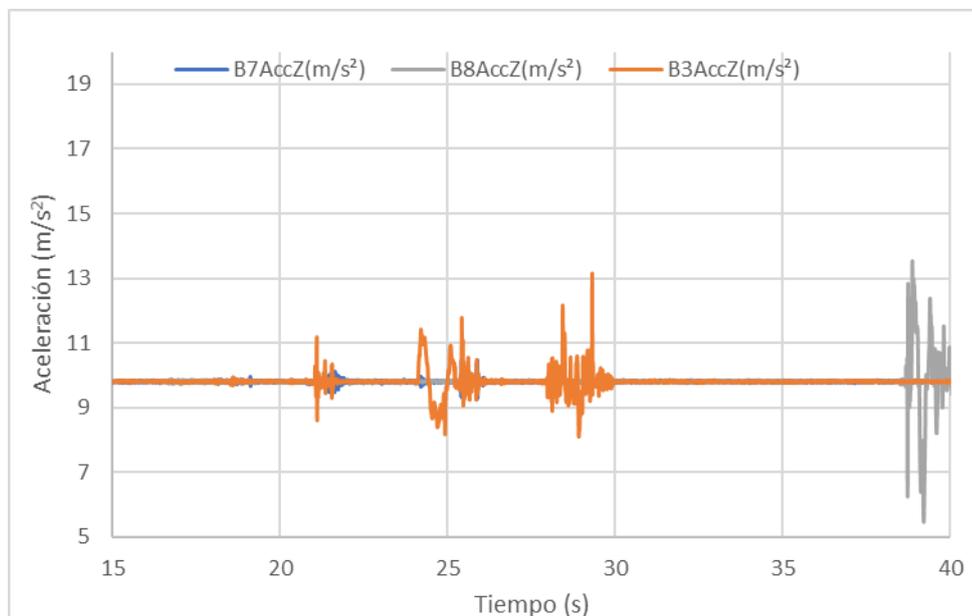


Figura 52. Representación tramo 2 aceleración eje Z.

Tal como se ha visto anteriormente, el incremento de fuerza de 27,92 N se debe a la mitad de la masa de la viga, 2,6 kg. Se comprueba la fórmula y se obtiene 25,48 N, ecuación (43).

$$F = 2,6 * 9,8 = 25,48 \text{ N} \quad (43)$$

El segundo incremento de fuerza es de 32,25 N y se debe a la colocación de la masa de 3 kg. Se vuelve a comprobar la fórmula y se obtiene una fuerza de 29,4 N, ecuación (44).

$$F = 3 * 9,8 = 29,4 \text{ N} \quad (44)$$

En el tercer tramo, mostrado en la Figura 53, solo registra oscilaciones el sensor B8, situado en el centro de la viga, donde también se sitúa la plantilla 5L. Durante este periodo de tiempo la plantilla 5L no registra datos significativos debido a que no hay ninguna masa en el centro de la viga.

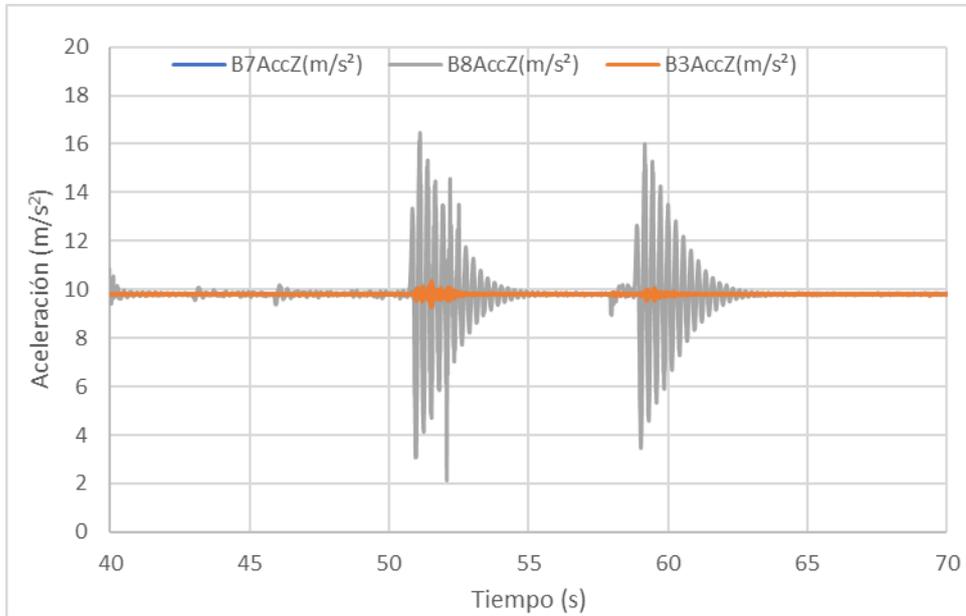


Figura 53. Representación tramo 3 aceleración eje Z.

A continuación, en la Figura 54, se muestra el cuarto tramo que abarca desde 70 hasta 80 s. En este tramo varía la fuerza de todas las plantillas debido a que se coloca una masa en el punto central de la viga.

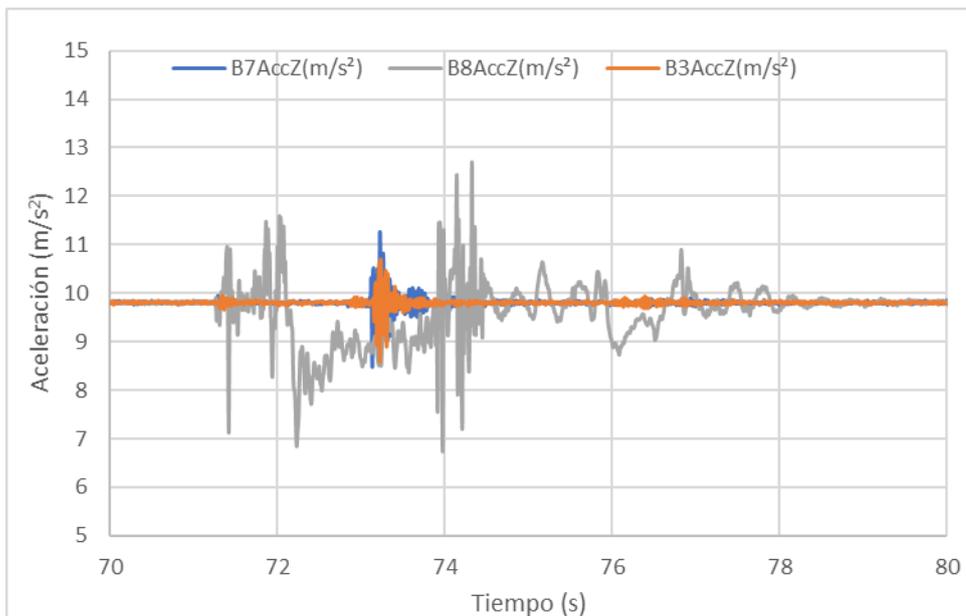


Figura 54. Representación tramo 4 aceleración eje Z.

En este tramo, la fuerza de la plantilla central, 5L, sufre un incremento de fuerza debido a la masa de 3 kg, mientras que las plantillas situadas en los extremos sufren un incremento de fuerza a causa de la mitad de la masa de 3 kg, en este caso 1,5 kg.

El incremento de fuerza de la plantilla central es de 32,53 N, esta plantilla corresponde al sensor Xsens B8. La aceleración media registrada por este sensor es de 9,64 m/s². Se comprueba la fórmula y se obtiene una fuerza de 28,92 N, ecuación (45).

$$F = 3 * 9,64 = 28,92 \text{ N} \quad (45)$$

El incremento de fuerza de la plantilla izquierda es de 16,89 N, esta plantilla corresponde al sensor Xsens B7. Para la plantilla derecha el incremento es de 15,95 N y corresponde al sensor Xsens B3. La aceleración media registrada por este sensor es de 9,81 m/s². Se comprueba la fórmula y se obtiene una fuerza de 14,72 N, ecuación (46).

$$F = 1,5 * 9,81 = 14,72 \text{ N} \quad (46)$$

En el siguiente tramo, mostrado en la Figura 55, solo registra oscilaciones el sensor B8, situado en el centro de la viga, donde también se sitúa la plantilla 5L.

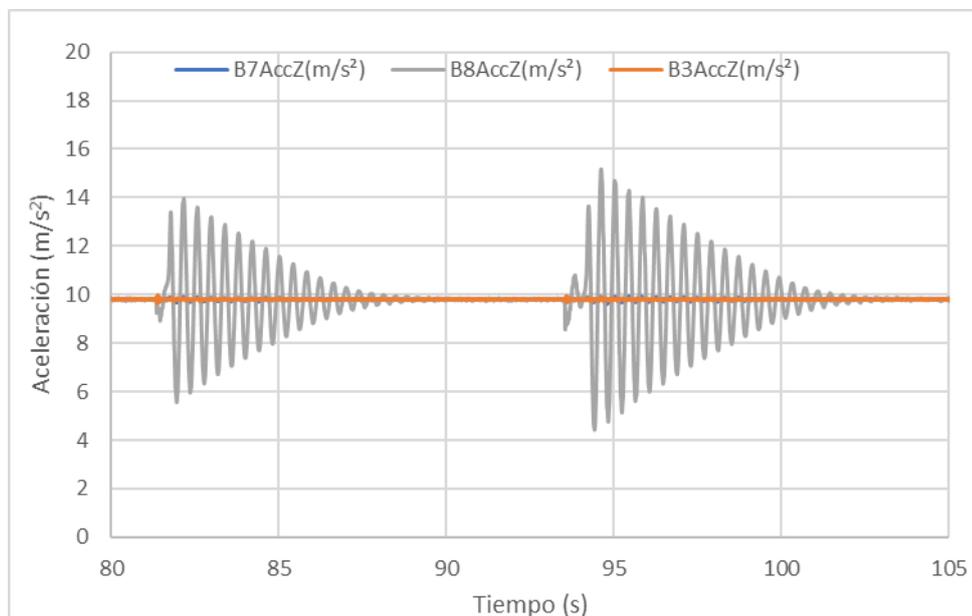


Figura 55. Representación tramo 5 aceleración eje Z.

En este caso se va a comprobar la fórmula durante el comportamiento dinámico de las ondas usando los parámetros obtenidos a través del ajuste de datos en Excel. En la tabla 7 se muestran los parámetros de las ondas



ajustadas de la plantilla 5L y de la aceleración del sensor Xsens B8, usando "Sigview" y "Solver" en Excel.

PARÁMTEROS DE LA ONDA	Primera onda		Segunda onda	
	Plantilla 5L	Xsens B8	Plantilla 5L	Xsens B8
Amplitud	12,45 N	4,41 m/s ²	15,65 N	5,15 m/s ²
Frecuencia (Hz)	2,4443	2,4429	2,4447	2,4436
Amortiguamiento (%)	0,0191	0,0188	0,0203	0,0195
Desfase (rad)	3,7356	3,8218	0,7820	0,8247

Tabla 7. Parámetros tramo 5.

Como se puede observar, los valores de la frecuencia y el amortiguamiento son prácticamente iguales en la plantilla Loadsol y el sensor Xsens DOT para cada onda. Y la amplitud es el parámetro que sigue la fórmula de la ecuación (40), para una masa de 3 kg, ya que en este periodo de tiempo hay una masa de 3 kg en el punto central de la viga.

En el caso de la primera oscilación, se obtiene un valor de 13,23 N en la ecuación (47):

$$F = 3 \cdot 4,41 = 13,23 \text{ N} \quad (47)$$

A continuación, en las ecuaciones (48) y (49) se calcula el error comparando el valor de fuerza obtenido en la ecuación (47) y la amplitud obtenida en el ajuste de Excel de la plantilla central.

$$\text{Error absoluto} = |12,45 - 13,23| = 0,78 \text{ N} \quad (48)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,78}{13,23} \cdot 100 = 5,89 \% \quad (49)$$

Para la segunda oscilación, se obtiene un valor de 15,45 N en la ecuación (50):

$$F = 3 \cdot 5,15 = 15,45 \text{ N} \quad (50)$$

En las ecuaciones (51) y (52) se calcula el error cometido en esta segunda oscilación.

$$\text{Error absoluto} = |15,65 - 15,45| = 0,20 \text{ N} \quad (51)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,2}{15,45} \cdot 100 = 1,29 \% \quad (52)$$

En el tramo 6, mostrado en la Figura 56, varía la fuerza de todas las plantillas. Se debe a que se coloca una segunda masa en el punto central de la viga con lo que la fuerza de la plantilla central, 5L, sufre un incremento de fuerza debido a la masa de 3 kg, mientras que las plantillas situadas en los extremos sufren

un incremento de fuerza debido a la mitad de la masa de 3 kg, en este caso 1,5 kg.

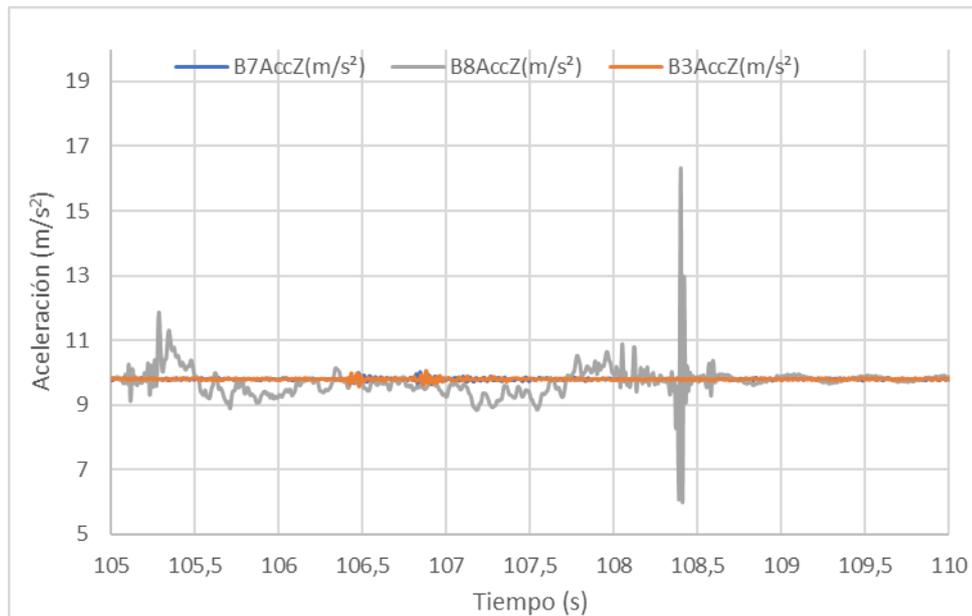


Figura 56. Representación tramo 6 aceleración eje Z.

El incremento de fuerza de la plantilla central es de 30,84 N, esta plantilla corresponde al sensor Xsens B8. La aceleración media registrada por este sensor es de 9,64 m/s². Se comprueba la fórmula y se obtiene una fuerza de 28,92 N, ecuación (53).

$$F = 3 * 9,64 = 28,92 \text{ N} \quad (53)$$

El incremento de fuerza de la plantilla izquierda es de 16,89 N, esta plantilla corresponde al sensor Xsens B7. Para la plantilla derecha el incremento es de 15,95 N y corresponde al sensor Xsens B3. La aceleración media registrada por este sensor es de 9,81 m/s². Se comprueba la fórmula y se obtiene 14,72 N, ecuación (54).

$$F = 1,5 * 9,81 = 14,72 \text{ N} \quad (54)$$

Al igual que en el tramo 5, en este último tramo, mostrado en la Figura 57, solo se registran variaciones en la aceleración en el sensor B8, situado en el punto central de la viga.

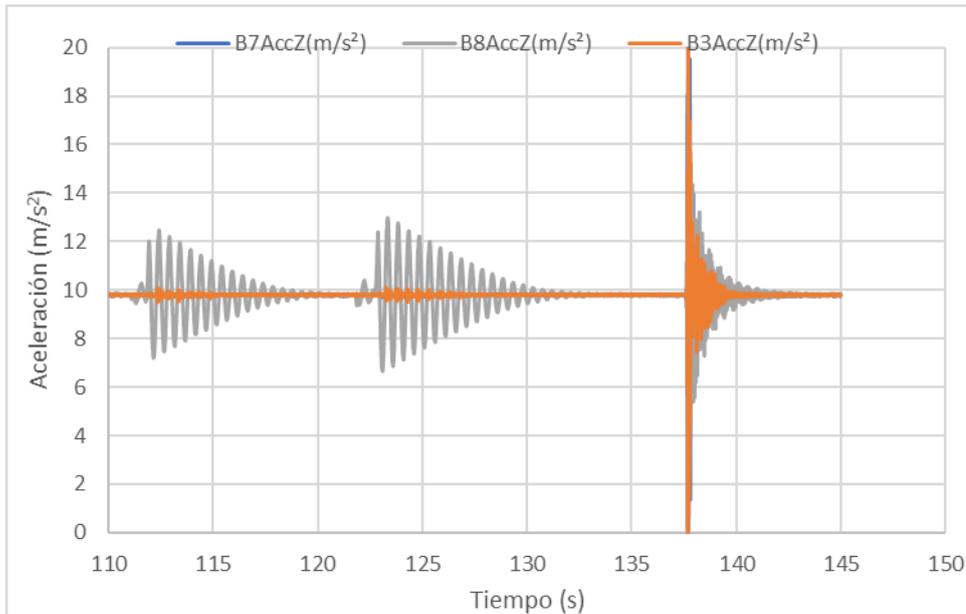


Figura 57. Representación tramo 7 aceleración eje Z.

Se va a volver a comprobarla fórmula durante el comportamiento dinámico de las dos últimas ondas del estudio. A continuación, se muestran en la Tabla 8 los parámetros ajustados de ambas ondas correspondientes a la plantilla 5L y a la aceleración del sensor Xsens B8, ambos situados en el punto central de la viga.

PARÁMTEROS DE LA ONDA	Primera onda		Segunda onda	
	Plantilla 5L	Xsens B8	Plantilla 5L	Xsens B8
Amplitud	14,10 N	2,53 m/s ²	17,42 N	3,18 m/s ²
Frecuencia (Hz)	1,9829	1,9926	1,9887	1,9903
Amortiguamiento (%)	0,0154	0,0174	0,0121	0,0134
Desfase (rad)	0,2215	0,2215	3,4701	3,5503

Tabla 8. Parámetros ramo 7.

Al igual que en el tramo 5, los valores ajustados de la frecuencia y amortiguamiento son prácticamente iguales en la plantilla Loadsol y en el sensor Xsens DOT para cada plantilla, y la amplitud responde a la fórmula de la ecuación (40) con m igual a 6 kg ya que en este tramo hay dos masas de 3 kg en el punto central de la viga.

Para la primera oscilación, se obtiene un valor de 15,18 N en la ecuación (55):

$$F = 6 \cdot 2,53 = 15,18 \text{ N} \quad (55)$$

En las ecuaciones (56) y (57) se calcula el error entre el valor obtenido en la ecuación (55) y la amplitud de la plantilla obtenida en el ajuste de Excel.



$$\text{Error absoluto} = |14,10 - 15,18| = 1,08 \text{ N} \quad (56)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{1,08}{15,18} \cdot 100 = 7,11 \% \quad (57)$$

En la ecuación (58), se obtiene un valor de 19,08 N para la segunda oscilación:

$$F = 6 \cdot 3,18 = 19,08 \text{ N} \quad (58)$$

A continuación, en las ecuaciones (59) y (60) se calcula el error cometido en esta segunda oscilación.

$$\text{Error absoluto} = |17,42 - 19,08| = 1,66 \text{ N} \quad (59)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{1,66}{19,08} \cdot 100 = 8,70 \% \quad (60)$$

En este apartado, se puede concluir por una parte los tramos en los que los valores registrados de aceleración se mantienen constantes. En estos tramos la aceleración media oscila en torno a $9,8 \text{ m/s}^2$, ya que en los momentos en los que la viga no está oscilando la única aceleración que actúa sobre los sensores es la de la gravedad, la cual toma un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$.

Por otra parte, los tramos que muestran un comportamiento dinámico tienen errores relativos menores del 10%. Al igual que las plantillas Loadsol, el fabricante de los sensores Xsens DOT marca que estos pueden tener un error de hasta el 10%, en este apartado se ha comprobado que el error cometido es menor del estimado por el fabricante.

4.3 Ajuste giros

En este apartado se va a comprobar que los giros registrados con los sensores Xsens DOT cumplen la fórmula de giros obtenida del prontuario. Así mismo, se calculan los incrementos de giros debido a las masas adicionales que se sitúan en la viga.

Ahora, se van a utilizar las fórmulas de giros obtenidas del prontuario para calcular $\Delta\varphi$. Con estas fórmulas se obtendrán los incrementos de giros correspondientes a los incrementos de fuerzas calculados en el apartado 4.1 de este capítulo.



Se va a comprobar la fórmula de giros para una carga puntual centrada, ecuación (61), por lo que se usarán los incrementos de fuerzas registrados por la plantilla 5L, y se obtienen los incrementos de giros de los sensores situados en los extremos de la viga.

$$\varphi = \frac{FL^2}{16EI} \quad (61)$$

Se va a calcular este incremento para las situaciones en las que se colocan las masas de 3 kg en el punto central de la viga.

Cuando se coloca la primera masa en el centro de la viga el incremento de fuerza de la plantilla 5L, colocada en el centro de la viga, es de 32,53 N, con lo que se obtiene un incremento de 0,7301 °, ecuación (62):

$$\Delta\varphi = 0,0127 \text{ rad} = 0,7301^\circ \quad (62)$$

Cuando se coloca la segunda masa de 3 kg en el punto central de la viga el incremento de fuerza registrado por la plantilla es de 30,84 N y se obtiene un incremento de giro de 0,6922 °, ecuación (63):

$$\Delta\varphi = 0,0121 \text{ rad} = 0,6922^\circ \quad (63)$$

Para la situación en la que se coloca la viga sobre los apoyos, se va a considerar la viga como una carga distribuida sobre toda la estructura, con lo que la fórmula obtenida del prontuario será la mostrada en la ecuación (64) [5].

$$\varphi = \frac{FL^3}{24EI} \quad (64)$$

En este caso el giro producido se debe al propio peso de la viga, que es de 5,2 kg. Pasándolo a Newton, queda un peso de 50,96 N, con esta fuerza se obtiene un incremento de giro de 2,2914 °, ecuación (65):

$$\Delta\varphi = 0,0799 \text{ rad} = 2,2914^\circ \quad (65)$$

Estos valores incrementales se van a comparar más adelante con los obtenidos con los sensores Xsens DOT. Los giros hay que tratarles como incrementos, no como valores absolutos ya que los iniciales no son cero, por error de instrumentación. Además, el propio peso de la viga ya provoca un giro inicial.

