



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Estudio comparativo de cuatro propuestas de  
amortiguadores para disipadores pasivos de  
vibraciones**

Autor:

**Lorenzo Gutiérrez, Iván**

Tutor:

**Lorenzana Iban, Antolín  
Magdaleno González, Álvaro  
C.A., I. T., M.M.C y Teoría de  
Estructuras**

**Valladolid, Julio 2019**





## RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo la evaluación y la comparación de cuatro tipos de amortiguadores para la disipación de vibraciones en un TMD. Estos cuatro tipos de amortiguamiento son: viscoso, fricción seca, magnético y micro-fricciones de cables metálicos, que se estudiarán tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia con ayuda del hardware SIRIUS HD-STG y el software DEWEsoft X3.

**Palabras clave:** Amortiguamiento, TMD, vibraciones, tiempo, frecuencia.

## ABSTRACT

The purpose of this Final Degree Project is the evaluation and comparison of four types of shock absorbers for the dissipation of vibrations in a TMD. These four types of damping are: viscous, dry friction, magnetic and micro-frictions of metallic cables, which will be studied both in the time domain and in the frequency domain with the help of hardware SIRIUS HD-STG and software DEWEsoft X3.

**Keywords:** Damping, TMD, vibrations, time, frequency.





# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Metodología .....	2
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	5
2.1 Introducción .....	5
2.2 Sistema discreto de 1 grado de libertad .....	5
2.3 Vibraciones libres .....	6
2.4 Vibraciones forzadas amortiguadas .....	13
3. BANCO DE ENSAYOS .....	17
3.1 Plataforma de movimiento Simumak.....	17
3.2 TMD .....	19
3.3 Instrumentación .....	23
3.4 Diseño de experimentos .....	31
4. EVALUACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO .....	41
4.1 Técnica de la envolvente exponencial. ....	42
4.2. Técnica del Curve-Fitting.....	56
4.3. Técnica del decremento logarítmico.....	66
5. EVALUACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA.....	73
5.1 Técnica del Peak-Picking .....	74
5.2 Técnica del Circle Fit.....	76
5.3 Técnica del Curve-Fitting.....	78
6. CONCLUSIONES.....	89
6.1 Comparación de resultados .....	89



6.2 Líneas futuras .....	93
7. BIBLIOGRAFÍA .....	95
ANEXO A: MANUAL DE ARRANQUE DE LA PLATAFORMA SIMUMAK.....	97
ANEXO B: CONFIGURACIÓN DEWESOFT X3 .....	101
ANEXO C: CÁLCULO DEL PESO DEL SOPORTE MÓVIL.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 2. 1 Sistema dinámico de 1 grado de libertad [4].....	5
Figura 2. 2: Representación gráfica del movimiento sobreamortiguado [4]. .....	9
Figura 2. 3: Representación gráfica del movimiento subamortiguado. ....	10
Figura 2. 4: Representación gráfica del movimiento críticamente amortiguado [4]. .....	11
Figura 2. 5: Ciclo de histéresis [4].....	11
Figura 2. 6: Sistema dinámico de 1 grado de libertad forzado [4]. .....	13
Figura 2. 7: Sistema dinámico de 1 grado de libertad con excitación en la base [1]. .....	15