La gráfica de giros no muestra valores absolutos reales, pero sí muestra los valores incrementales reales, por lo que se va a calcular con "Sigview" la media de los diferentes tramos de la gráfica de giros. Con esto se calcularán los diferentes incrementos de giros entre los tramos.

Se va a representar la gráfica de los ángulos de Euler registrados con los sensores Xsens DOT situados en los extremos de la viga en la Figura (58). A partir de $t = 30$ s aproximadamente, que ya se han colocado todos los sensores en su posición, los giros registrados por ambos sensores son prácticamente iguales, pero con signos contrarios, esto se debe a que el sentido de giro es contrario para los sensores, pero el giro producido en ambos extremos es el mismo.

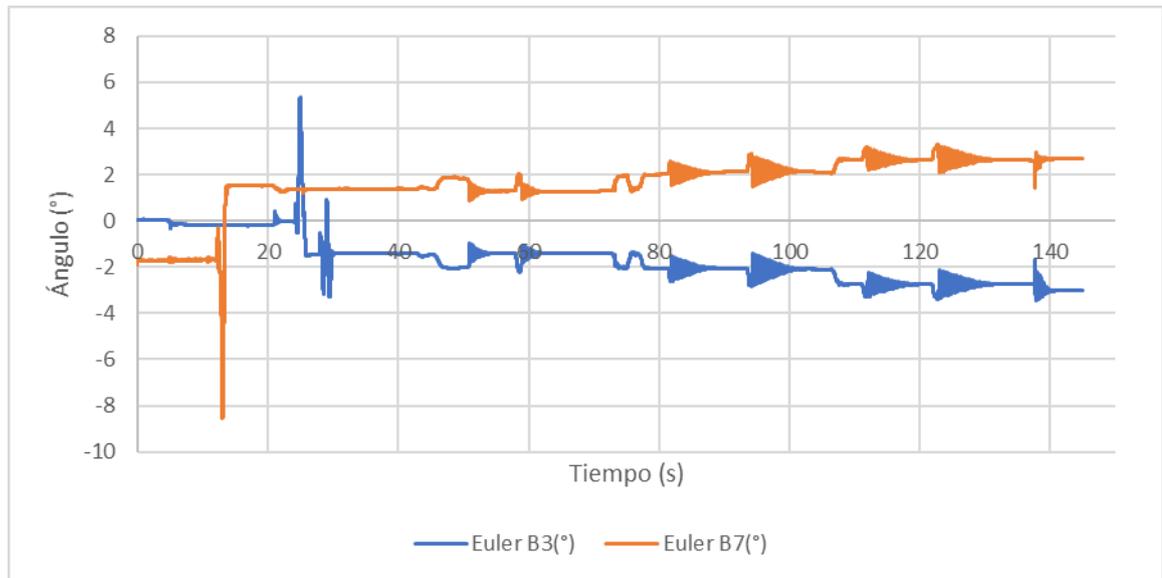


Figura 58. Representación ángulos de Euler.

A continuación, se van a mostrar las gráficas de los ángulos de Euler separadas en tramos y se van a calcular los incrementos de giros mencionados anteriormente. En la Figura 59, se muestran los tramos 1 y 2.

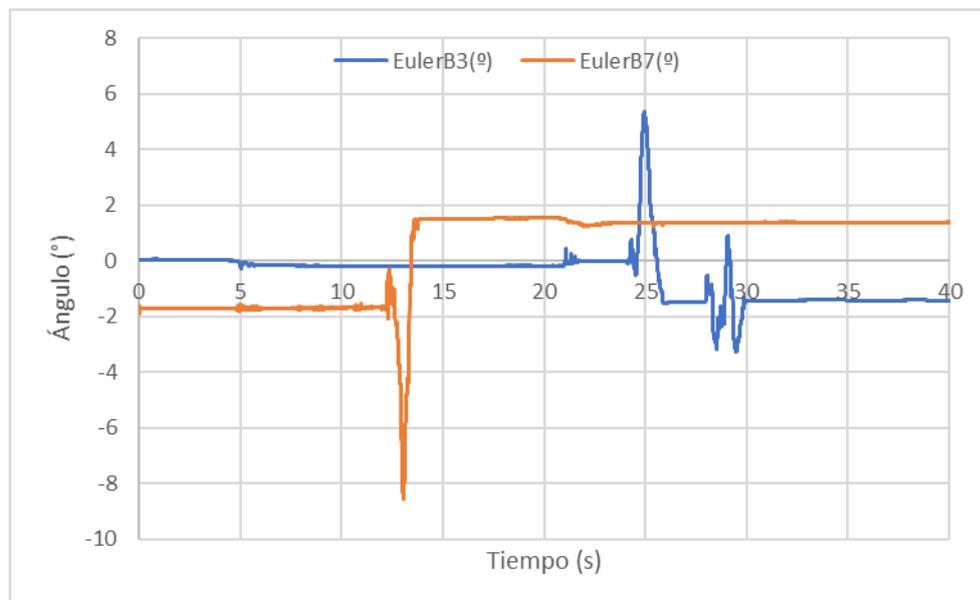


Figura 59. Representación tramo 1 y 2 ángulos de Euler.

El tramo 1 abarca desde el principio del ensayo hasta los 15 s. En este tramo se coloca la viga sobre el apoyo izquierdo con lo que el ángulo de Euler registrado por el sensor Xsens B7 sufre un incremento, el cual se calcula en la ecuación (66):

$$\Delta\varphi = 1,2643 - (-1,7024) = 2,9667^\circ \quad (66)$$

El tramo 2 comprende desde 15 hasta 40 s. En este tramo se coloca la viga sobre el apoyo derecho con lo que el ángulo de Euler registrado por el sensor Xsens B3 sufre un incremento el cual se calcula en la ecuación (67):

$$\Delta\varphi = -1,4127 - (-0,1890) = -1,2237^\circ \quad (67)$$

El tramo 3, mostrado en la Figura 60, comprende desde 40 hasta 70 s. En este tramo se pueden apreciar las dos primeras oscilaciones de la viga.

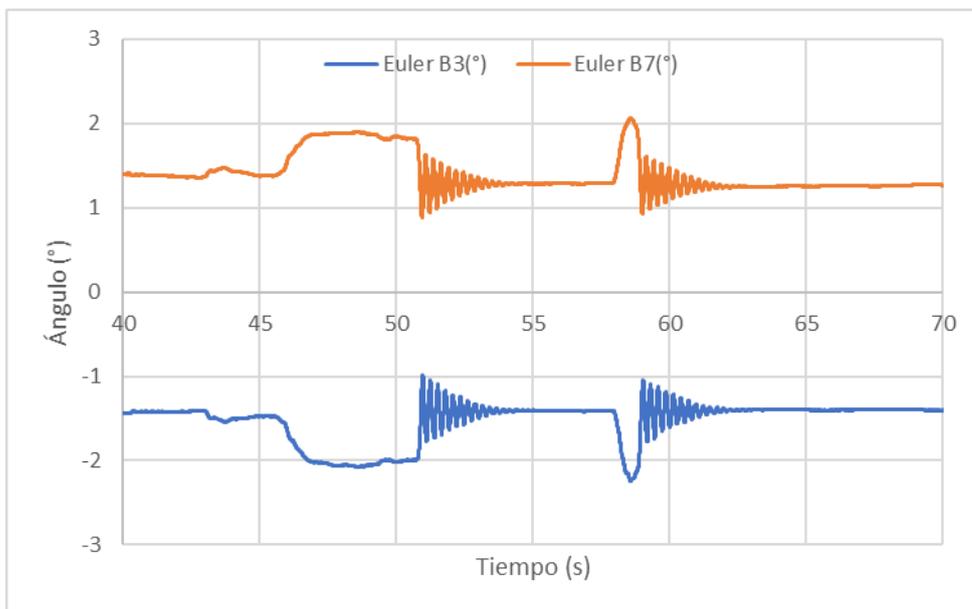


Figura 60. Representación tramo 3 ángulos de Euler.

A continuación, en la Figura 61, se muestra el tramo 4 que abarca desde 70 hasta 80 s. En este tramo se coloca la primera masa de 3 kg en el punto central de la viga, por lo que los dos ángulos aumentan al mismo tiempo.

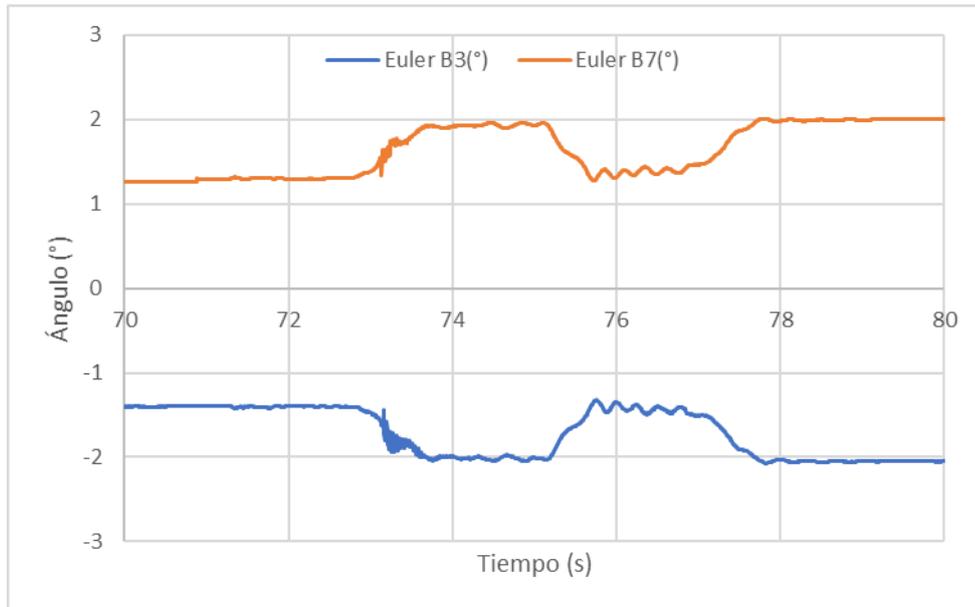


Figura 61. Representación tramo 4 ángulos de Euler.

El ángulo registrado por el sensor situado en el apoyo izquierdo, Xsens B7 sufre el incremento mostrado en la ecuación (68):

$$\Delta\varphi = 2,1034 - 1,2643 = 0,8391^\circ \quad (68)$$

El ángulo registrado por el sensor situado en el apoyo derecho, Xsens B3, sufre un incremento el cual se calcula en la ecuación (69):

$$\Delta\varphi = -2,0516 - (-1,4127) = -0,6389^\circ \quad (69)$$

El tramo 5, mostrado en la Figura 62, comprende desde 80 hasta 105 s. En este tramo se ve el segundo par de oscilaciones.

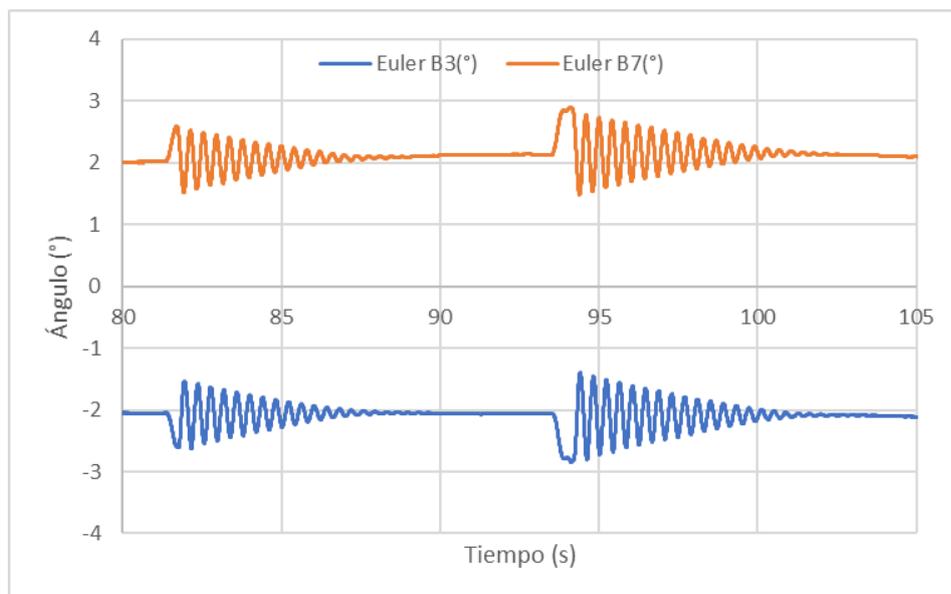


Figura 62. Representación tramo 5 ángulos de Euler.



En este caso hay una masa en el centro de la viga, con el ajuste realizado en Excel se han obtenido los parámetros mostrados en la Tabla 9. En dicha tabla, la plantilla 5L se sitúa en el centro de la viga, el sensor Xsens B7 en el extremo izquierdo y el sensor Xsens B3 en el extremo derecho.

PARÁMTEROS DE LA ONDA	Primera onda			Segunda onda		
	5L	B7	B3	5L	B7	B3
Amplitud	12,45 N	0,54 °	0,57 °	15,65 N	0,63 °	0,67 °
Frecuencia (Hz)	2,4443	2,4423	2,4413	2,4447	2,4419	2,4417
Amortiguamiento (%)	0,0191	0,0195	0,0193	0,0203	0,0197	0,0201
Desfase (rad)	3,7356	3,7744	0,6844	0,7820	0,7872	3,9769

Tabla 9. Parámetros comprobación giros caso 2.

En esta tabla se puede ver que tanto las frecuencias como el amortiguamiento son prácticamente iguales para todos los ajustes tanto en la primera como en la segunda onda. El desfase de los sensores Xsens no será igual, debido a que ambos extremos giran el mismo ángulo en sentidos contrarios. El extremo izquierdo girará en "sentido horario" y el extremo derecho en "sentido anti horario". La diferencia entre los desfases de los sensores Xsens situados en los extremos será de 180° , lo que es lo mismo a π radianes.

A continuación, se va a comprobar que los desfases de los sensores se diferencian en pi radianes y se van a calcular sus respectivos errores.

En el caso de la primera oscilación el desfase del sensor B3 es de 0,6844 rad, se le suma pi radianes y se obtiene 3,8259 rad, ecuación (70):

$$\text{Desfase (B7)} = 0,6844 + \pi = 3,8259 \text{ rad} \quad (70)$$

A continuación, en las ecuaciones (71) y (72) se calcula el error entre el valor obtenido en la ecuación (70) y el desfase del sensor B7.

$$\text{Error absoluto} = |3,7744 - 3,8259| = 0,0515 \text{ rad} \quad (71)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,0515}{3,8259} \cdot 100 = 1,35 \% \quad (72)$$

Para la segunda oscilación se suma pi rad al desfase del sensor B7 y se obtiene 3,9288 rad, ecuación (73):

$$\text{Desfase (B3)} = 0,7872 + \pi = 3,9288 \text{ rad} \quad (73)$$

En las ecuaciones (74) y (75) se calcula el error cometido en la segunda oscilación.

$$\text{Error absoluto} = |3,9769 - 3,9288| = 0,0481 \text{ rad} \quad (74)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,0481}{3,9288} \cdot 100 = 1,22 \% \quad (75)$$

El tramo 6, mostrado en la Figura 63, abarca desde 105 hasta 110 s. En este periodo de tiempo se coloca la segunda masa en el centro de la viga, con lo que ambos ángulos vuelven a aumentar.

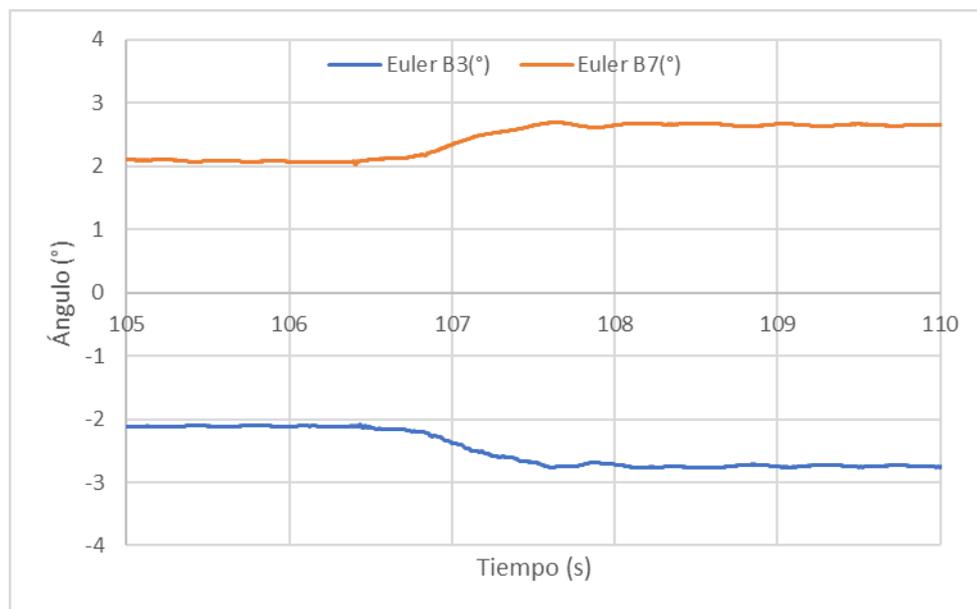


Figura 63. Representación tramo 6 ángulos de Euler.

El incremento registrado por el sensor situado en el extremo izquierdo, Xsens B7, es el mostrado en la ecuación (76):

$$\Delta\varphi = 2,6509 - 2,1034 = 0,5475^\circ \quad (76)$$

El incremento registrado por el sensor situado en el apoyo derecho, Xsens B3, es de:

$$\Delta\varphi = -2,7488 - (-2,0516) = -0,6972^\circ \quad (77)$$

Este último tramo, mostrado en la Figura 64, comprende desde los 110 s hasta el final del ensayo. En este periodo de tiempo se pueden observar las dos últimas oscilaciones del ensayo.

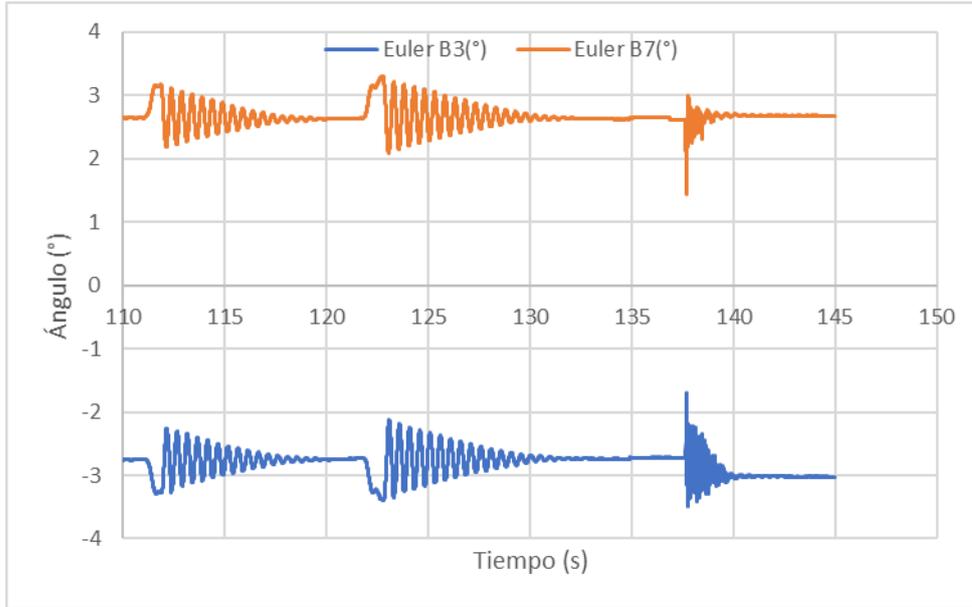


Figura 64. Representación tramo 7 ángulos de Euler.

Para el último caso, en el que se sitúan dos masas en el centro de la viga, se han obtenido los parámetros mostrados en la Tabla 10. La plantilla 5L se sitúa en el centro de la viga, el sensor Xsens B7 en el extremo izquierdo y el sensor Xsens B3 en el extremo derecho.

PARÁMTEROS DE LA ONDA	Primera onda			Segunda onda		
	5L	B7	B3	5L	B7	B3
Amplitud	14,10 N	0,46 °	0,49 °	17,42 N	0,58 °	0,62 °
Frecuencia (Hz)	1,9829	1,9931	1,9907	1,9887	1,9909	12,4958
Amortiguamiento (%)	0,0154	0,0177	0,0184	0,0121	0,0138	0,0145
Desfase (rad)	0,2215	0,1699	3,3603	3,4701	3,5092	0,4175

Tabla 10. Parámetros comprobación giros caso 3.

Al igual que en el caso anterior, tanto las frecuencias como el amortiguamiento son prácticamente iguales para todos los ajustes tanto en la primera como en la segunda onda. El desfase de los sensores Xsens no será igual, debido a que ambos extremos giran el mismo ángulo en sentidos contrarios. El extremo izquierdo girará en “sentido horario” y el extremo derecho en “sentido anti horario”. La diferencia entre los desfases de los sensores Xsens situados en los extremos será de 180°, lo que es lo mismo a pi radianes.

Al igual que en el tramo 5, se va a comprobar que la diferencia entre los desfases es de pi radianes. En la primera oscilación al desfase del sensor B7 se le suma pi rad y se obtiene lo mostrado en la ecuación (78):

$$\text{Desfase B3} = 0,1699 + \pi = 3,3115 \text{ rad} \quad (78)$$



A continuación, en las ecuaciones (79) y (80) se calcula el error del desfase en la primera oscilación.

$$Error\ absoluto = |3,3603 - 3,3115| = 0,0488\ rad \quad (79)$$

$$Error\ relativo = \frac{0,0488}{3,3115} \cdot 100 = 1,47\ \% \quad (80)$$

En el caso de la segunda oscilación, al desfase del sensor B3 se le suma pi rad, ecuación (81):

$$Desfase\ B7 = 0,4175 + \pi = 3,5591\ rad \quad (81)$$

En las ecuaciones (82) y (83) se calcula el error cometido en la segunda oscilación.

$$Error\ absoluto = |3,5092 - 3,5591| = 0,0499\ rad \quad (82)$$

$$Error\ relativo = \frac{0,0499}{3,5591} \cdot 100 = 1,40\ \% \quad (83)$$

A continuación, se van a calcular los errores entre los incrementos de giros calculados con la fórmula obtenida del prontuario y los obtenidos con “Sigview” de los datos registrados con los sensores Xsens DOT. En la Tabla 11 se resumen los incrementos de ángulos para ambos extremos de la viga obtenidos de los datos registrados con los sensores:

	Δ tramo 1 y 2	Δ tramo 4	Δ tramo 6
Xsens B7	2,9667 °	0,8391 °	0,5475 °
Xsens B3	1,2237 °	0,6389 °	0,6972 °
Valor medio	2,0952 °	0,739 °	0,6223 °

Tabla 11. Incrementos experimentales ángulos de Euler.

A continuación, en las ecuaciones (84) y (85), se calculan los errores de los giros del tramo 1 y 2, el caso en el que se coloca la viga encima de los apoyos, hay un error absoluto y relativo de:

$$Error\ absoluto = |2,0952 - 2,2914| = 0,1962\ ° \quad (84)$$

$$Error\ relativo = \frac{0,1962}{2,2914} \cdot 100 = 8,56\ \% \quad (85)$$



En el tramo 4, debido a colocar la primera masa de 3 kg en el punto central de la viga, se produce un error de:

$$\text{Error absoluto} = |0,739 - 0,7301| = 0,0089^\circ \quad (86)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,0089}{0,7301} \cdot 100 = 1,22\% \quad (87)$$

En el tramo 6, el caso en el que se coloca la segunda masa de 3 kg en el punto central de la viga, hay un error de:

$$\text{Error absoluto} = |0,6223 - 0,6922| = 0,0699^\circ \quad (88)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,0699}{0,6922} \cdot 100 = 10,09\% \quad (89)$$

En este apartado, se puede observar que los errores producidos en el ajuste de los desfases de ambos sensores son muy pequeños, en todos los casos oscila en torno al 1%. En cambio, los errores de los incrementos de ángulos producidos debido al peso de las distintas masas situadas en el centro de la viga y por el peso de la propia viga son más grandes. Como ya se comentó en el apartado 4.2, el fabricante de los sensores Xsens DOT avisa de que pueden cometer un error de hasta el 10%. A diferencia del apartado 4.1 en el que ese error se alcanzó en varias ocasiones, en este apartado solo se ha alcanzado en la ecuación (89).

CAPÍTULO 5. Resultados

El objetivo de este capítulo es comentar los resultados del estudio, tanto analíticos como experimentales.

5.1 Resultados analíticos

En el ensayo, solo se ha excitado un modo de vibración, por lo que se va a identificar la frecuencia del modo que se excita, para todos los escenarios se tendrá $i = 1$.

Las fórmulas que se van a utilizar a continuación son para una viga biapoyada, cuyos extremos deben estar situados justo en los apoyos. En los ensayos realizados, no se han colocado los extremos de la viga justo en los apoyos, por lo que se va a considerar como longitud total de la viga la longitud entre los apoyos.

Como se puede ver en la Figura 66, la viga tiene una longitud total de 6,01 m. La cinta adhesiva negra situada a ambos extremos de la viga, marca el punto donde se colocaron los apoyos durante el ensayo. Se puede ver, en las Figuras 65 y 66 que ambos apoyos se colocaron a 1,5 cm de los extremos. Con todo esto, se tomará como longitud entre los apoyos, 5,98 m.



Figura 65. Medida extremo inicial de la viga.



Figura 66. Medida extremo final de la viga.

A continuación, se va a calcular analíticamente la frecuencia para cada caso de estudio y posteriormente se calculan los errores producidos con las frecuencias obtenidas en el ensayo.



CASO 1

En el primer caso del ensayo no habrá ninguna masa en el centro de la viga, por lo que usamos la fórmula descrita en la ecuación (90).

$$f_1 = \frac{1^2 \pi}{2L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho}} \quad (90)$$

Se obtiene una frecuencia de 3,6188 Hz, la cual es muy parecida a la media obtenida en Excel del ajuste de los datos registrados por los sensores Xsens DOT y plantillas Loadsol, que es de 3,6228 Hz. A continuación, se calcula el error entre ambas frecuencias:

$$\text{Error absoluto} = |3,6228 - 3,6188| = 0,004 \text{ Hz} \quad (91)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,004}{3,6188} \cdot 100 = 0,11 \% \quad (92)$$

CASO 2

En el segundo caso, hemos introducido una masa de tres kilogramos en el punto central de la viga, por lo que M_i será igual a 3 kg, y utilizaremos la fórmula de la ecuación (93), obteniendo una frecuencia de 2,4581 Hz.

$$f = \frac{2}{\pi} \left(\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3 \cdot (M_i + 0,4857 \cdot m_b)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (93)$$

En las ecuaciones (94) y (95) se calcula el error entre esta y la media obtenida en Excel del ajuste de los datos registrados por todos los sensores, que es de 2,4426 Hz.

$$\text{Error absoluto} = |2,4426 - 2,4581| = 0,0155 \text{ Hz} \quad (94)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,0155}{2,4581} \cdot 100 = 0,63 \% \quad (95)$$

CASO 3

En el último caso hemos introducido otra masa de tres kilogramos en el centro, con lo que tendríamos una M_i de 6 kg.

Utilizando la misma fórmula que en el segundo caso se obtiene una frecuencia de 1,9789 Hz, la cual es muy parecida a la media obtenida en Excel del ajuste de los datos registrados por todos los sensores, que es de 1,9892 Hz. A continuación, en las ecuaciones (96) y (97) se calcula el error entre ambas frecuencias.

$$\text{Error absoluto} = |1,9892 - 1,9789| = 0,0103 \text{ Hz} \quad (96)$$

$$\text{Error relativo} = \frac{0,0103}{1,9789} \cdot 100 = 0,52 \% \quad (97)$$

5.2 Resultados experimentales

En este apartado se van a comentar los parámetros de las oscilaciones obtenidos con Excel para cada caso, a través del ajuste con “Sigview” para obtener las frecuencias y después con “Solver”.

CASO 1

En el primer caso no habrá ninguna masa en el centro de la viga, por lo que se ajustará la fuerza registrada por las plantillas situadas en los extremos de la viga, la aceleración registrada en el punto central de la viga y los giros en los extremos. Se ajustan tanto la primera como la segunda oscilación del caso, en la Figura 67 se muestra un croquis en el que se puede ver la posición que ocupa cada sensor.

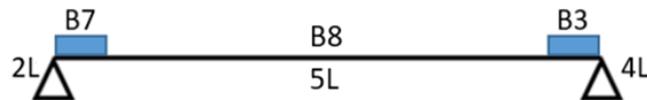


Figura 67. Croquis caso 1.

A continuación, se muestran dos tablas con los parámetros ajustados de ambas oscilaciones.

	2L	4L	Ac. B8	Giro B7	Giro B3
Amplitud	13,16 N	11,02 N	6,83 m/s ²	0,43 °	0,46 °
Frecuencia (Hz)	3,6374	3,6275	3,6267	3,6253	3,6272
Amortiguamiento (%)	0,0336	0,0297	0,0275	0,0319	0,0319
Desfase (rad)	1,9831	1,8749	1,6443	1,5573	4,7590

Tabla 122. Ajuste parámetros caso 1 primera oscilación.

	2L	4L	Ac. B8	Giro B7	Giro B3
Amplitud	11,82 N	9,99 N	6,43 m/s ²	0,37 °	0,39 °
Frecuencia (Hz)	3,6272	3,5903	3,6176	3,6144	3,6346
Amortiguamiento (%)	0,0316	0,0321	0,0292	0,0304	0,0296
Desfase (rad)	10,6043	10,6083	10,2629	3,9128	0,7168

Tabla 133. Ajuste parámetros caso 1 segunda oscilación.

A continuación, se van a mostrar las gráficas de los ajustes de los parámetros de la segunda oscilación.

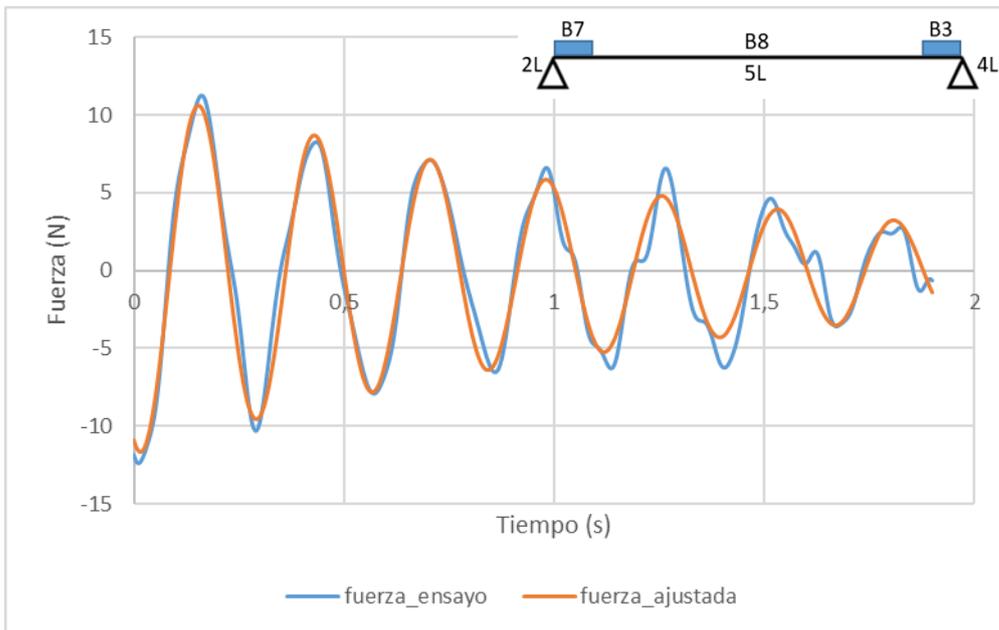


Figura 68. Ajuste fuerza plantilla 2L, caso1, segunda oscilación.

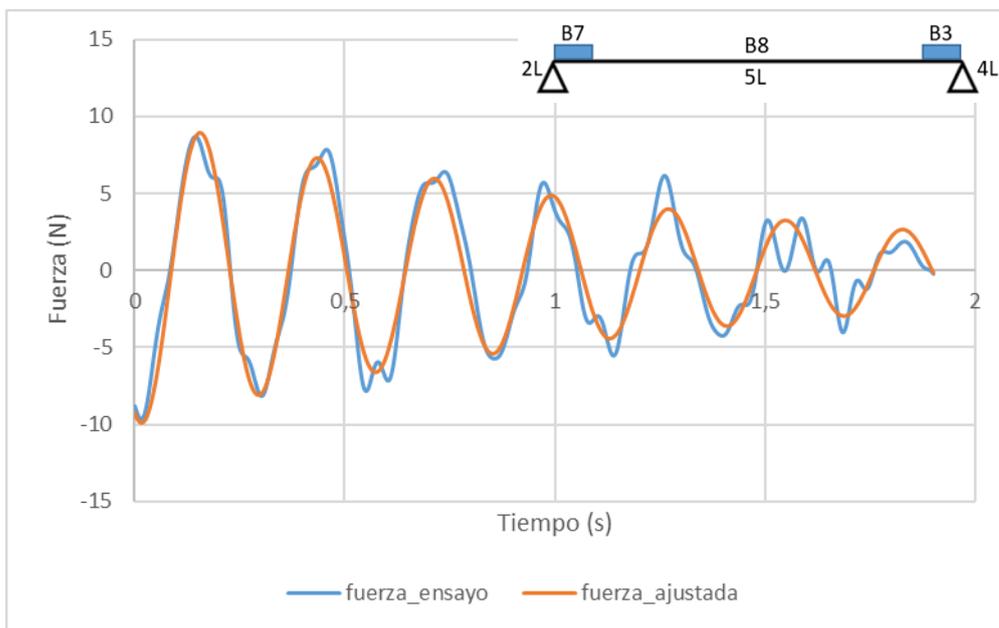


Figura 69. Ajuste fuerza plantilla 4L, caso 1, segunda oscilación.

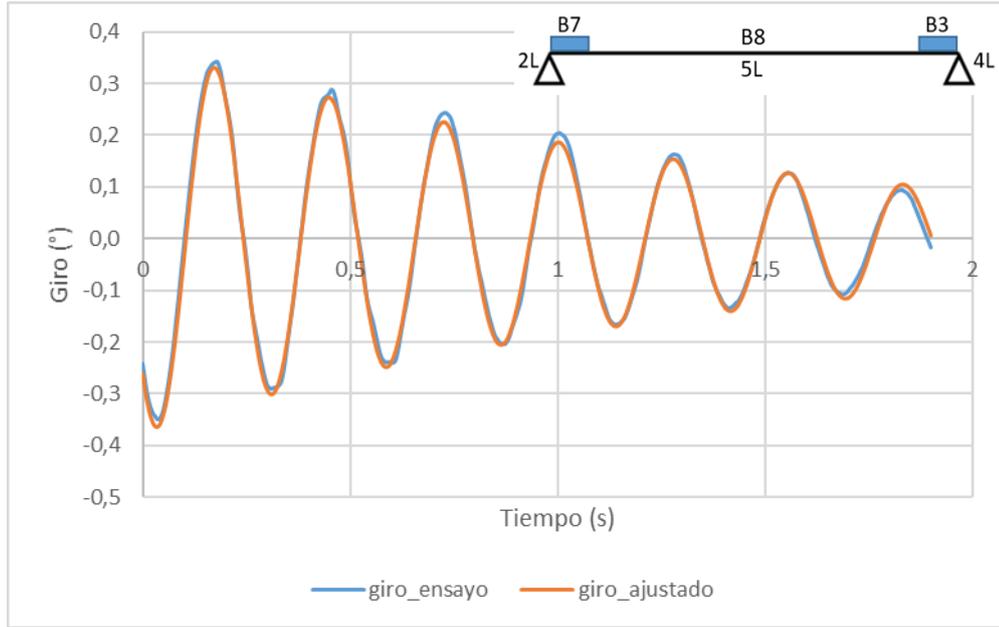


Figura 70. Ajuste giro B7, caso 1, segunda oscilación.

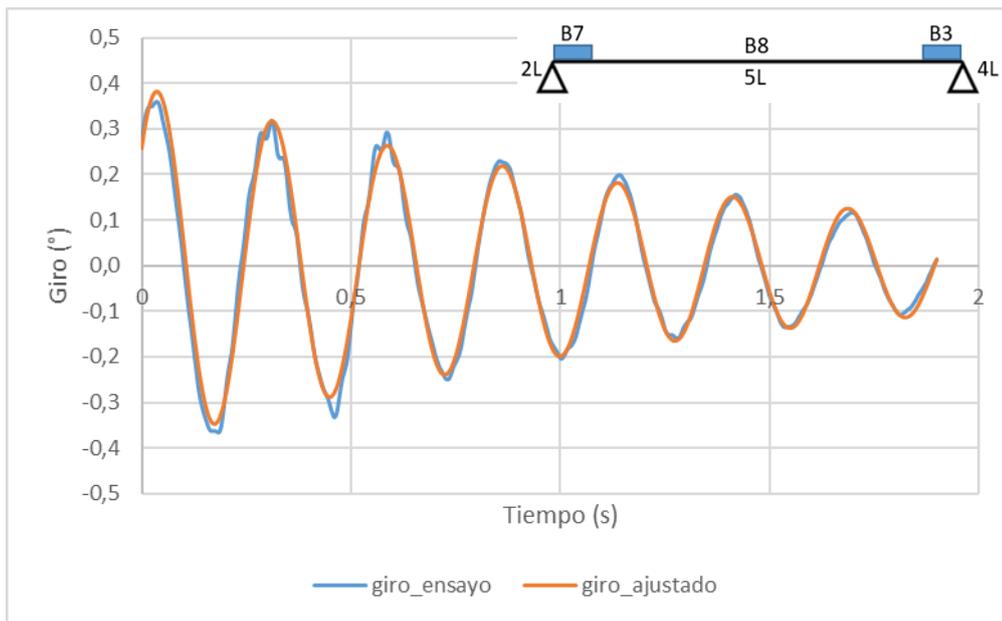


Figura 71. Ajuste giro B3, caso 1, segunda oscilación.

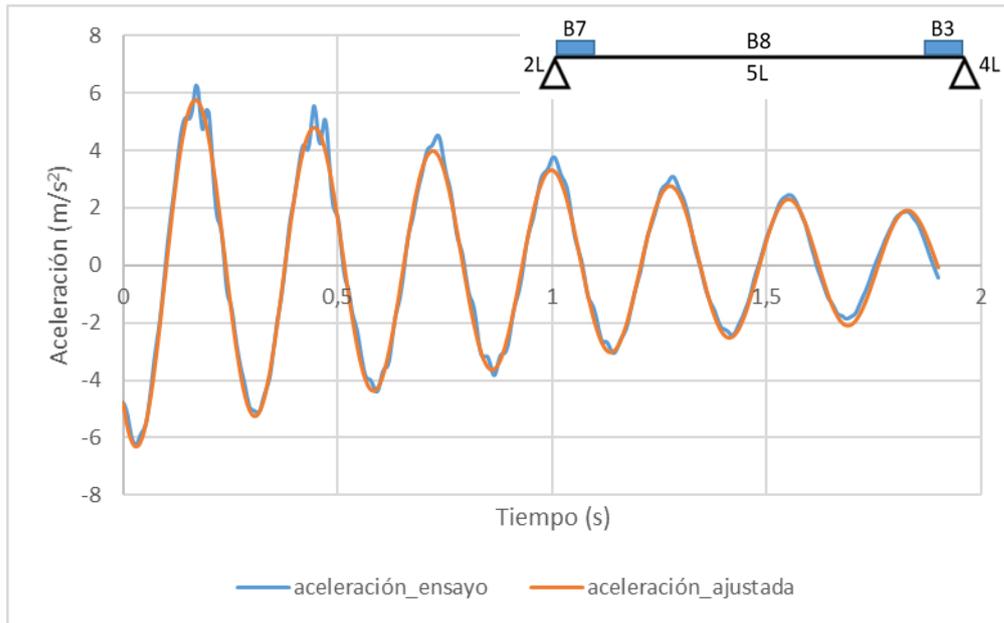


Figura 72. Ajuste aceleración eje Z, caso 1, segunda oscilación.

Con todos los ajustes realizados, se van a mostrar a continuación algunas gráficas más, comparando estos ajustes.

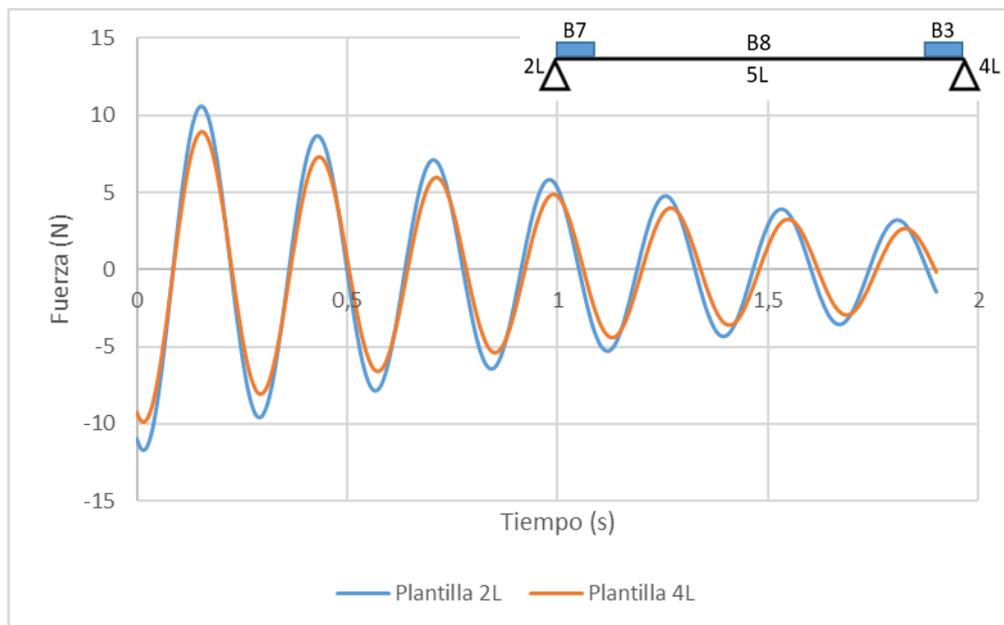


Figura 73. Representación ajustes plantillas de los extremos, caso 1.

En esta gráfica se puede ver que el ajuste de ambas plantillas es similar salvo porque la amplitud de la plantilla 4L es menor que la de la plantilla 2L, pero ambos ajustes están en fase.