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Banco de ensayos. ....	17
Figura 3. 2: Partes de la plataforma mecánica [7]. .....	18
Figura 3. 3: Especificaciones mecánicas de la plataforma [7]. .....	19
Figura 3. 4: Partes del TMD. ....	20
Figura 3. 5: Posición en reposo. ....	21
Figura 3. 6: Colocación de los muelles. ....	22
Figura 3. 7: Colocación de las ballestas. ....	22
Figura 3. 8: Colocación de los acelerómetros. ....	24
Figura 3. 9: Imán para la colocación de los acelerómetros. ....	24
Figura 3. 10: Adaptador DSI-ACC 0.16 Hz. ....	24
Figura 3. 11: Acelerómetro KS76.C100 [8].....	25
Figura 3. 12: Captura de las características del 15009 en Dewesoft. ....	25
Figura 3. 13: Captura de las características del 16045 en Dewesoft. ....	25
Figura 3. 14: Colocación del sensor láser. ....	26
Figura 3. 15: Detalle del sensor láser.....	26
Figura 3. 16: Sensor láser HL-G112-A-C5.....	27
Figura 3. 17: Captura de las características del sensor láser en Dewesoft.....	27
Figura 3. 18: SIRIUS HD-STG [6]. ....	28
Figura 3. 19: Conexión de los acelerómetros y el sensor láser. ....	28
Figura 3. 20: Conexión frontales. ....	29
Figura 3. 21: Captura del módulo Chanel Setup.....	29
Figura 3. 22: Captura del módulo Recorder.....	30
Figura 3. 23: Captura del módulo MT Measure. ....	30
Figura 3. 24: Cable metálico de 19 hilos [10].....	31
Figura 3. 25: Bobina de cables metálicos 1x19. ....	32
Figura 3. 26: Colocación bobina de cables metálicos 1x19. ....	32
Figura 3. 27: Cable de acero inoxidable de 6x7 hilos [11].....	33
Figura 3. 28: Bobina de cables metálicos 6x7 .....	33



Figura 3. 29: Colocación bobina de cables metálicos 6x7 .....34

Figura 3. 30: Batería de 12 cables 1x19 ..... 34

Figura 3. 31: Colocación de la batería de cables 1x19. .... 35

Figura 3. 32: Perno en forma de U. .... 35

Figura 3. 33: Steering Damper de FXCNC Racing [13]. .... 36

Figura 3. 34: Colocación del Steering Damper en una moto [12]. .... 36

Figura 3. 35: Colocación del Steering Damper en el TMD. .... 36

Figura 3. 36: Finales de carrera. .... 37

Figura 3. 37: Imanes y placa de cobre..... 37

Figura 3. 38: Colocación del amortiguador magnético..... 38

Figura 3. 39: Colocación del amortiguador magnético a ambos lados..... 39

Capítulo 4

Figura 4. 1: Captura de Measure de Analyse. .... 41

Figura 4. 2: Ventana selección de datos. .... 42

Figura 4. 3: Script envolvente exponencial..... 43

Figura 4. 4: Captura de pantalla del Paso 1..... 44

Figura 4. 5: Ventana para introducir los límites de división ..... 44

Figura 4. 6: Captura de pantalla del Paso 3..... 45

Figura 4. 7: Ventana de la frecuencia propia. .... 45

Figura 4. 8: Código Matlab paso 1. .... 56

Figura 4. 9: Código Matlab paso 2. .... 56

Figura 4. 10: Captura de la herramienta cftool..... 56

Figura 4. 11: Captura del código findpeaks. .... 67

Figura 4. 12: Captura del Excel para Decremento Logarítmico. .... 68

Capítulo 5

Figura 5. 1: Captura de pantalla módulo Modal Test. .... 73

Figura 5. 2: Captura de pantalla FRF. .... 74

Figura 5. 3: Ventana con el factor de amortiguamiento calculado por el Peak-Picking.  
..... 74

Figura 5. 4: Diagrama de Nyquist..... 76

Figura 5. 5: Ventana con el factor de amortiguamiento calculado por el Curve Fit. 77

Figura 5. 6: Captura del módulo Export en .xlsx..... 78

Figura 5. 7: Código Matlab paso 2. .... 79

Figura 5. 8: Cálculo de la frecuencia propia de la señal. .... 79

Figura 5. 9: Captura de la herramienta cftool. .... 79

Capítulo 6

Figura 6. 1: Lámina de neopreno colocada entre las ballestas..... 93

Anexo A

Figura A. 1: Conexión de cables. .... 97

Figura A. 2: Captura aplicación Simunak..... 97

Figura A. 3: Captura del Manual Motion. .... 98

Figura A. 4: Captura del Rumble parameters. .... 98





Anexo B

Figura B. 1: Ventana Setup Files. ....	101
Figura B. 2: Ventana con los diferentes puertos conectados. ....	101
Figura B. 3: Configuración MT. ....	102
Figura B. 4: Configuración Recorder de Measure. ....	102
Figura B. 5: Configuración MT Measure.....	103