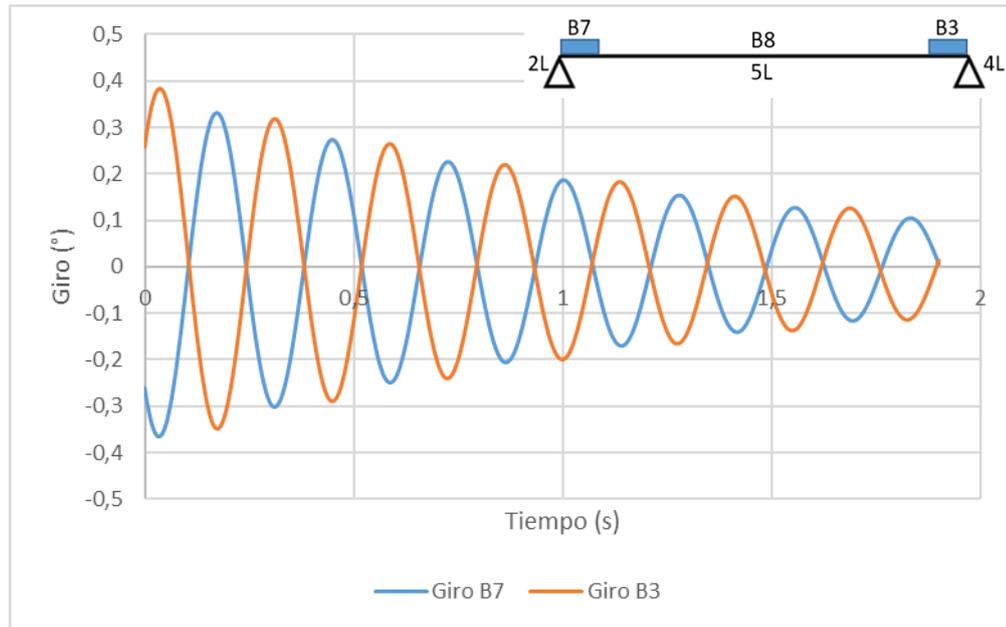


Figura 74. Representación ajustes giros de los extremos caso 1.

Tal como se comprobó en el apartado 4.3, en la Figura 74 se ve que ambos giros están desfasados 180° , los dos ajustes son iguales, pero tienen signos contrarios. Ya que un sensor gira en “sentido horario” y el otro en “sentido anti horario”.

CASO 2

En este segundo caso, se ha introducido una masa de 3 kg en el punto central de la viga. Se ajustará la fuerza registrada por las tres plantillas, las dos de los extremos y la del centro. También se ajustará la aceleración registrada en el punto central de la viga y los giros en los extremos. Se ajustan tanto la primera como la segunda oscilación del caso, en la Figura 75 se muestra el croquis en el que se ve la posición que ocupa cada sensor y la masa situada en el centro de la viga.



Figura 75. Croquis caso 2.

A continuación, se muestran dos tablas con los parámetros ajustados de ambas oscilaciones.

	2L	5L	4L	Ac. B8	Giro B7	Giro B3
Amplitud	15,01 N	12,45 N	13,59 N	4,41 m/s ²	0,54 °	0,57 °
Frecuencia (Hz)	2,4405	2,4443	2,4416	2,4429	2,4423	2,4413
Amortiguamiento (%)	0,0192	0,0191	0,0196	0,0188	0,0195	0,0193
Desfase (rad)	4,0411	3,7356	3,9669	3,8218	3,7744	0,6844

Tabla 144. Ajuste parámetros caso 2 primera oscilación.

	2L	5L	4L	Ac. B8	Giro B7	Giro B3
Amplitud	18,02 N	15,65 N	15,45 N	5,15 m/s ²	0,63 °	0,67 °
Frecuencia (Hz)	2,4440	2,4447	2,4418	2,4436	2,4419	2,4416
Amortiguamiento (%)	0,0205	0,0203	0,0195	0,0195	0,0197	0,0200
Desfase (rad)	1,0008	0,7820	1,0109	0,8247	0,7872	3,9769

Tabla 155. Ajuste parámetros caso 2 segunda oscilación.

A continuación, se van a mostrar las gráficas de los ajustes de los parámetros de la primera oscilación.

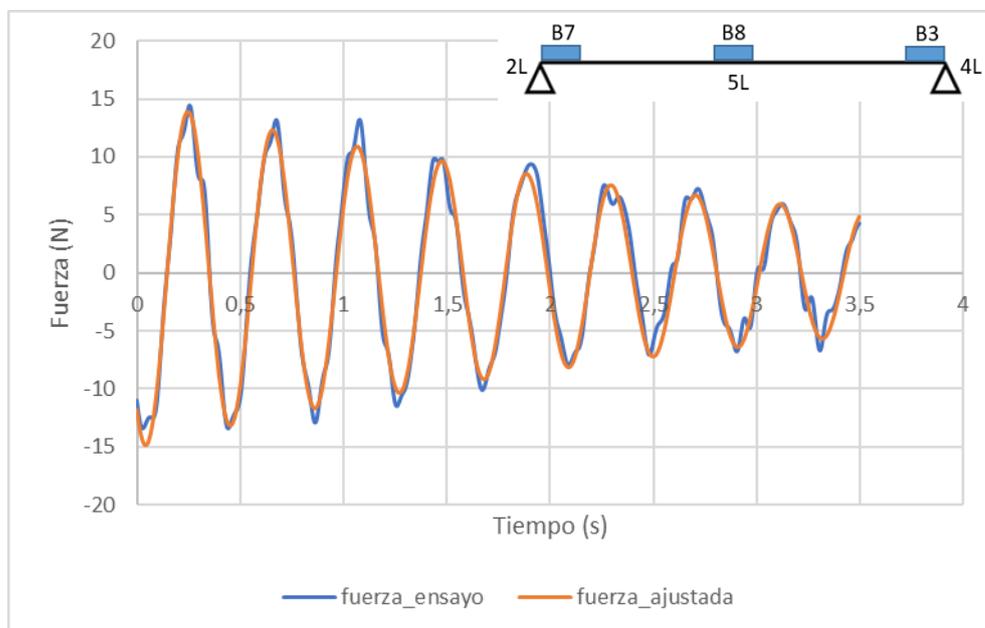


Figura 76. Ajuste fuerza plantilla 2L, caso 2, primera oscilación.

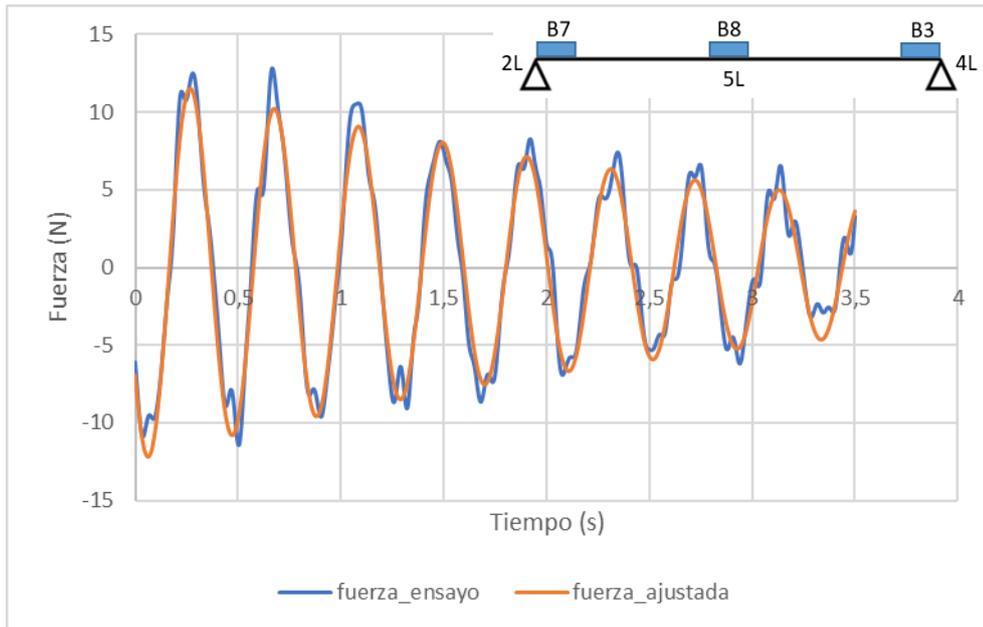


Figura 77. Ajuste fuerza plantilla 5L, caso 2, primera oscilación.

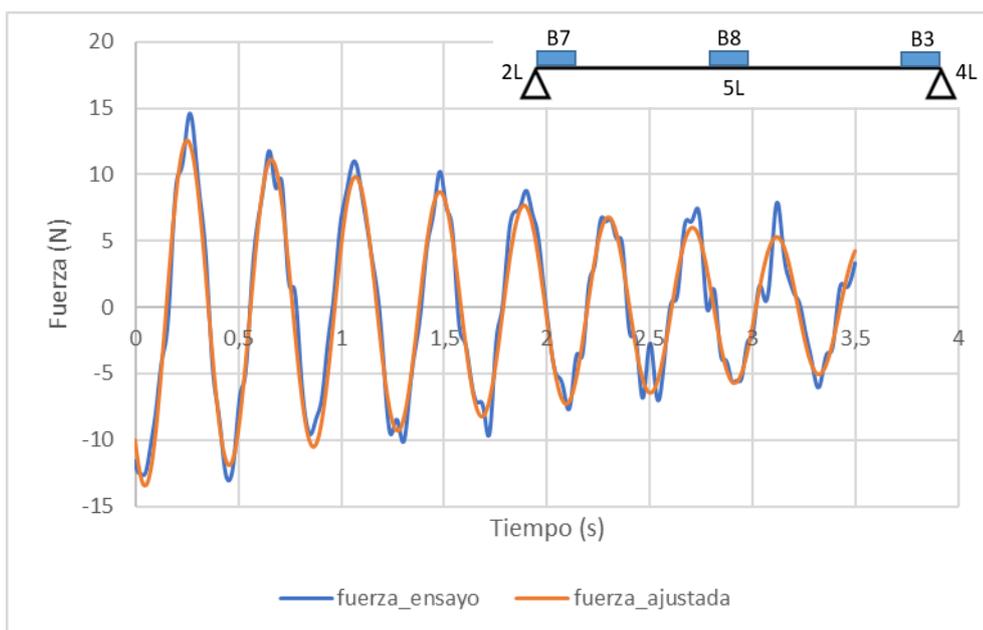


Figura 78. Ajuste fuerza plantilla 4L, caso 2, primera oscilación.

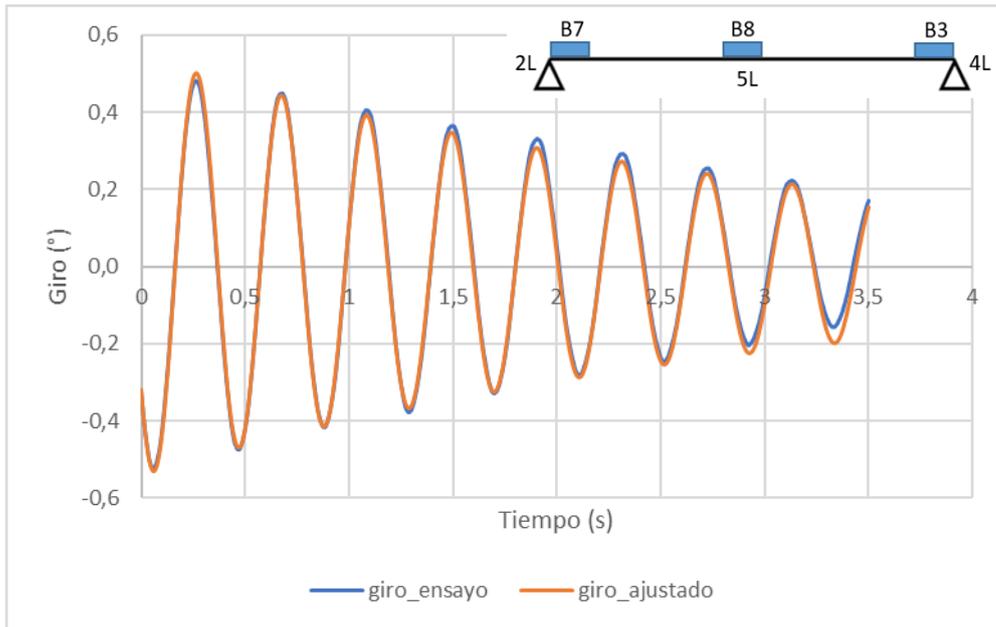


Figura 79. Ajuste giro B7, caso 2, primera oscilación.

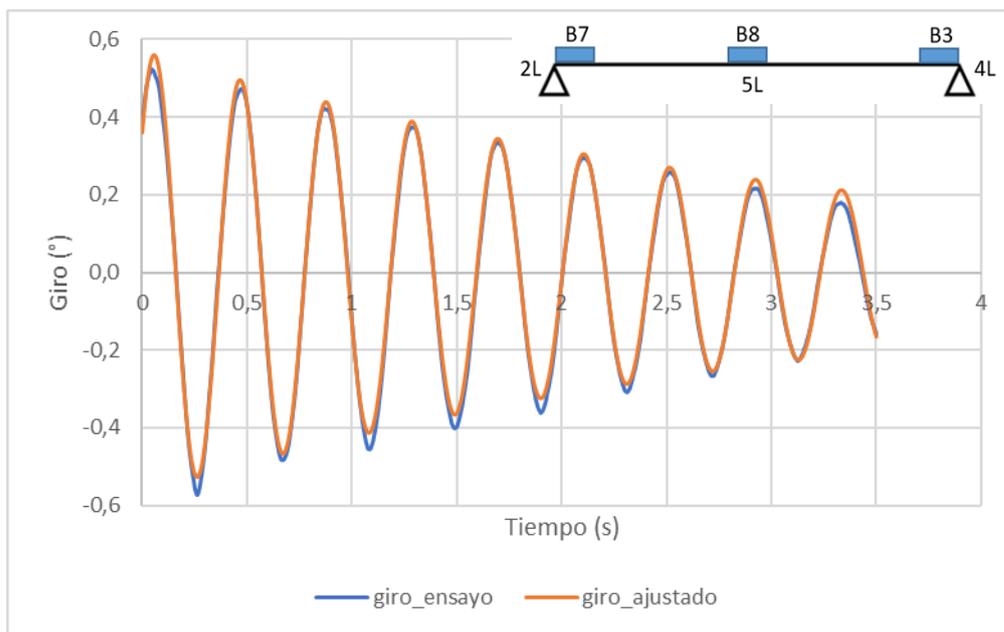


Figura 80. Ajuste giro B3, caso 2, primera oscilación.

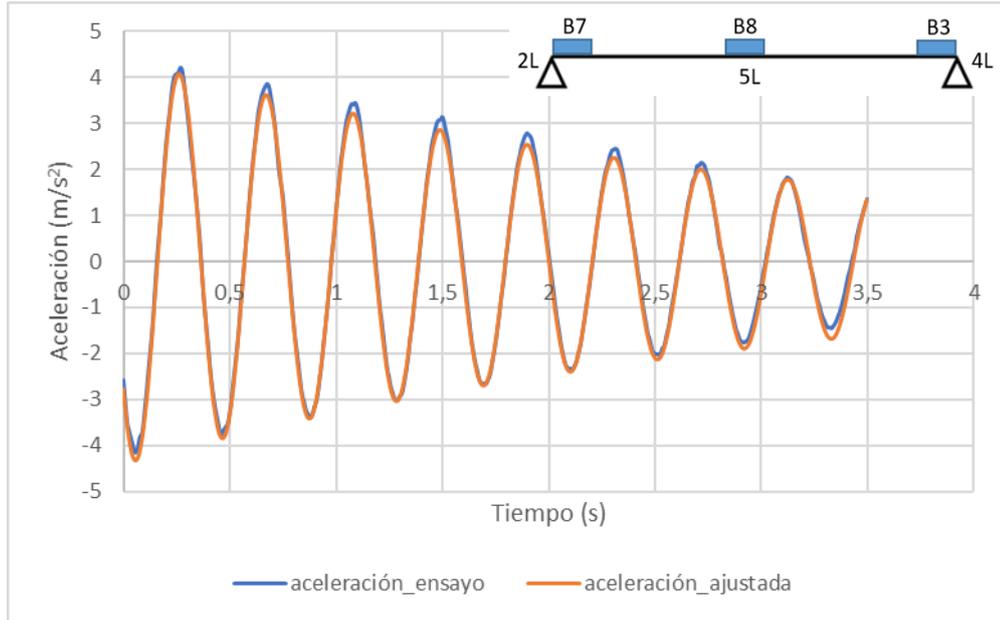


Figura 81. Ajuste aceleración eje Z, caso 2, primera oscilación.

A continuación, se van a comentar algunas gráficas obtenidas con los ajustes realizados:

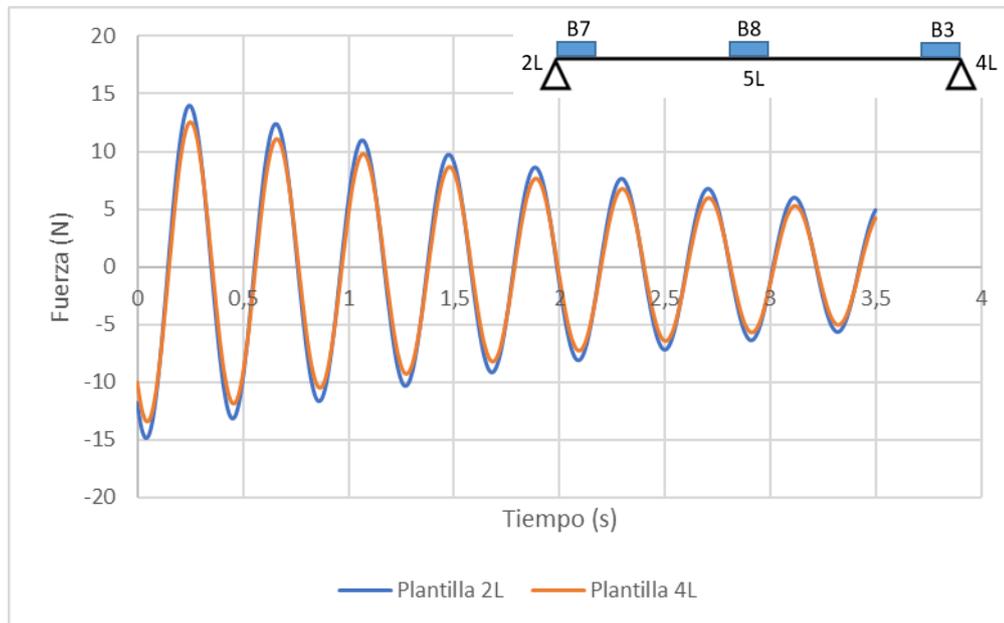


Figura 82. Representación ajustes plantillas de los extremos caso 2.

En esta gráfica se representan los datos de la plantilla derecha (4L), y de la izquierda (2L). Podemos observar que la amplitud de la plantilla izquierda es ligeramente mayor que la de la derecha, pero ambas plantillas están en fase.

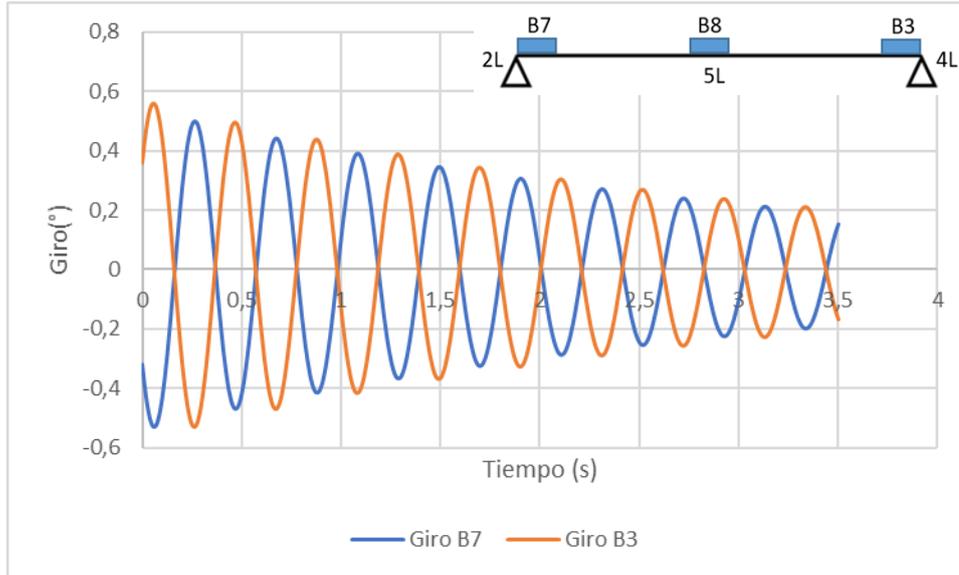


Figura 83. Representación ajustes giros en los extremos caso 2.

En esta gráfica se han representado los giros de los apoyos, que están desfasados π radianes y tienen los mismos valores, pero con signos contrarios ya que los sentidos de giros de los sensores son contrarios.

CASO 3

En el último caso hemos introducido otra masa de 3 kg en el centro, con lo que tendríamos un total de 6 kg en el centro de la viga. Se ajustará la fuerza registrada por las tres plantillas, las dos de los extremos y la del centro. También se ajustará la aceleración registrada en el punto central de la viga y los giros en los extremos. Se ajustan tanto la primera como la segunda oscilación del caso, en la Figura 84 se muestra el croquis en el que se ve la posición de cada sensor y las masas situadas en el punto central de la viga.

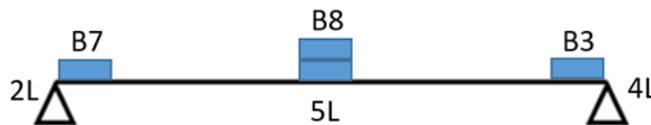


Figura 84. Croquis caso 3.

A continuación, se muestran dos tablas con los parámetros ajustados de ambas oscilaciones.

	2L	5L	4L	Ac. B8	Giro B7	Giro B3
Amplitud	12,00 N	14,10 N	11,20 N	2,53 m/s ²	0,46 °	0,49 °
Frecuencia (Hz)	1,9852	1,9829	1,9866	1,9926	1,9931	1,9907
Amortiguamiento (%)	0,0179	0,0154	0,0164	0,0174	0,0177	0,0184
Desfase (rad)	0,2643	0,2215	0,4097	0,2215	0,1699	3,3603

Tabla 166. Ajuste parámetros caso 3 primera oscilación.

	2L	5L	4L	Ac. B8	Giro B7	Giro B3
Amplitud	16,09 N	17,42 N	13,62 N	3,18 m/s ²	0,58 °	0,62 °
Frecuencia (Hz)	1,9835	1,9887	1,9975	1,9904	1,9909	1,9888
Amortiguamiento (%)	0,0177	0,0121	0,0099	0,0134	0,0138	0,0145
Desfase (rad)	3,6665	3,4701	3,6121	3,5503	3,5092	0,4175

Tabla 177. Ajuste parámetros caso 3 segunda oscilación.