# ÍNDICE DE TABLAS

## Capítulo 3

Tabla 3. 1: Especificaciones mecánicas de la plataforma [7].	19
Tabla 3. 2: Dimensiones estructura fija.	20
Tabla 3. 3: Dimensiones soporte móvil.	21
Tabla 3. 4: Dimensiones ballestas.	22
Tabla 3. 5: Dimensiones listones metálicos.	23
Tabla 3. 6: Dimensiones amortiguador magnético.	38

## Capítulo 4

Tabla 4. 1: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la configuración inicial.	47
Tabla 4. 2: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la bobina de 1x19 de 7 espiras.	48
Tabla 4. 3: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la bobina de 6x7 de 8 espiras.	50
Tabla 4. 4: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la batería de 12 cables.	51
Tabla 4. 5: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador viscoso.	52
Tabla 4. 6: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador magnético simple.	53
Tabla 4. 7: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador magnético doble.	53
Tabla 4. 8: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador por fricción seca simple.	54
Tabla 4. 9: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador por fricción seca doble.	55
Tabla 4. 10: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la configuración inicial (tiempo).	58
Tabla 4. 11: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 1x19 de 7 espiras (tiempo).	59
Tabla 4. 12: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 6x7 de 8 espiras (tiempo).	60
Tabla 4. 13: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la batería de 12 cables metálicos (tiempo).	61
Tabla 4. 14: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador viscoso (tiempo).	62
Tabla 4. 15: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético simple (tiempo).	63



Tabla 4. 16: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético doble (tiempo)..... 64

Tabla 4. 17: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca simple (tiempo). ..... 65

Tabla 4. 18: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca doble (tiempo). ..... 66

Tabla 4. 19: Factores de amortiguamiento s obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la configuración inicial. .... 69

Tabla 4. 20: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la bobina de 1x19 de 7 espiras. .... 69

Tabla 4. 21: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la bobina de 6x7 de 8 espiras..... 69

Tabla 4. 22: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la batería de 12 cables..... 70

Tabla 4. 23: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador viscoso..... 70

Tabla 4. 24: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador magnético simple. .... 70

Tabla 4. 25: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador magnético doble..... 71

Tabla 4. 26: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador de fricción seca simple. .... 71

Tabla 4. 27: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador de fricción seca doble. .... 71

Capítulo 5

Tabla 5. 1: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Peak-Picking. .... 75

Tabla 5. 2: Coeficientes de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Peak-Picking..... 76

Tabla 5. 3: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Circle-Fit. ... 77

Tabla 5. 4: Coeficientes de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Circle-Fit. .... 78

Tabla 5. 5: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la configuración inicial (frecuencia)..... 81

Tabla 5. 6: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 1x19 de 7 espiras (frecuencia). ..... 82

Tabla 5. 7: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 6x7 de 8 espiras (frecuencia). .... 83

Tabla 5. 8: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la batería de 12 cables metálicos (frecuencia). ..... 83

Tabla 5. 9: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador viscoso (frecuencia). .... 84



Tabla 5. 10 Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético simple (frecuencia).....85

Tabla 5. 11: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético doble (frecuencia).....86

Tabla 5. 12: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca simple (frecuencia). .....87

Tabla 5. 13: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca doble (frecuencia)..... 88

Capítulo 6

Tabla 6. 1: Resultados obtenidos para la configuración inicial. ....89

Tabla 6. 2: Resultados obtenidos para la bobina de cables 1x19 de 7 espiras. ....90

Tabla 6. 3: Resultados obtenidos para la bobina de cables 6x7 de 8 espiras. ....90