A continuación, se van a mostrar las gráficas de los ajustes de los parámetros de la segunda oscilación.

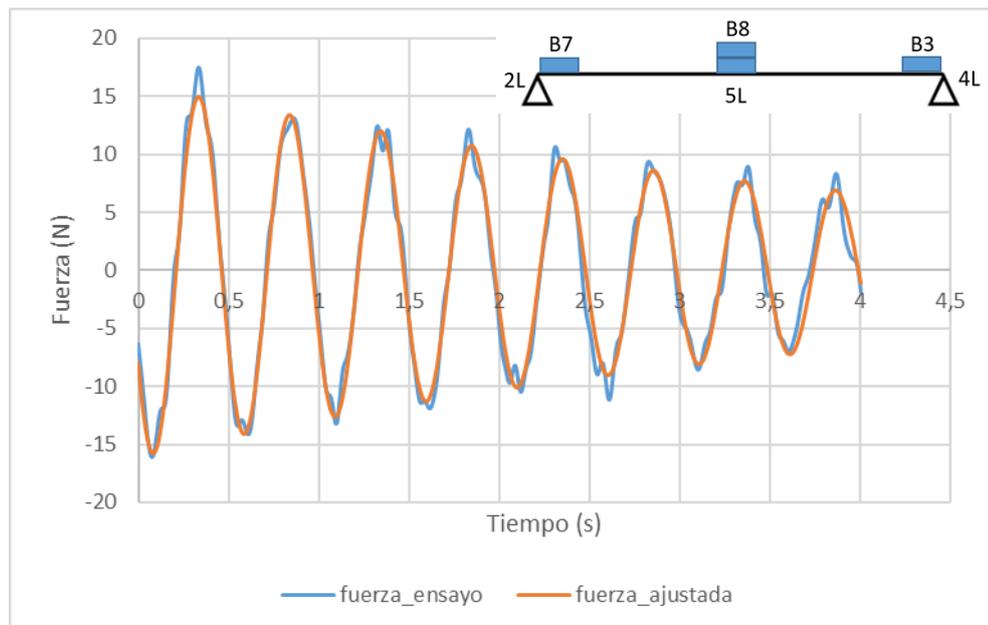


Figura 85. Ajuste fuerza plantilla 2L, caso 3, segunda oscilación

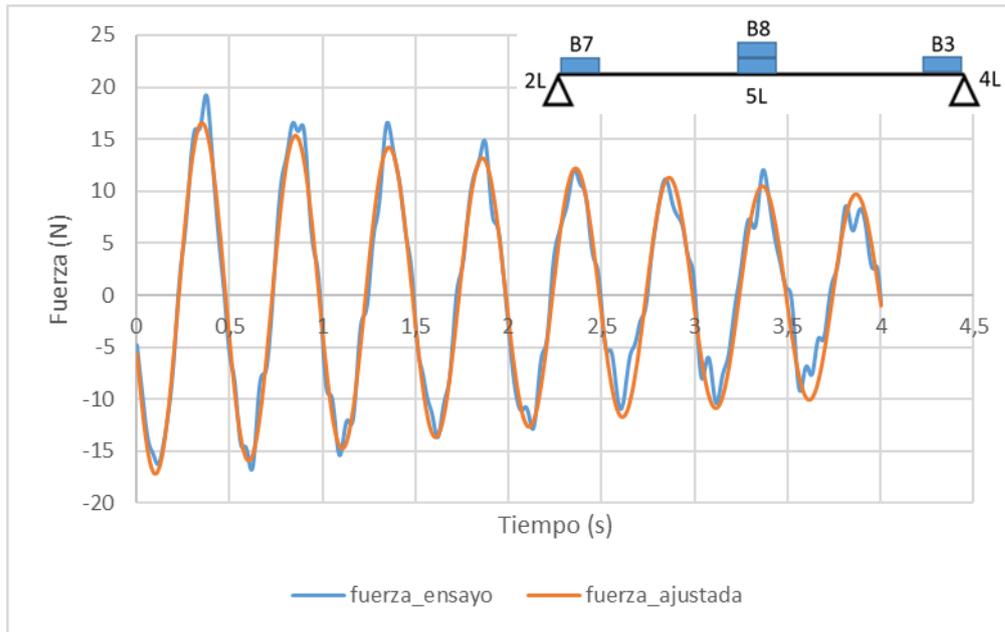


Figura 86. Ajuste fuerza plantilla 5L, caso 3, segunda oscilación.

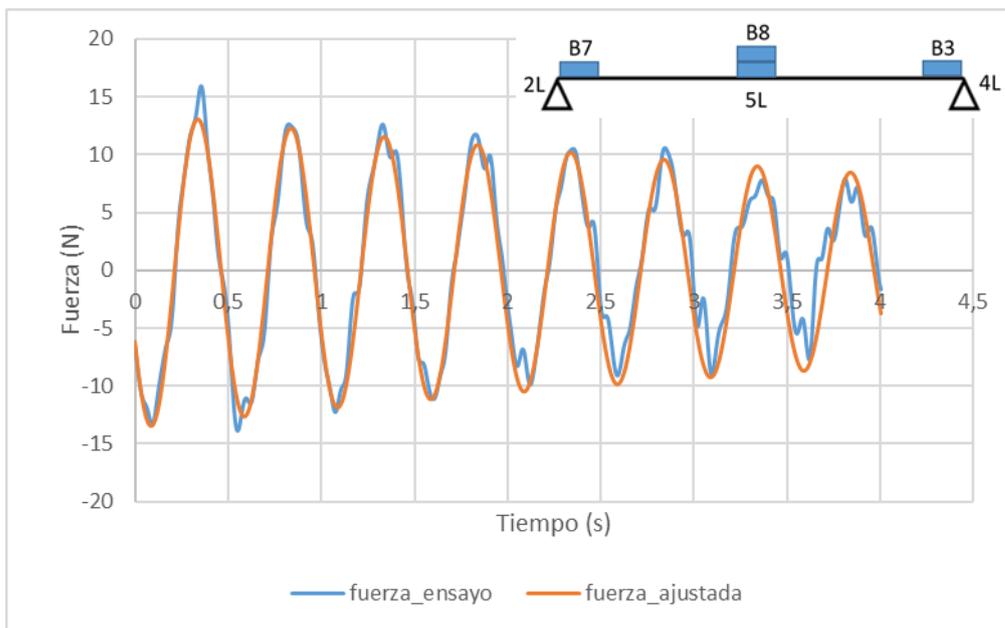


Figura 87. Ajuste fuerza plantilla 4L, caso 3, segunda oscilación.

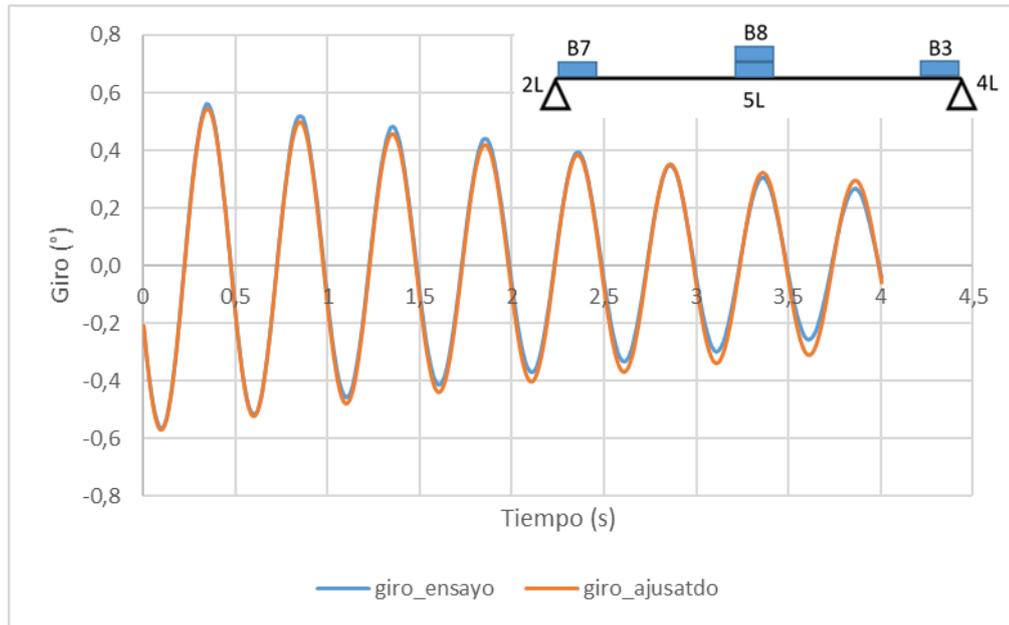


Figura 88. Ajuste giro B7, caso 3, segunda oscilación.

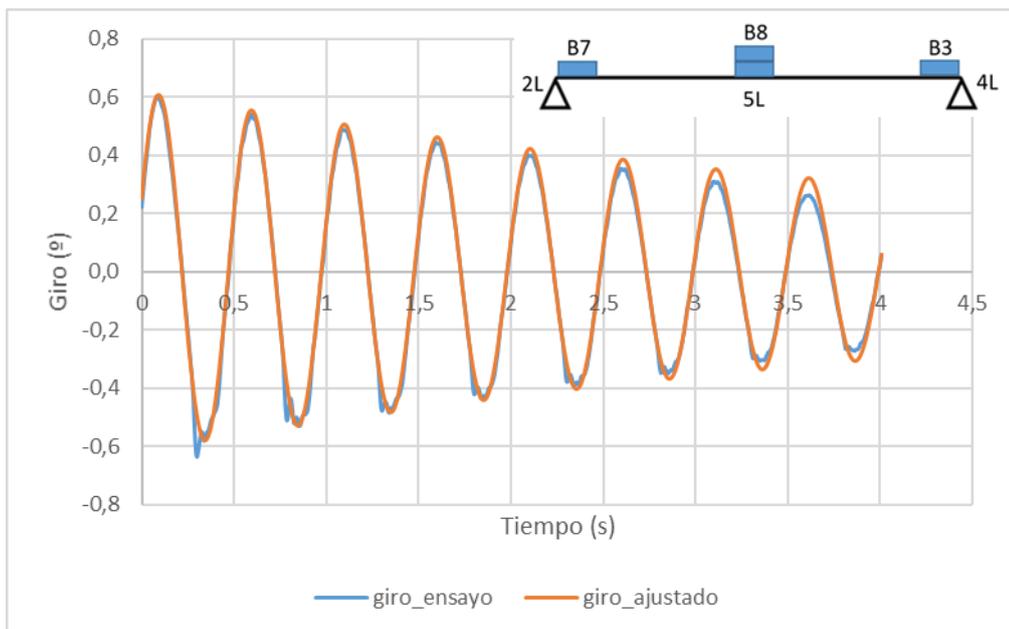


Figura 89. Ajuste giro B3, caso 3, segunda oscilación.

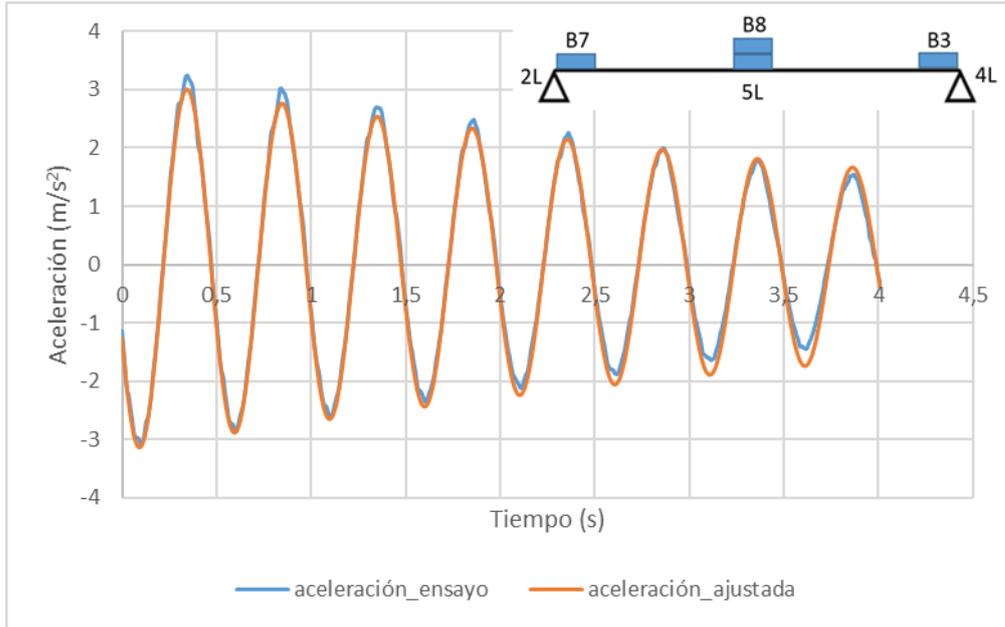


Figura 90. Ajuste aceleración eje Z, caso 3, segunda oscilación

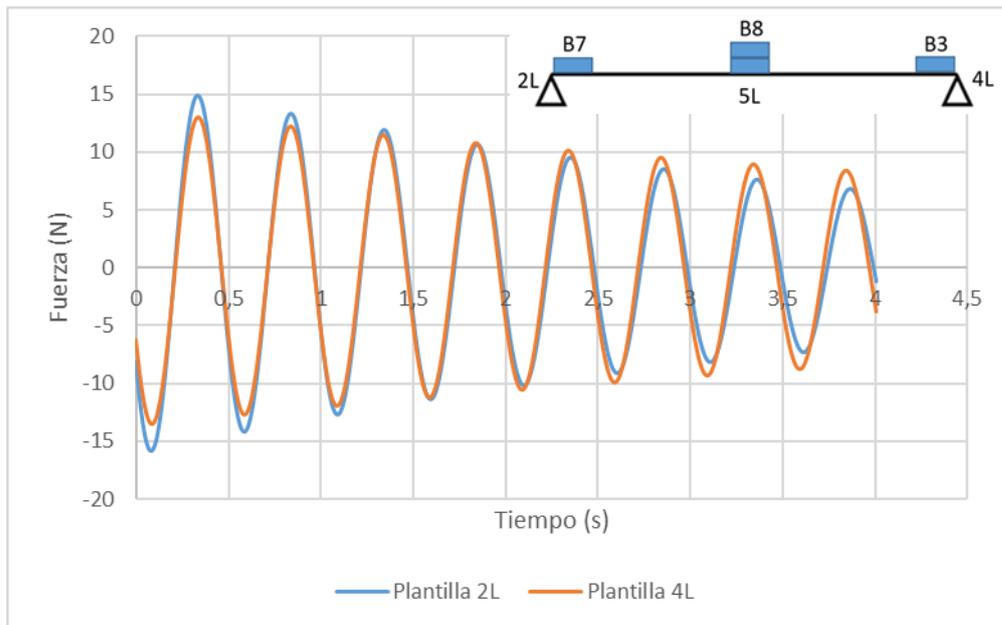


Figura 91. Representación ajuste plantillas de los extremos caso 3.

En este caso, al principio de la oscilación la amplitud de la plantilla 4L es menor que la de la plantilla 2L y al final de la oscilación es mayor. Se puede ver claramente que ambas plantillas están en fase.

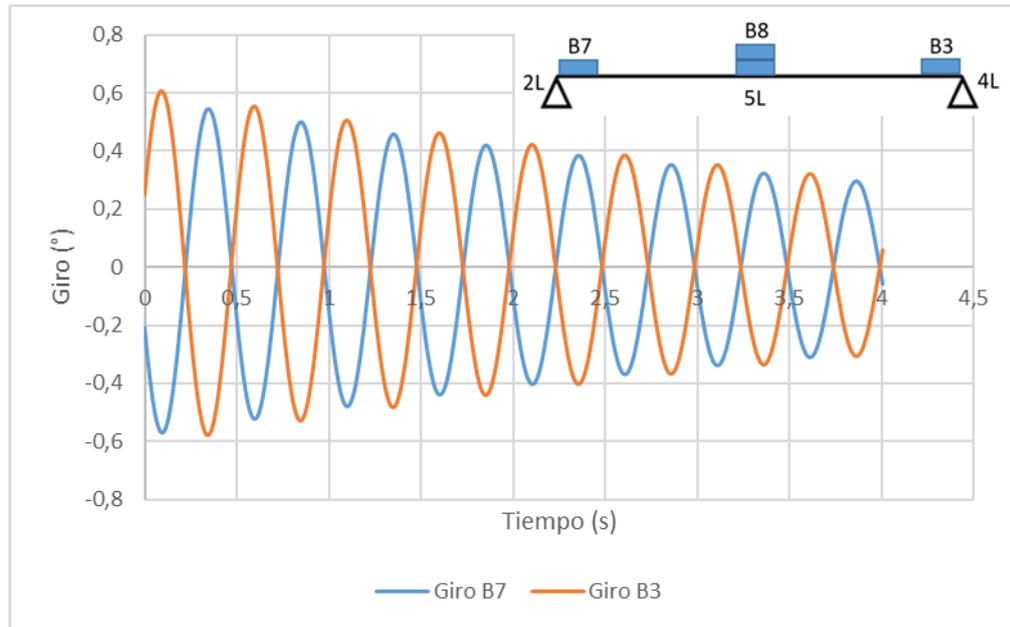


Figura 92. Representación ajuste giros en los extremos caso 3.

Al igual que en los dos primeros casos, ambos giros están desfasados 180° , por lo que ambos ajustes tienen los mismos valores, pero con signos contrarios.

A continuación, en la Figura 93, se va a representar los giros experimentales del sensor B7, y los giros calculados con la fórmula del prontuario, ecuación (61), introduciendo los datos de las fuerzas registradas por la plantilla 2L.

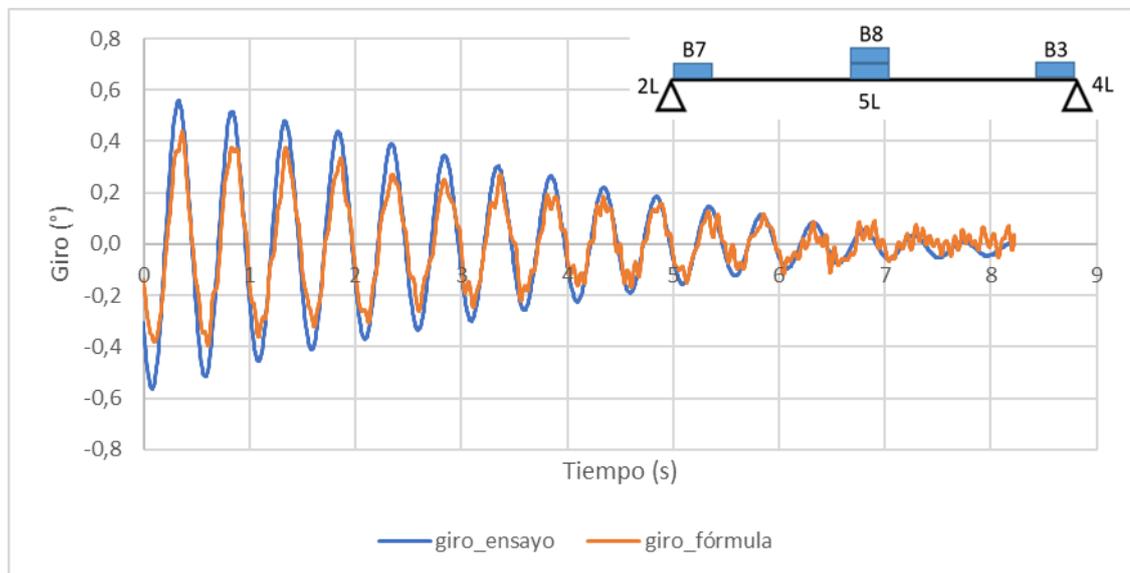


Figura 93. Comparación giros experimentales y giros obtenidos con fórmula del prontuario.

Con esto, se verifica que los datos registrados con ambos sensores son válidos. Se ve que ambos giros están en fase, y ambas curvas están muy próximas en la gráfica.



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación "vestible".*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



CAPÍTULO 6. Conclusiones y líneas futuras

6.1 Conclusiones

En el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha identificado el estudio dinámico de una viga biapoyada utilizando instrumentación “vestible”, una tecnología emergente que, aunque todavía se encuentra en evolución, ofrece ventajas considerables en términos de portabilidad y facilidad de uso. A lo largo de esta investigación se ha demostrado que la utilización de estos sensores portátiles es capaz de proporcionar datos valiosos para el análisis dinámico de estructuras, aunque no exento de limitaciones.

En el apartado 6.2 se establecerán posibles líneas futuras con la intención de dar continuidad a este TFG, destacando posibles escenarios en los que los sensores podrían llegar a ser más precisos.

En el apartado 6.3 se realizará un análisis del posible impacto ambiental de este trabajo, debido a los instrumentos utilizados para su desarrollo. Asimismo, se proponen medidas y recomendaciones para disminuir este impacto desde el punto de vista ambiental. También se realizará un análisis del coste asociado al trabajo realizado.

El principal objetivo de este trabajo fue el estudio de las oscilaciones de una viga biapoyada, mediante el uso de los sensores Xsens DOT y las plantillas Loadsol. Con este estudio es posible comprobar si los resultados obtenidos son fiables y útiles para el análisis de la respuesta dinámica de una viga biapoyada. Para ello, se realizó una serie de experimentos y mediciones que permitieron evaluar el comportamiento vibratorio de la viga bajo diferentes condiciones. Los resultados obtenidos muestran que, aunque los sensores empleados no cuentan con una alta precisión, han sido capaces de ofrecer información suficientemente coherente para realizar una interpretación razonable de los fenómenos dinámicos involucrados.

Es necesario destacar que la precisión de las mediciones podría haber sido mejor con el uso de sensores de mayor calidad, con una mayor sensibilidad y precisión en la captura de los parámetros dinámicos de la estructura. Sensores de gama más alta, con mejores capacidades de filtrado y una menor susceptibilidad a interferencias, habrían permitido reducir los márgenes de error en las mediciones, proporcionando datos más exactos y fiables. Esto, a su vez, habría facilitado una caracterización más precisa de las propiedades dinámicas de la viga, como sus frecuencias naturales y modos de vibración, con un menor error asociado.



Sin embargo, cabe destacar que, incluso con las limitaciones de los sensores utilizados, los resultados obtenidos han sido en general satisfactorios y permiten cumplir con los objetivos iniciales del trabajo. Se puede afirmar que la instrumentación “vestible” utilizada ha sido suficiente para alcanzar un entendimiento razonable del comportamiento dinámico de una viga biapoyada.

En conclusión, en este TFG se ha demostrado que, aunque la precisión de los datos registrados podría mejorar significativamente con sensores más avanzados, los dispositivos empleados han proporcionado resultados útiles para el análisis dinámico de las estructuras. La tecnología “vestible” se presenta así como una herramienta prometedora en el campo de la ingeniería estructural. A medida que esta tecnología siga evolucionando y mejorando en términos de precisión y capacidad, es posible que su uso se extienda y se convierta en una alternativa viable y eficiente para el análisis dinámico de estructuras en una amplia variedad de contextos.

6.2 Líneas futuras

En el contexto de las posibles líneas futuras derivadas de este Trabajo Fin de Grado, es pertinente considerar la extensión del estudio realizado hacia configuraciones estructurales más complejas, como una viga triapoyada. Al introducir un tercer apoyo en el centro de la viga, se modificarán considerablemente las condiciones de contorno y la distribución de las cargas, lo que resultaría en un comportamiento dinámico diferente al observado en la viga biapoyada. Este nuevo escenario permitiría no solo un análisis más detallado de las respuestas modales de la estructura, sino también una validación adicional de los métodos y herramientas utilizadas en este estudio, en un entorno de mayor complejidad.

Para llevar a cabo este nuevo estudio, una primera línea de desarrollo sería la implementación de sensores de mayor precisión y calidad. Sensores con mejores capacidades de resolución y un rango dinámico más amplio podrían registrar de manera más exacta los parámetros dinámicos de las oscilaciones de la viga, reduciendo así las incertidumbres y los errores asociados. Con esto se conseguirían datos más exactos para el análisis modal y también se podría caracterizar de una forma más precisa las frecuencias naturales y los distintos modos de vibración del sistema triapoyado, facilitando una comparación más detallada con las predicciones teóricas y los resultados obtenidos en el estudio biapoyado.

Otra posible línea de mejora sería la incorporación de cargas adicionales que se aproximen al peso de un ser humano, ya que las plantillas Loadsol utilizadas están diseñadas principalmente para medir las fuerzas generadas durante la



marcha. La aplicación de una carga mayor sobre la viga, permitiría evaluar cómo se comporta la estructura bajo condiciones más realistas. Este punto de vista, haría que el experimento fuese más relevante para aplicaciones prácticas.

En resumen, las líneas futuras de investigación basadas en este TFG podrían enfocarse en la realización de estudios dinámicos de una viga triapoyada, haciendo uso de sensores de mayor calidad para mejorar la precisión de los registros, y considerando la aplicación de cargas mayores. Con estas mejoras, se pueden obtener resultados más robustos y fiables, ampliando el alcance y las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo.

6.3 Consideraciones adicionales

En cuanto a la realización de este TFG, es importante señalar que no se ha utilizado ningún material que presente un peligro, ni se ha generado contaminación ambiental durante su desarrollo, aparte del consumo energético necesario. El único impacto ambiental que podría considerarse se dará en un futuro cuando se desechen los materiales utilizados.

Para minimizar dicho impacto ambiental, todos los sensores utilizados en este trabajo quedan a disposición de futuros estudiantes que puedan utilizarla en sus propios Trabajos Fin de Grado. De esta manera, los equipos podrán ser reutilizados hasta que alcancen el final de su ciclo de vida útil. Además, con el objetivo de reducir aún más el impacto, todo el material se reciclará de manera adecuada una vez que ya no pueda ser utilizado.

Para comenzar este trabajo, fue necesario dedicar una gran cantidad de tiempo a aprender a utilizar los sensores empleados. Esto incluyó la instalación de varias aplicaciones en un dispositivo móvil, además de adquirir los conocimientos necesarios para operar estas herramientas y gestionar la descarga y el procesamiento de los datos generados por los sensores.

A lo largo del desarrollo de este estudio, se han planteado diversos escenarios y se han realizado varios ensayos. Sin embargo, los primeros ensayos se han descartado ya que se hicieron con una resolución de 2,5 N en las plantillas Loadsol, con lo que los resultados obtenidos no fueron válidos. Los ensayos posteriores se realizaron con una resolución de 0,1 N.

Para llevar a cabo la planificación del trabajo y de los distintos ensayos realizados se invirtieron un total de 8 horas. En cuanto al trabajo realizado en el laboratorio, donde se experimentó con los sensores para aprender a utilizarlos y se registraron los datos del presente trabajo, se llevó a cabo en 90 horas. Después se realizó el procesado y estudio de los datos registrados en el



laboratorio, este trabajo demandó unas 70 horas. Por último, se procedió a la redacción del documento y a la preparación de la presentación, lo que llevó 170 horas en total. Al sumar todos los periodos, se obtiene un tiempo total de 338 horas.

A continuación, se va a proceder a calcular una estimación del coste total asociado a este Trabajo Fin de Grado. El tiempo dedicado a la realización de este trabajo es de 338 horas, cumpliendo con las horas estimadas según la guía docente. Considerando que un ingeniero recién graduado tiene un salario de unos 20,000 € anuales, trabajando 1,800 horas al año, se obtiene aproximadamente 11.2 € cada hora. Para calcular el coste del trabajo se multiplican las horas dedicadas por la tarifa de 11.2 €/h, con lo que se obtiene un coste total de 3,785.6 €.



REFERENCIAS

- [1] M. J. Prieto Díaz, *Correspondencia entre registros cinemáticos y presiones plantares al andar*, Universidad de Valladolid, 2024.
- [2] P. San José López, *Metodología para la toma de registros biomecánicos combinando sensores inerciales y de presiones plantares*, Universidad de Valladolid, 2024.
- [3] S. Acevedo Eustaquio, *Propuesta de una metodología para estimar los ángulos entre la cabeza y el torso mediante sensores inerciales*, Universidad de Valladolid, 2023.
- [4] J. C. Sánchez Martín, *Análisis experimental de la velocidad de la marcha en las GRFs*, Universidad de Valladolid, 2022.
- [5] Prontuario básico de estructuras simples.
- [6] Ewins, D. J. *Modal testing. Theory practice and application*. England; 2000.
- [7] Ríos Bedian, LA. *Determinación experimental de los parámetros modales (frecuencias naturales) de una viga en condición empotrada-libre*. México; 2010.
- [8] Blevins, R. D. *Formulas for Mode Shapes and Natural Frequencies*. Krieger Publishing Company. Florida: 2001.
- [9] Chen, D. W, Wu, J. S. The exact solutions for the natural frequencies and mode shapes of non-uniform beams with multiple spring-mass systems. *Journal Sound and Vibration*; 2002. Volumen 25 (2). Páginas: 299-322.
- [10] Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (4 ed.). Pearson.
- [11] Movella, «Xsens DOT User Manual,» 2023.
- [12] novel.de, «loadsol: plantar normal force inside footwear,» [En línea]. Available: <https://novel.de/products/loadsol/>. [Último acceso: 20 08 2024].
- [13] novel.de, «Manual Loadsol,» 2020.
- [14] C. Carballo, «Movimiento Armónico Simple (MAS),» TEC, 2018.



- [15] «Sigview Software. Manual de uso para la aplicación Sigview 32,» 2023. [En línea]. Available: <http://www.sigview.com/>. [Último acceso: 10 07 2024].
- [16] «Sinermed. Captura de movimiento» 2023. [En línea]. Available: <https://www.sinermed.com.co/captura-de-movimiento#1405896902>. [Último acceso: 26 08 2024].



ANEXO 1. Sensores Xsens DOT

Usos y aplicaciones de los sensores Xsens DOT

Xsens DOT, es una plataforma de desarrollo de última generación diseñada para el registro, la medición y la creación de nuevas aplicaciones destinadas al análisis tridimensional del movimiento humano.

Esta innovadora herramienta permite a los desarrolladores y científicos recopilar datos precisos sobre cómo se mueve el cuerpo en un espacio tridimensional, facilitando la investigación en campos como la biomecánica, la rehabilitación, los deportes y la robótica.

Gracias a su tecnología de “fusión de sensores”, es una herramienta muy potente debido a la calidad y la precisión que los caracteriza. Los sensores Xsens DOT son pequeños y ligeros con el fin de que los usuarios los puedan utilizar como un dispositivo independiente, o puedan conectarse varios sensores según sus necesidades para obtener datos de movimientos complejos aún más precisos [16].

Estos sensores cuentan con un acelerómetro, que mide la aceleración a lo largo de un solo eje, un giroscopio, que mide la velocidad de giro, y un magnetómetro que mide el campo magnético y apunta hacia el norte magnético de la Tierra [11]. El procesador integrado en el sensor se encarga del muestreo e integración de datos inerciales.

Con la conexión inalámbrica de datos a través de Bluetooth 5.0, los sensores proporcionan orientación 3D en tiempo real, aceleración lineal 3D calibrada, velocidad angular y campo magnético a un dispositivo receptor, que en este estudio será un dispositivo móvil. Esta conexión Bluetooth se realiza a través de la aplicación de Xsens DOT, Movella DOT, disponible para dispositivos, tanto Android como iOS [11].

Conexión Xsens DOT con dispositivo móvil

A continuación, se detalla cómo se realiza la conexión entre los sensores y el dispositivo móvil. En primer lugar, hay que descargar la aplicación “Movella DOT”. Después, se encienden los sensores Xsens DOT que se desee conectar, pulsando sobre la parte naranja de cada uno de ellos durante 2 segundos.

Se inicia la aplicación y se acepta el consentimiento para que la aplicación use la conexión Bluetooth. Cuando se ha aceptado este consentimiento, aparece la pantalla mostrada en la Figura 94.

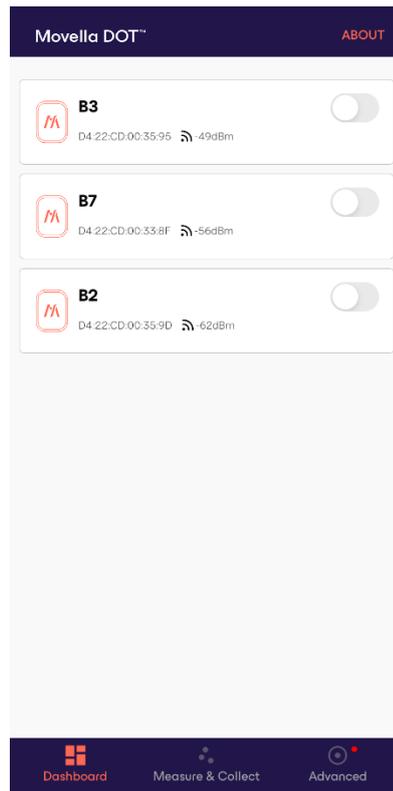


Figura 94. Pantalla inicial de la aplicación Movella DOT.

En esta pantalla inicial, se distinguen tres pestañas. La primera pestaña “Dashboard”, muestra el estado de los sensores y aquí se muestran todos los sensores que se encuentren encendidos. Se pueden conectar simultáneamente tantos sensores como se quiera, no hay un límite fijado en ningún software de Xsens. Para conseguir mejores resultados cuando se conectan múltiples sensores, se recomienda conectar hasta 7 sensores en Android, MacOS y Windows, y hasta 11 sensores en iOS, Linux PC y Raspberry. Pero en realidad, la capacidad real de conexión está acotada por las características específicas del dispositivo que se elija [11].

Se tienen que seleccionar los interruptores de palanca de aquellos sensores de los que se quiera establecer conexión. Una vez que se hayan conectado, los sensores seleccionados quedarán destacados en naranja y se mostrará un aviso en la parte inferior de la pantalla como se puede observar en la Figura 95. Además, se puede ver información como la dirección MAC que es un identificador único para cada dispositivo, la etiqueta de nombre que tiene designada cada sensor, cuánta batería tiene cada sensor o la frecuencia de salida que indica el número de datos registrados por segundo. Manteniendo pulsado sobre la pestaña de un sensor, se despliega una ventana adicional donde se puede apagar el sensor o cambiar su nombre como se puede ver en la Figura 96.

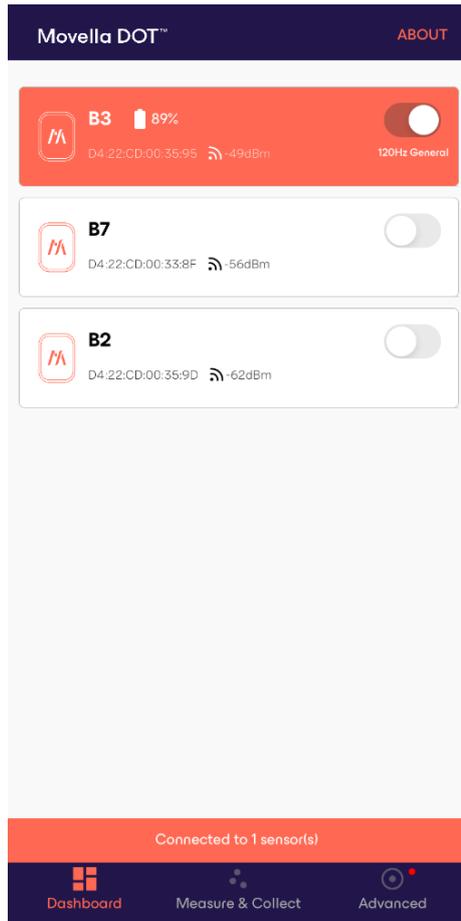


Figura 95. Conexión de los sensores.

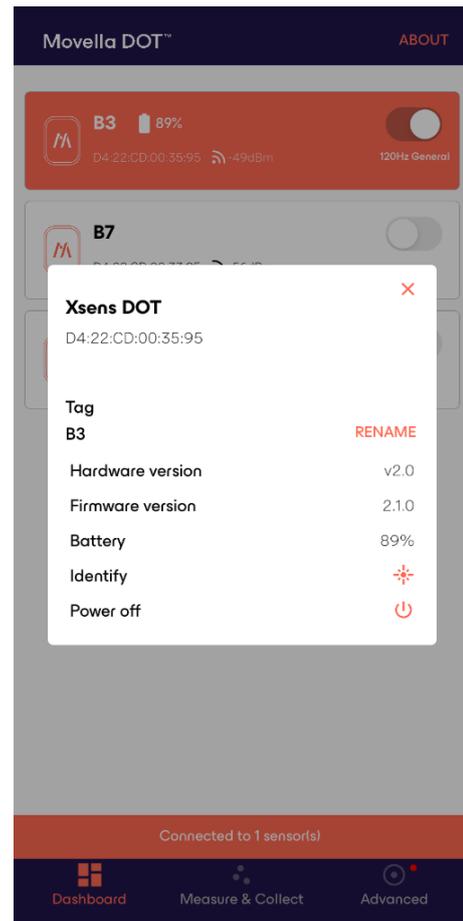


Figura 96. Detalles de un sensor.

Los sensores que se encuentren encendidos activarán el modo de ahorro de energía si no se establece ninguna conexión durante un periodo de 30 min. En la aplicación Movella DOT, se reconectarán automáticamente cuando se pierda la conexión. Si el dispositivo que se está utilizando no detecta los sensores o no consigue conectarlos cuando se pulsa el interruptor, se aconseja reiniciar el Bluetooth del dispositivo.

Frecuencia de salida

Cuando se hayan conectado adecuadamente los sensores, en la segunda pestaña “Measure & Collect” se deben elegir las configuraciones necesarias en función del objetivo de uso de dichos sensores.

En esta segunda pestaña, se puede seleccionar la cantidad de datos que se registran en un segundo. Las frecuencias de salida establecidas son: 1 Hz, 4 Hz, 10 Hz, 12 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 60 Hz y 120 Hz (véase Figura 97). Con las frecuencias más bajas, se registran menos datos por unidad de tiempo, con lo que se almacenará menos información y se alargará el tiempo de grabación.

La frecuencia de 120 Hz, la más alta, solo se puede utilizar en el modo de grabación (*Recording (offline mode)*). En este TFG, se ha utilizado para la toma de datos una frecuencia de 120 Hz.

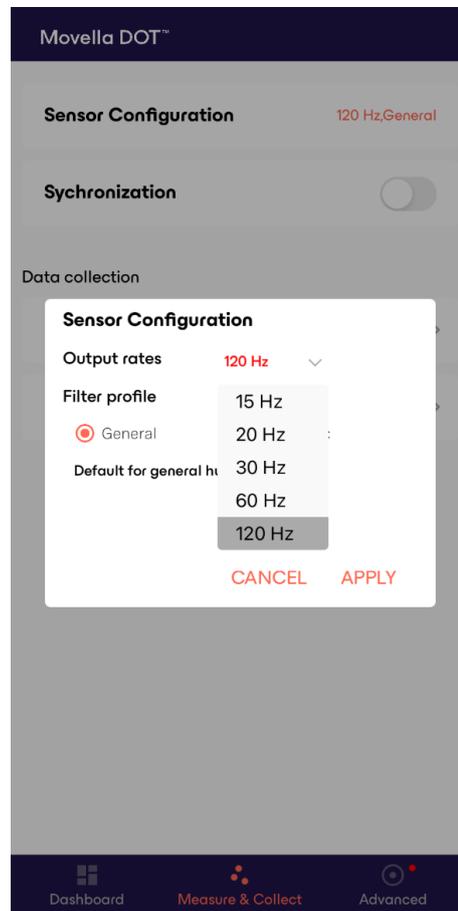


Figura 97. Selección frecuencia de salida.

Sincronización

Es importante considerar la sincronización temporal ya que cada sensor opera en su propio dominio temporal. Se tiene que asegurar la sincronización temporal de los datos medidos entre distintos sensores, en especial en casos de estudio en los que se requiere el funcionamiento de múltiples sensores.

Para sincronizar los sensores con una base de tiempo común, hay que elegir antes una frecuencia de salida. La precisión de la sincronización disminuye con el tiempo, a medida que el reloj del sensor se desvía (véase Tabla 18).

Tiempo	Precisión
Después de 30 min	1 ppm (1,8 ms)
Después de 1 hora	4 ppm (10 ms)

Tabla 188. Precisión de sincronización [11].

Para sincronizar los sensores, se pulsa el interruptor de palanca “Synchronization” que se encuentra en esta segunda pestaña llamada “Measure & Collect” como se puede ver en la Figura 98. Esto tardará entre 10 y 15 segundos aproximadamente. Durante este tiempo, uno de los sensores actuará como nodo raíz y los demás sensores como nodos exploradores. El nodo raíz envía mensajes regulares a los nodos exploradores y estos utilizan la información recibida para ajustar su propio dominio temporal, calculando la desviación y el desfase de sus relojes en relación con el nodo raíz. El primer sensor Xsens DOT que se conecte en la aplicación Movella DOT, será el nodo principal.

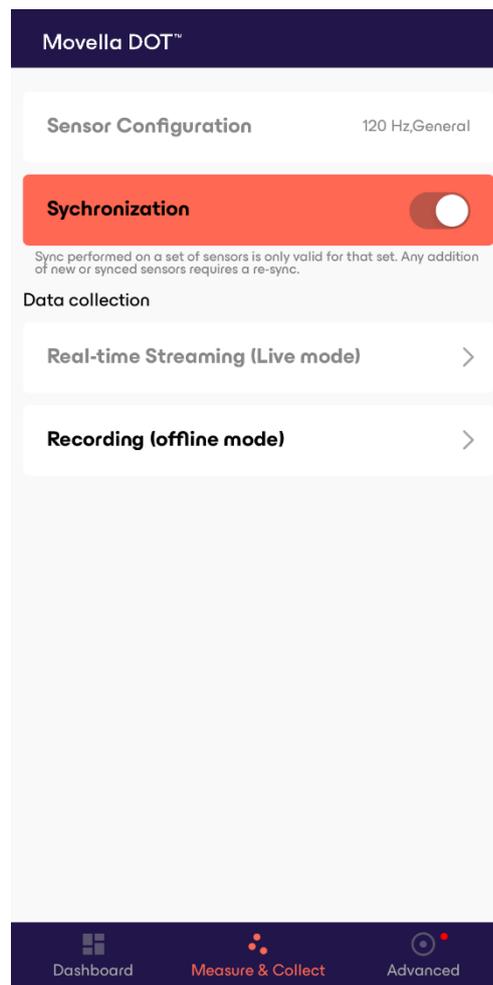


Figura 98. Pestaña “Measure & Collect”.

Es imprescindible llevar a cabo esta sincronización antes de comenzar a tomar medidas para asegurar que todos los datos registrados por los sensores estén sincronizados temporalmente. Una vez que los sensores están sincronizados, es posible iniciar y detener varias mediciones sin tener que volver a sincronizarlos.



En los archivos de datos registrados por los sensores, se podrá verificar que los valores del tiempo de muestreo son iguales para cada sensor. Es posible que los sensores generen paquetes de datos adicionales debido a que el comando de inicio transmitido por Bluetooth tiene retrasos distintos para cada sensor. Estos paquetes de datos se tienen que tener en cuenta cuando se analice la información, pero se pueden eliminar durante el procesado posterior.

Toma de datos

Cuando los sensores estén conectados y sincronizados adecuadamente, se procede a realizar las mediciones y la toma de datos. Existen dos modalidades de medición disponibles para este proceso. Esto permite ajustar el procedimiento a las necesidades específicas del proyecto, ofreciendo una mayor adaptabilidad en la toma de datos. Al disponer de estas opciones, se pueden abordar diversos tipos de estudios y condiciones experimentales, asegurando que los datos recopilados sean útiles para el análisis posterior.

Real-time streaming (Live mode)

Para utilizar esta opción en la toma de datos, se tiene que pulsar sobre la opción “*Real-time Streaming (Live mode)*”, los datos se registran en un dispositivo a través de una conexión Bluetooth constante durante toda la grabación.