Tabla 6. 4: Resultados obtenidos para la batería de 12 cables metálicos.....91

Tabla 6. 5: Resultados obtenidos para el amortiguador viscoso.....91

Tabla 6. 6: Resultados obtenidos para el amortiguador magnético simple. ....91

Tabla 6. 7: Resultados obtenidos para el amortiguador magnético doble. ....92

Tabla 6. 8: Resultados obtenidos para el amortiguador de fricción seca simple.....92

Tabla 6. 9: Resultados obtenidos para el amortiguador de fricción seca doble .....92

Anexo C

Tabla C. 1: Recogida de datos para el cálculo del peso del soporte móvil ..... 106

Tabla C. 2: Resolución de la ecuación 65. .... 106

Tabla C. 3: Resultados obtenidos de la masa del soporte móvil. .... 106





# ÍNDICE DE GRÁFICAS

## Capítulo 4

Gráfica 4. 1: Resultado final de la función getDamping3. ....46

Gráfica 4. 2: FFT para la configuración inicial. ....46

Gráfica 4. 3: Envolvente exponencial de la configuración inicial.....47

Gráfica 4. 4: FFT para la bobina de 1x19 de 7 espiras. ....48

Gráfica 4. 5: Envolvente exponencial de la bobina de 1x19 de 7 espiras. ....48

Gráfica 4. 6: FFT para la bobina de 6x7 de 8 espiras.....49

Gráfica 4. 7: Envolvente exponencial de la bobina de 6x7 de 8 espiras. ....49

Gráfica 4. 8: FFT para la batería de 12 cables.....50

Gráfica 4. 9: Envolvente exponencial de la batería de 12 cables. ....50

Gráfica 4. 10: Envolvente exponencial del amortiguador viscoso.....51

Gráfica 4. 11: Envolvente exponencial del amortiguador magnético simple.....52

Gráfica 4. 12: Envolvente exponencial del amortiguador magnético doble. ....53

Gráfica 4. 13: Envolvente exponencial del amortiguador de fricción seca simple...54

Gráfica 4. 14: Envolvente exponencial del amortiguador de fricción seca doble. ...55

Gráfica 4. 15: Curve-Fitting de la configuración inicial (tiempo). ....58

Gráfica 4. 16: Curve-Fitting de la bobina de 1x19 de 7 espiras (tiempo). ....59

Gráfica 4. 17: Curve-Fitting de la bobina de 6x7 de 8 espiras (tiempo). ....60

Gráfica 4. 18: Curve-Fitting de la batería de 12 cables metálicos (tiempo). ....61

Gráfica 4. 19: Curve-Fitting del amortiguador viscoso (tiempo).....62

Gráfica 4. 20: Curve-Fitting del amortiguador magnético simple. ....63

Gráfica 4. 21: Curve-Fitting del amortiguador magnético doble (tiempo).....64

Gráfica 4. 22: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca simple (tiempo). ....65

Gráfica 4. 23: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca doble (tiempo). ....65

## Capítulo 5

Gráfica 5. 1: Curve-Fitting de la configuración inicial (frecuencia). ....81

Gráfica 5. 2: Curve-Fitting de la bobina de 1x19 de 7 espiras (frecuencia). ....82

Gráfica 5. 3: Curve-Fitting de la bobina de 6x7 de 8 espiras (frecuencia).....82

Gráfica 5. 4: Curve-Fitting de la batería de 12 cables metálicos (frecuencia).....83

Gráfica 5. 5: Curve-Fitting del amortiguador viscoso (frecuencia).....84

Gráfica 5. 6: Curve-Fitting del amortiguador magnético simple (frecuencia). ....85

Gráfica 5. 7: Curve-Fitting del amortiguador magnético doble (frecuencia). ....86

Gráfica 5. 8: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca simple (frecuencia)...87

Gráfica 5. 9: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca doble (frecuencia). ...88







# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

El presente Trabajo Fin de Grado responde a una doble finalidad: por un lado, ser el broche final a los estudios en el Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Valladolid; y por otro, adquirir nuevos conocimientos sobre el comportamiento dinámico de las estructuras de la vida cotidiana.