Los datos se transcriben en un archivo creado por la propia aplicación en el dispositivo según se van recibiendo. Además, hay disponibilidad de seleccionar distintos modos de grabación: “*Sensor Fusion Data*” (datos de fusión de sensores), “*Inertial Data*” (datos inerciales) y “*Custom Modes*” (modos personalizados) (véase Figura 99).

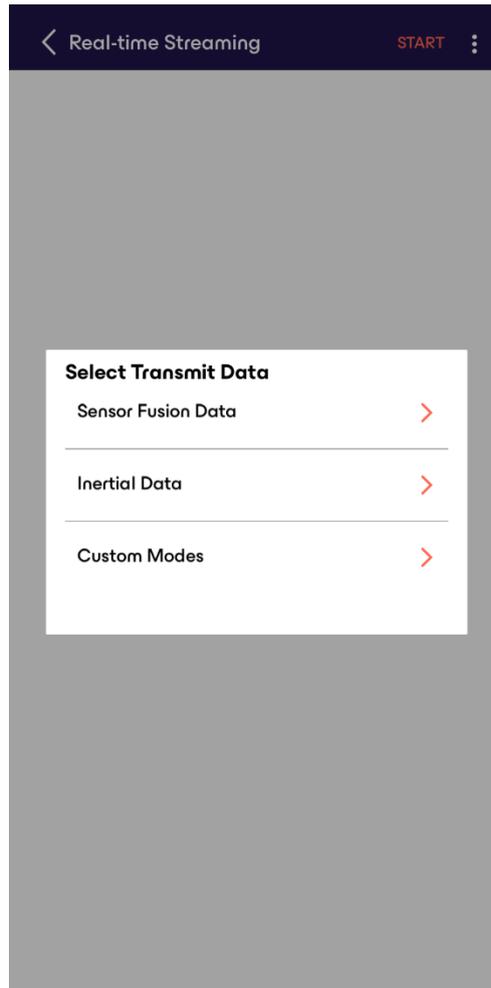


Figura 99. Modos de grabación.

“*Sensor Fusion Data*” (véase Figura 100), permite registrar la orientación a través de ángulos de Euler o cuaterianos y de la aceleración. La siguiente opción, “*Inertial Data*” (ver Figura 101), registra la aceleración, la velocidad angular y el campo magnético. La última opción, “*Custom Modes*”, contiene la posibilidad de elegir entre varios modos predeterminados, cada uno de estos tiene la finalidad de registrar magnitudes específicas. En la Figura 102, se muestran cinco combinaciones diferentes.

Para almacenar los datos registrados en alguno de estos modos, es necesario activar el interruptor de palanca denominado “*Data Logging*” (véase Figuras 100, 101 y 102), pulsando sobre “*APPLY*”. Cuando se activa, en la parte inferior de la ventana se puede ver la dirección donde se generan los archivos con los datos registrados (véase Figura 102).

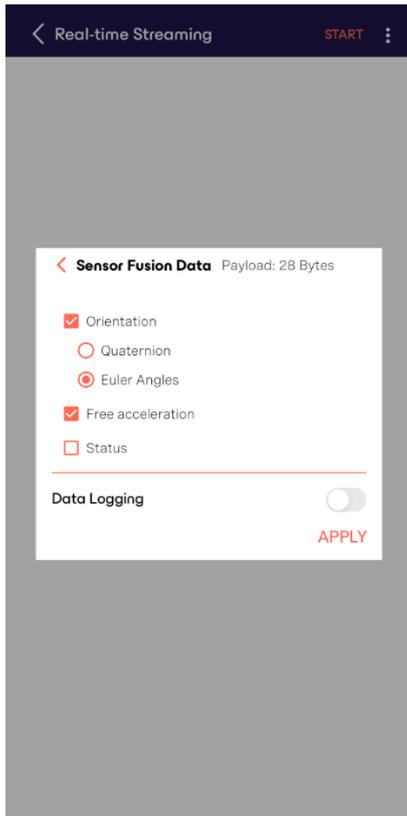


Figura 100. Modo de grabación "Sensor Fusion Data".

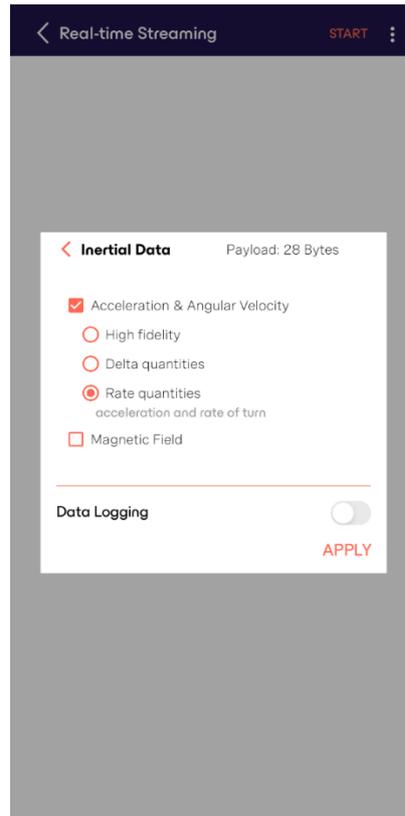


Figura 101. Modo de grabación "Inertial Data".

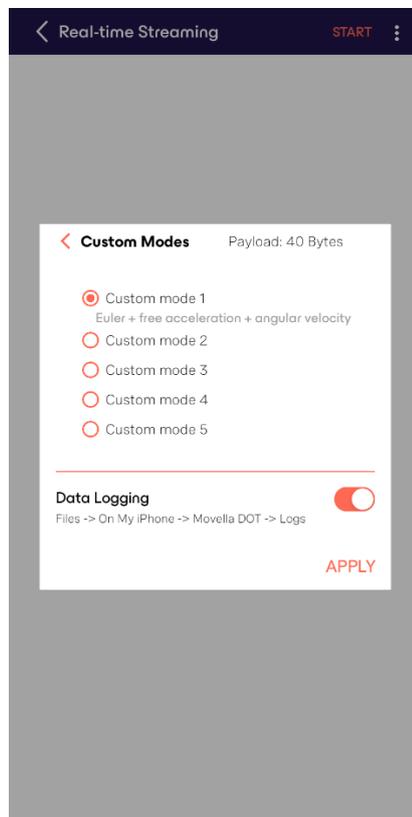


Figura 102. Modo de grabación "Custom Modes".

Para iniciar la toma de datos se debe pulsar sobre el botón “START”, situado en la esquina superior derecha. Con esto, se dibujan las gráficas de los parámetros seleccionados, como se muestra en la Figura 103. Para detener la toma de datos, hay que hacer clic sobre el botón “STOP” que se encuentra en la esquina superior derecha. Si se desea iniciar una nueva medición, se debe pulsar el botón “START”. Con esto, el proceso de medición comenzará de nuevo.

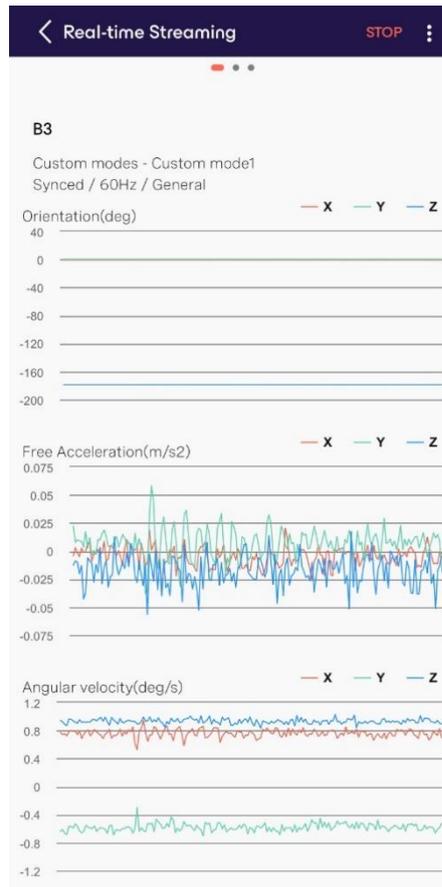


Figura 103. Gráficas del modo “Real-time Streaming (Live mode)”.

Si anteriormente se ha activado el interruptor “Data Logging”, el archivo se guarda con extensión “.csv”. Se genera un archivo distinto para cada sensor utilizado en la memoria del teléfono. Si se quieren exportar estos archivos al ordenador, se tiene que conectar el móvil al ordenador con el cable adecuado y buscar en su almacenamiento interno. Los archivos tendrán el nombre según AñoMesDía_HoraMinutos. Cuando se tengan los archivos en el ordenador, se pueden abrir con el programa “Microsoft Excel”. El contenido de estos archivos variará en función del modo de medición elegido.

Recording (offline mode)

Si se elige la opción “Recording (offline mode)” se accede a otro modo distinto de grabación (ver Figura 104). Este modo se basa en almacenar los datos

registrados en el almacenamiento interno de los propios sensores, ya que estos tienen una memoria interna de 64 MB. Con este modo, no se necesita tener una conexión Bluetooth constante con el teléfono después de la activación.

En este modo, se puede ver el porcentaje de almacenamiento disponible en la memoria de cada sensor y el tiempo de grabación. El tiempo máximo de grabación de cada sensor, depende de la frecuencia seleccionada. A medida que aumenta la frecuencia, el tiempo de grabación disponible es menor.

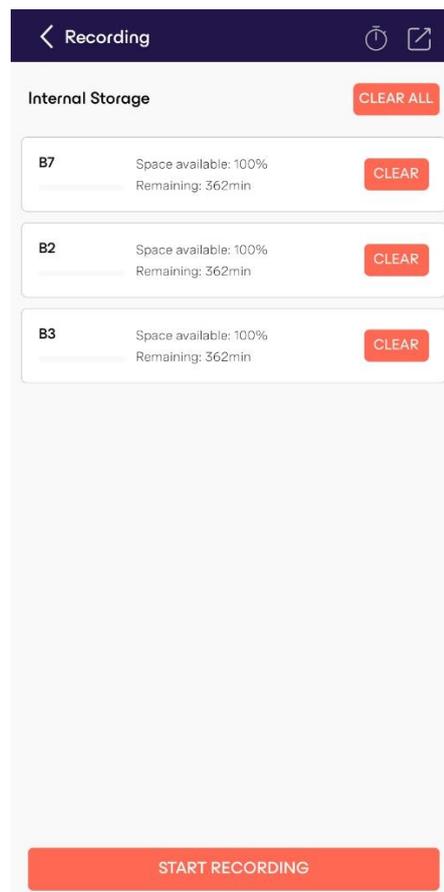


Figura 104. Modo de grabación “Recording (offline mode)”.

Pulsando sobre el botón “CLEAR” situado en la pestaña de cada sensor (véase Figura 104), se eliminan los datos registrados en el espacio de memoria del sensor. Si se quiere liberar la memoria de todos los sensores se puede pulsar “CLEAR ALL”, situado en la esquina superior derecha.

Se puede configurar una grabación con temporizador que detendrá automáticamente la toma de datos después de un tiempo determinado. Para configurar esta opción, se debe pulsar sobre el icono del reloj situado en la esquina superior derecha. Se activa el interruptor “Set Recording Timer”, se

desplaza hacia la derecha el círculo rojo dependiendo del tiempo deseado de grabación y después se pulsa en “CONFIRM” (véase Figura 105).

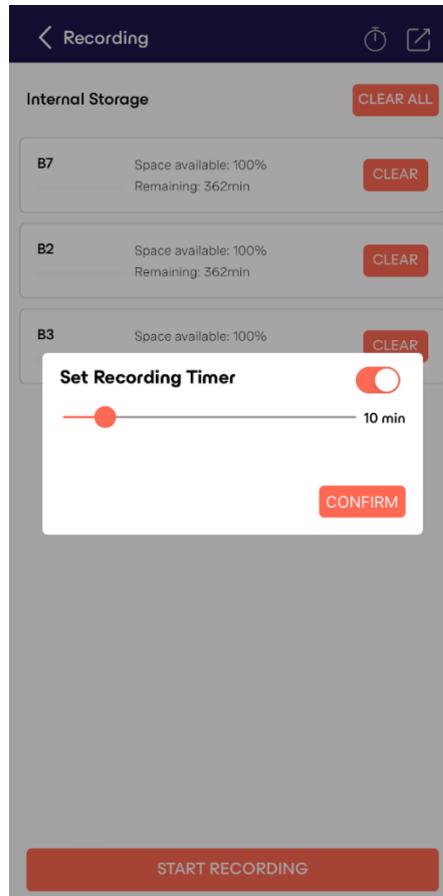


Figura 105. Configuración del temporizador.

Cuando se hayan realizado todas las configuraciones necesarias, se pulsa en el botón “*START RECORDING*”, situado en la parte inferior de la pantalla (véase Figura 105) para comenzar la toma de datos. Después de iniciar la grabación, se pueden ver todos los sensores con el tiempo transcurrido desde el inicio de la grabación, (véase Figura 106).

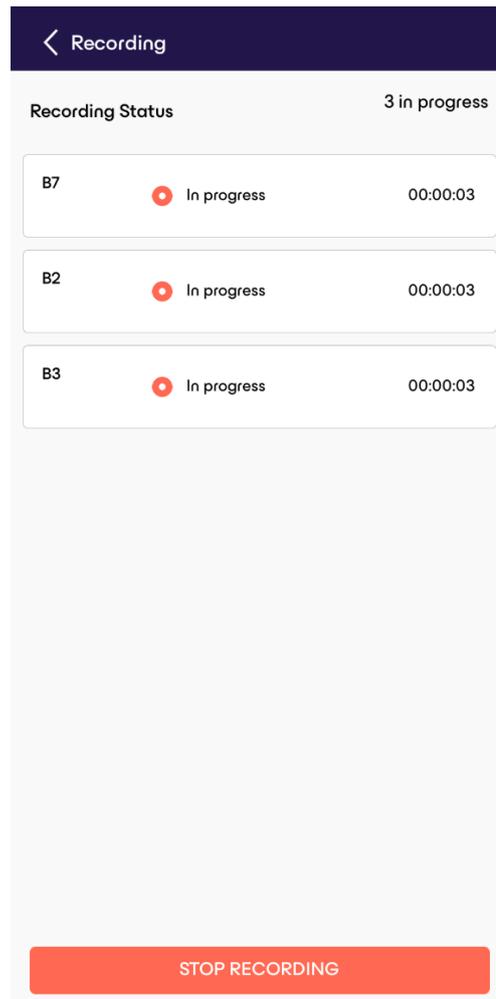


Figura 106. Grabación.

Para detener la toma de datos, se pulsa sobre el botón “STOP RECORDING” situado en la parte inferior de la pantalla (véase Figura 106). También se puede detener la grabación presionando el botón central del sensor durante un segundo aproximadamente. Los sensores deben de estar conectados por Bluetooth al teléfono.

Cuando se haya finalizado la toma de datos, estos se pueden exportar de dos formas distintas. Las dos generan archivos de extensión “.csv”, por lo que los valores se encuentran separados por comas, esto permite manipularlos con diversas aplicaciones y programas de datos fácilmente. Con ambas opciones la transferencia y disponibilidad de los datos serán seguras, la elección de la forma de exportarlos dependerá de las necesidades y dispositivos disponibles.

- Exportación de datos mediante Bluetooth
Para exportar los datos registrados por Bluetooth, se debe pulsar el icono cuadrado que se sitúa en la esquina superior derecha (véase Figura 104). Después, se seleccionan los archivos de datos que se

desean exportar de cada sensor activando la casilla de verificación correspondiente de cada archivo (véase Figura 107).

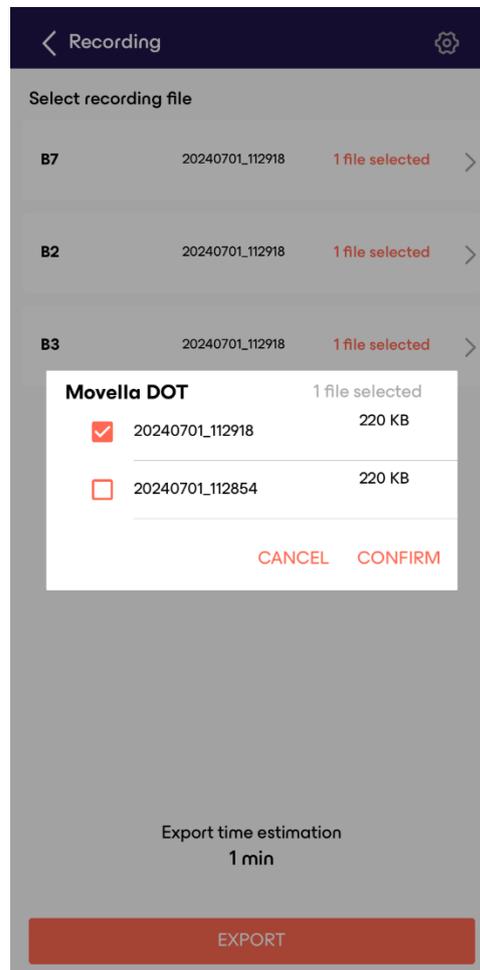


Figura 107. Selección de archivos de grabación para exportar.

Cuando se hayan seleccionado los archivos que se desean exportar, se debe pulsar el icono de la rueda dentada situada en la esquina superior derecha (véase Figura 107), para elegir los datos que se quieren descargar. Después, aparecerá una ventana como la mostrada en la Figura 108, en la que se pueden marcar las casillas de los parámetros que se necesitan. Para este TFG solo se necesitan la aceleración y los ángulos de Euler. Cuando se hayan seleccionado las casillas, se debe pulsar en “CONFIRM”.

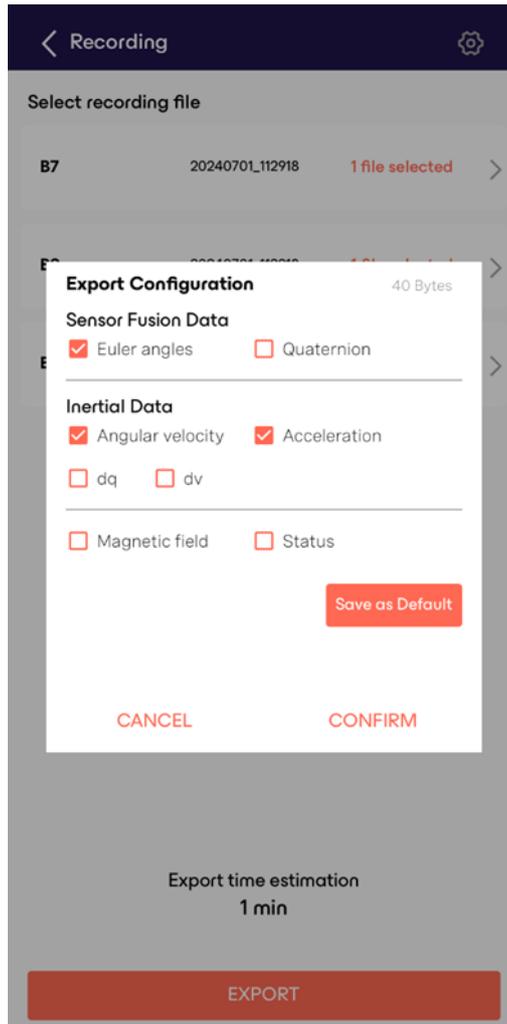


Figura 108. Selección de casillas necesarias en función del caso de estudio.

Si se pulsa el botón “Save as Default”, en la Figura 108, se guardan las casillas seleccionadas como predeterminadas para futuras exportaciones.

Cuando se termine de seleccionar las casillas necesarias de cada sensor, se debe pulsar el botón “EXPORT” para que comience la exportación de los datos registrados. Se verá el tiempo necesario para exportar los datos en la parte inferior de la pantalla (véase Figura 109).

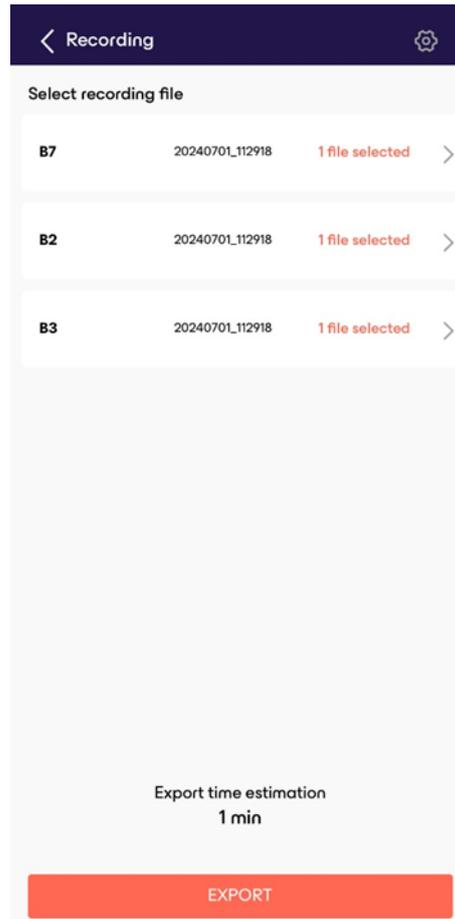


Figura 109. Exportar datos.

Cuando todos los datos se hayan exportado, se indicará en la parte inferior de la pantalla la dirección donde se encuentran los archivos dentro del teléfono. Por último, cuando se ha terminado de exportar todos los datos necesarios, se debe pulsar el botón “FINISH”, situado en la parte inferior de la pantalla (véase Figura 110).

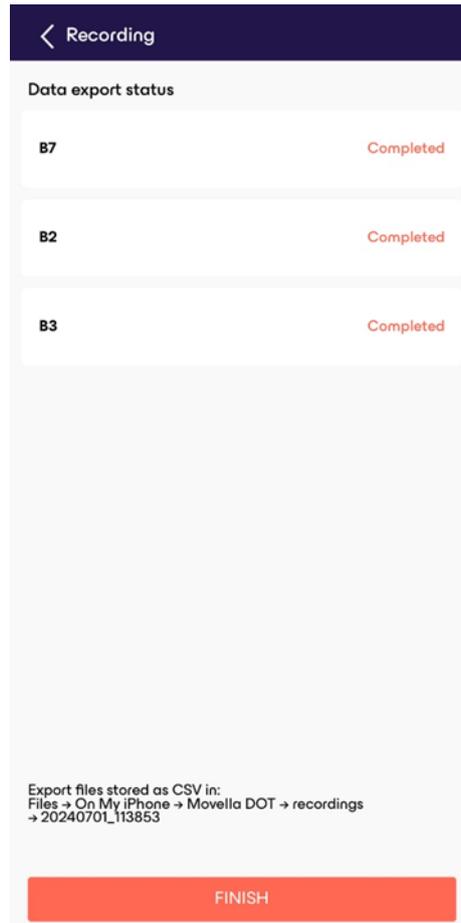


Figura 110. Finalizar la exportación de los datos.

- Exportación de datos mediante cable USB
Esta opción de exportación es recomendable cuando se tienen que exportar grandes cantidades de datos debido a que el tiempo de exportación disminuye considerablemente en comparación con la exportación por Bluetooth. Para ello, se debe instalar en el ordenador la aplicación “Xsens DOT Data Exporter” disponible para Windows o Mac.

Plataformas compatibles con el software.

No todos los dispositivos son compatibles con los sensores Xsens DOT. Para garantizar el funcionamiento y la validez de los datos registrados, la Tabla 19, resume una serie de características que deben tener los dispositivos con los que se realizan los registros de los datos.



Software	Plataformas compatibles
Requisitos de Bluetooth	Mejor rendimiento con BLE 5.0, compatible con DEL y compatible con Bluetooth 4.2
Xsens DOT Data Explorer	Windows 10
Aplicación para iOS	iOS 11.0 o superior
Aplicación para Android	Android OS 8.0 o superior

Tabla 19. Plataformas compatibles con el Software [11].



Universidad de Valladolid

*Identificación dinámica de una viga
biapoyada con instrumentación "vestible".*



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ANEXO 2. Plantillas Loadsol

Usos y aplicaciones de las plantillas Loadsol

Las plantillas Loadsol nos permiten medir de forma móvil la fuerza de reacción normal del suelo en la superficie de la planta del pie. El sistema está dirigido para mediciones estáticas y dinámicas, para cuantificar con precisión las fuerzas generadas entre pie y zapato.

Estos sensores textiles, blandos, deformables y ultrafinos están diseñados para permitir una evaluación precisa de la marcha y poder realizar el análisis de la carga o el análisis de la fuerza máxima en cualquier entorno y durante cualquier movimiento del cuerpo.

Conexión plantillas Loadsol con dispositivo móvil

A continuación, se detalla cómo se realiza la conexión entre las plantillas Loadsol y el dispositivo móvil. En primer lugar, hay que descargar la aplicación “loadsol-s”. Después, hay que insertar una batería circular CR 2032 (Litio 3V) en el compartimento de la batería con el lado “+” hacia arriba y encender las plantillas, se debe apretar el botón que se sitúa en la parte de los circuitos hasta que el led indicador parpadee en color verde. Cuando se accede a la aplicación aparece una pantalla como la mostrada en la Figura 111.

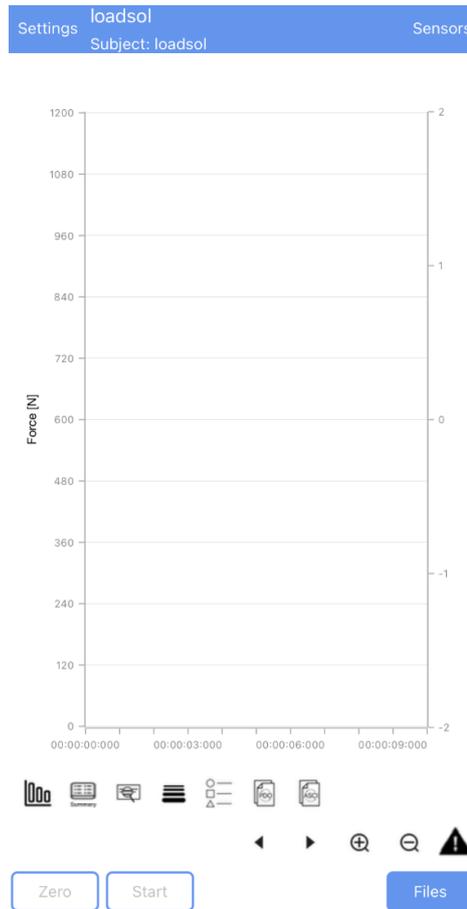


Figura 111. Pantalla inicial de la aplicación loadsol-s.

Para conectar las plantillas Loadsol vía Bluetooth al dispositivo móvil, hay que pulsar en el botón “Sensors”, situado en la esquina superior derecha. Entonces, aparecerán en la pantalla todas las plantillas Loadsol que se encuentren encendidas (véase Figura 112).

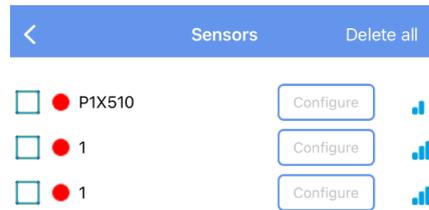


Figura 112. Conexión plantillas Loadsol.

Si la aplicación no encuentra las plantillas Loadsol que se encuentren encendidas en ese momento, se debe pulsar el botón “Scan” situado en la parte inferior izquierda. El círculo rojo situado al lado de cada sensor indica que no están conectados. Es necesario clicar sobre el cuadrado que aparece a la izquierda de cada sensor de los sensores que se desea conectar. Después, se debe pulsar sobre el botón “Connect”, situado en la esquina inferior derecha, para establecer conexión entre las plantillas Loadsol y el dispositivo móvil.



Figura 113. Plantillas Loadsol conectadas.

Cuando se haya establecido conexión entre las plantillas y el dispositivo móvil, los círculos rojos cambiarán a color verde y en los nombres de las plantillas se añadirá “-L” para la plantilla izquierda y “-R” para la plantilla derecha, como se puede ver en la Figura 113. Además, se podrá ver la batería disponible en cada plantilla Loadsol. Antes de comenzar a tomar datos se debe comprobar que todas las plantillas tienen suficiente batería. Para volver a la pantalla de inicio, se debe pulsar en el botón “Back”, situado en la parte inferior de la pantalla.

Configuración plantillas Loadsol

Para modificar la configuración de cada plantilla, se debe pulsar sobre el botón “Configure”, mostrado en la Figura 113 y aparecerá una pantalla similar a la de la Figura 114. En la parte superior de esta pantalla aparece la versión Hardware y Firmware. En este caso la versión Hardware es HwRev2 y la versión Firmware es SwRev3.1.7.C2.Ca3. Justo debajo, se muestra la intensidad de la señal



Bluetooth (RSSI = intensidad de la señal recibida). Después, se puede ver el nivel de batería que se muestra con un símbolo lleno de 0 a 4 barras y un porcentaje (en pasos de 15%). En la casilla “Time per frame [msec]” se define la frecuencia de medición, también llamada velocidad de escaneo. En esta casilla se debe indicar cada cuantos milisegundos se va a registrar una medición. Para este TFG se han tomado datos a una frecuencia de 200 Hz, lo que equivale a un dato registrado cada 5 milisegundos. Todas las plantillas se deben configurar con la misma frecuencia, en caso contrario, los datos registrados pueden ser incorrectos y los archivos pueden no ser legibles en el software del ordenador.

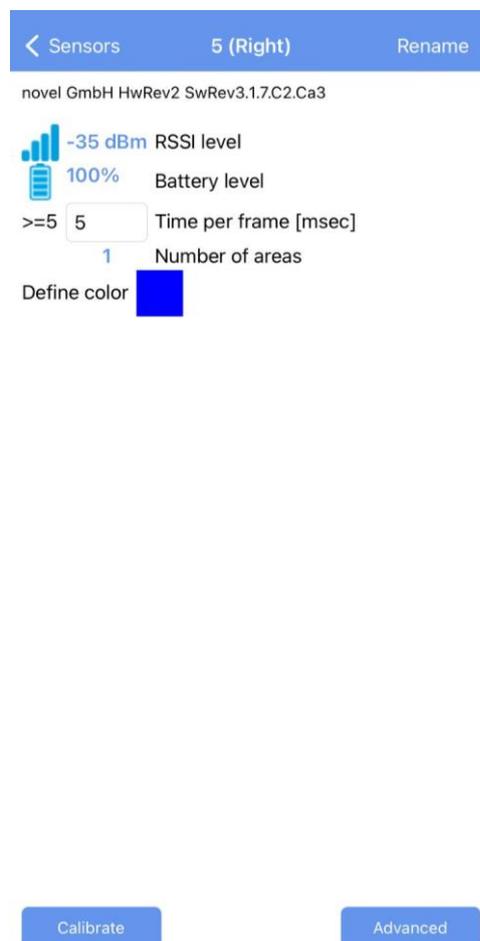


Figura 114. Detalle configuración plantilla Loadsol.



Calibración plantillas Loadsol

La calibración de las plantillas Loadsol es muy importante para obtener resultados de medición precisos. Se recomienda comprobar la calibración antes de realizar una medición. Para esto, se debe realizar una medición de prueba. Si la fuerza medida tiene una desviación de +/- 5% de su peso corporal, la calibración es buena y no necesita repetirse. Si existe una desviación mayor de +/- 5%, o para alcanzar la mayor precisión posible, se recomienda repetir la calibración.

Para calibrar las plantillas, se debe pulsar sobre el botón “Calibrate”, situado en la esquina inferior izquierda de la pantalla mostrada en la Figura 114. Entonces aparecerá una ventana como la de la Figura 115.

< 5 (Right) Calibration for 5 (Right)

Weight: ? 24,5 [kg]

Max resolution of force: 0,1 N

Please unload the insole Zero

Please load the insole with bodyweight Load

Please unload the insole Zero

Save calibration Save

Figura 115. Detalle calibración plantillas Loadsol.

En esta ventana se debe seleccionar el peso que van a soportar las plantillas en el proceso de calibración, en este caso se ha utilizado una barra de 24,5 kg como se puede ver en la Figura 116.



Figura 116. Detalle proceso de calibración plantillas Loadsol.

También se debe indicar la resolución con la que se va a realizar la calibración, que para este ensayo será de 0,1 N. La resolución predeterminada es de 2,5 N, pero para este TFG se ha necesitado bajar la resolución a la más baja posible ya que los pesos registrados por las plantillas son menores que las fuerzas que se registrarían en su uso habitual.

Durante la toma de datos la resolución se adapta a la fuerza aplicada. Para el rango de fuerzas más bajo, la resolución se mantiene constante en el valor definido en el proceso de calibración.

Para fuerzas superiores a (resolución*250 N), en este caso $0,1*250=25$ N la resolución se adapta en función de la fuerza aplicada según la fórmula:

$$\text{Resolución} = \text{MaxInPacket} * 0,004 \quad (98)$$

Donde “MaxInPacket” es el valor de la fuerza máxima dentro de un paquete de datos. En resumen, para este caso de estudio la resolución será de 0,1 N para fuerzas inferiores a 25 N y para fuerzas superiores a 25 N la resolución seguirá la fórmula indicada en la ecuación (98). Se sigue este procedimiento porque las plantillas Loadsol tienen una memoria finita de 8 bits y para registrar valores



de datos muy grandes no es necesaria tanta precisión, con esto se consigue que no se llene la memoria y que el volumen de datos sea menor.

Proceso de calibración

Para empezar, no tiene que haber peso sobre las plantillas que se desean calibrar. En este momento se debe pulsar sobre el botón “Zero”.

Después, se debe poner sobre la plantilla el peso indicado en la pantalla de la Figura 115. En caso de que el proceso de calibración se realice con el propio peso corporal es necesario estar quieto y no moverse, además de intentar equilibrar el peso corporal en toda la planta del pie. Cuando se alcance una lectura estable, se debe pulsar el botón “Load”. En el siguiente paso se debe descargar el peso aplicado sobre las plantillas y después de tres segundos volver a pulsar el botón “Zero”.

Después se debe pulsar el botón “Save” para almacenar la calibración y aparecerá una ventana en la que se pide introducir una contraseña. La contraseña que se debe introducir es “7007”. Cuando se ha introducido la contraseña, la calibración se guardará en la electrónica de la plantilla. Por último, se debe pulsar sobre el botón “Save” para salir de la pantalla de calibración.

Ajuste del ensayo

En el apartado “Settings”, situado en la parte superior izquierda de la pantalla de inicio de la aplicación (véase Figura 111), podremos configurar distintas variables situadas en dos pestañas distintas “Basic” y “Advanced”.



The screenshot shows a 'Settings' screen with a blue header and a white background. The 'Basic' tab is selected. The settings are as follows:

- Weight: 0 kg
- Subject name: loadsol
- Show pressure:
- Max force [N]: 1200 from file:
- Force range [N]: show lines:
- upper limit: 1200
- lower limit: 0
- Biofeedback: (with smiley and frowny icons)
- sound: vibrate
- for: force (with 'ave force' label)
- Interval length[s]: 10
- Measurement time(<= 86400)[s]: 3600
- Visual feedback:
- Protected:
- Patient mode:
- Auto save:
- with comments:
- with ASCII:

At the bottom, there are two tabs: 'Basic' (selected) and 'Advanced'.

Figura 117. Detalle pestaña “Basic”.

La casilla “Show pressure” esta desactivada, con lo que se mostrará la fuerza en el gráfico fuerza-tiempo. En el caso de que esta ventana estuviera activada se mostraría la presión.

En la casilla “Max. Force [N]” se define el valor máximo del eje Y del diagrama de fuerza-tiempo. Se pueden registrar valores por encima del valor máximo de fuerza definido, pero no se representarán en la gráfica.

En la siguiente casilla, “Force range [N]”, se definen los límites de fuerza que se pueden utilizar para la biorretroalimentación acústica y visual y para la evaluación de los datos registrados. Se puede producir retroalimentación si el valor de fuerza registrada excede uno de los límites definidos. Si se acciona el interruptor de palanca de “show lines:” los límites de fuerza superior e inferior se mostrarán como una franja de color azul en el diagrama de tiempo de fuerza.

En el interruptor de palanca “Biofeedback”, se puede activar la biorretroalimentación. En caso de que se active, se reproducirá una señal de



audio para la zona del sensor seleccionada. Se pueden producir dos tipos de retroalimentación:

- Retroalimentación negativa (cara triste): la señal se reproducirá si la fuerza está por debajo del límite inferior o superior.
- Retroalimentación positiva (cara sonriente): la señal se reproducirá si la fuerza está dentro del rango de fuerza definido.

También se puede elegir entre sonido/vibración, en función de la opción elegida la señal se reproducirá como sonido o el dispositivo vibrará. Además, se puede elegir entre fuerza/fuerza media. Si se selecciona fuerza, la biorretroalimentación de audio se da para el valor de la fuerza actual, si se selecciona fuerza media, la señal de audio se referirá al valor de la fuerza máxima media. La retroalimentación visual solo está disponible en la pantalla del diagrama de barras.

En la casilla "*Interval length [s]*" se define la escala del eje X (eje de tiempo) del diagrama fuerza-tiempo. En la siguiente casilla "*Measurement time (<=86400)[s]*", se debe indicar una longitud de tiempo del ensayo. La medición se detendrá automáticamente cuando se alcance ese tiempo establecido y se mostrará una pantalla para avisar al usuario. Independientemente del tiempo establecido en esta casilla, se puede detener la toma de datos cuando se desee pulsando sobre el botón "*STOP*".

En la siguiente pestaña, "*Protected*", se puede activar el interruptor de palanca con el que se activará el modo protegido. Para detener la toma de datos se tiene que escribir un PIN, esto evita que la persona detenga la grabación por error. El PIN maestro es "1234", pero el usuario puede definir su propio PIN.

Si se activa el interruptor de palanca de la pestaña "*Patient mode*" se desactivarán algunas funciones de la aplicación. Las mediciones se pueden iniciar, detener, guardar y mostrar, pero los botones "*Sensors*" y "*Files*" estarán desactivados. Solo se puede acceder a la configuración de medición después de introducir el PIN.

La siguiente pestaña, "*Auto save*", se debe activar si se desea que los archivos se guarden automáticamente. En este caso, se pueden activar los interruptores de palanca "*with comments*" con el que se permitirá introducir un comentario antes de que se guarde el archivo, y el interruptor de palanca "*with ASCII*" con lo que se generará un archivo de texto (.txt).

En el caso de que no se active la pestaña "*Auto save*", cuando se detenga la toma de datos aparecerá una pestaña en la que se pueda añadir un comentario y seleccionar la forma de almacenar los datos. Si se selecciona "Yes", se genera un archivo ".pdo", si elige la opción "Yes with ASCII", se genera un archivo de texto ".txt", y si se elige "No", no se almacenarán los datos (véase Figura 119).

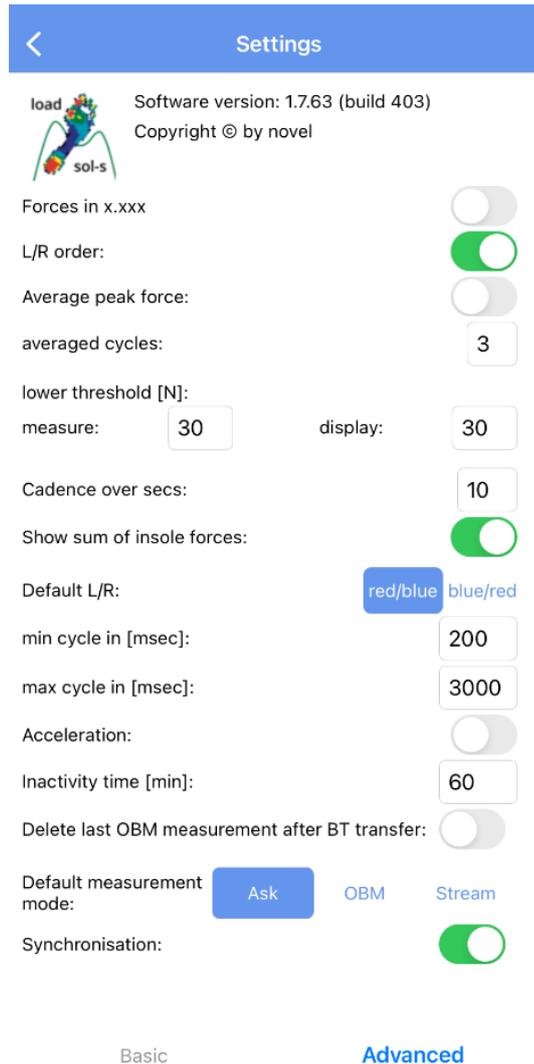


Figura 118. Detalle pestaña “Advanced”.

En la pestaña “Advanced”, mostrada en la Figura 118, aparece en la parte superior la versión del software. Después de esto, aparece la pestaña “Forces in x.xxx”. Si se activa el interruptor de palanca los valores de fuerzas se mostrarán con tres dígitos decimales.

La pestaña “L/R order” está activa por defecto. La plantilla izquierda aparece encima de la plantilla derecha en la lista de sensores, por lo que los valores de fuerza de la plantilla izquierda se muestran en la parte izquierda de la pantalla y los de la plantilla derecha en la parte derecha. Si se desactiva esta opción, el orden se puede determinar manualmente por el orden de selección en la lista de sensores. En la pestaña “Default L/R”, situada en la parte central de la pantalla, está seleccionada la opción “red/blue” por defecto, con lo que el valor de fuerza de la plantilla izquierda se muestra en color rojo y el de la plantilla derecha en azul. Si se selecciona la opción “blue/red”, la plantilla izquierda se graficará en azul y la derecha en rojo.

La pestaña “*Show sum of insole forces*” aparece activada por defecto. Cuando esta pestaña permanece activa se muestra la suma de la fuerza registrada por ambas plantillas como un número negro en el lado izquierdo de la pantalla.

El interruptor de palanca de la pestaña “*Synchronisation*” está activo por defecto. Con esto, todas las plantillas Loadsol que estén conectadas se van a sincronizar antes de comenzar a registrar datos.

Toma de datos

Cuando se haya completado la configuración de las plantillas y el ajuste del ensayo, se podrá iniciar la toma de datos. Antes de empezar a registrar datos, se debe pulsar sobre el botón “*Zero*”, situado en la esquina inferior izquierda, para marcar el peso cero de las plantillas conectadas. Después, para comenzar a registrar datos, se debe pulsar sobre botón “*Start*”, situado en la parte inferior de la pantalla. Cuando la toma de datos haya finalizado, se debe pulsar sobre el botón “*Stop*”, con lo que aparecerá la ventana mostrada en la Figura 119.

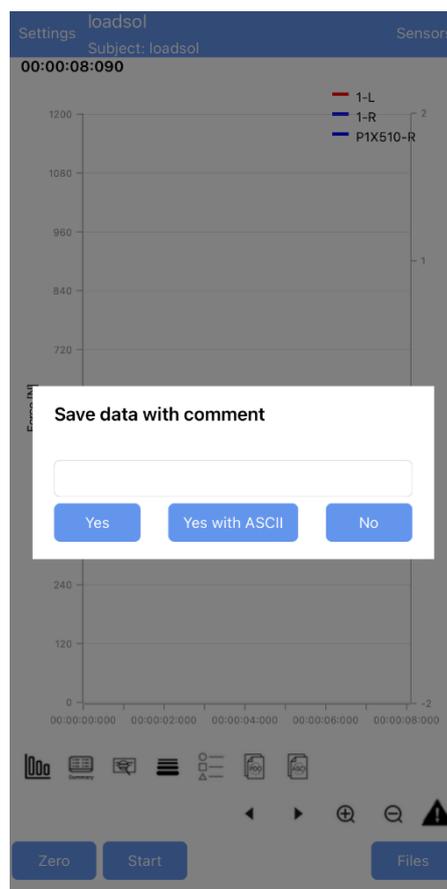


Figura 119. Detalle pestaña “*Save data with comment*”.



En esta ventana, se puede poner el nombre con el que se desea guardar el archivo que contiene los datos registrados y después se debe pulsar en el botón “Yes with ASCII”. Con esto, se crea en la memoria interna del dispositivo móvil un archivo de datos (.txt) que contiene las medidas registradas y un archivo “.pdo” con el que se puede visualizar en la aplicación “loadsol-s” la gráfica con los datos registrados en ese ensayo.