El estudio de la preservación de las construcciones de ingeniería civil es una preocupación muy importante tanto para investigadores como ingenieros a lo largo de la historia moderna. Y hoy en día mucho más, debido a que las nuevas estructuras tienden a tener un diseño más esbelto, flexible y de gran tamaño. Su preservación se ve afectada tanto por las acciones dinámicas del terreno y de la climatología, como por las cargas estáticas o dinámicas que afectan a su estructura.

Actualmente, el diseño y construcción de puentes y pasarelas poseen una serie de normativas que profundizan en los posibles problemas dinámicos. Con instrucciones más estrictas en la fase de diseño para asegurar el correcto estado de servicio de estas estructuras a lo largo del tiempo.

Dentro de estas posibles acciones, se va a centrar en el estudio de la naturaleza física del fenómeno de las vibraciones y principalmente en su mitigación con el uso de amortiguadores. Cuando una estructura vibra puede dar lugar a graves problemas además de limitar las características operativas de la misma. Es por ello por lo que se han llevado a cabo numerosos estudios con el objetivo de mejorar el conocimiento actual del comportamiento de este tipo de estructuras para asegurar el correcto estado de servicio a lo largo del tiempo.

Pero en este caso, no se van a estudiar el comportamiento de una estructura ante vibraciones, sino que se va a evaluar el comportamiento de diferentes tipos de amortiguación. Para ello, la plataforma de movimiento Simumak utilizada para la realización de los diferentes experimentos puede asemejarse a las vibraciones producidas por el tránsito de peatones en puentes o pasarelas, ya que la frecuencia propia del sistema inicialmente es muy semejante a los pasos de un ser humano cuando camina a una velocidad normal, en torno a 1.5 Hz.

Por lo tanto, se ha decidido utilizar el TMD, ya presente en el laboratorio, para estudiar la influencia de diferentes tipos de amortiguación sobre las vibraciones producidas en el sistema. Y dentro de los numerosos tipos de amortiguación se van a evaluar el amortiguamiento viscoso, el magnético, por fricción seca y por micro-



fricciones de cables metálicos. En los que para su diseño se utilizarán los diferentes materiales y herramientas proporcionadas por el laboratorio del departamento.

## 1.2 Objetivos

Los principales objetivos que se han fijados a la hora de realizar este trabajo son los siguientes:

- Uso de equipos instrumentales profesionales para identificar el comportamiento dinámico del sistema ensayado. Para ello se han utilizado diferentes acelerómetros, sensores láser y el hardware SIRIUS HD-STG.
- Diseñar y prototipar diferentes tipos de amortiguadores con los materiales presentes en el laboratorio del departamento.
- Evaluar el factor de amortiguamiento en el dominio del tiempo y de la frecuencia para cada uno de los amortiguadores diseñados.
- Adquirir nuevos conocimientos sobre el comportamiento dinámico de las vibraciones, los amortiguadores y de los sistemas de 1 grado de libertad.

## 1.3 Metodología

Este Trabajo Fin de Grado está dividido en siete capítulos que tratan sobre:

- En este primer capítulo se recoge la introducción, los objetivos principales que se buscan conseguir y la metodología empleada.
- El segundo corresponde a una breve explicación de los fundamentos teóricos básicos de los sistemas de 1 grado de libertad, donde se explican los diferentes factores que intervienen y que posteriormente se van a calcular.
- En el tercer capítulo se detallan los diferentes aparatos e instrumentos que conforman el banco de ensayos, así como el diseño de cada uno de los amortiguadores que posteriormente se van a ensayar.
- En el cuarto capítulo se realiza la evaluación del factor de amortiguamiento en el dominio del tiempo en el que se utilizan tres métodos diferentes.



- El quinto capítulo recoge la evaluación del factor de amortiguamiento en el dominio de la frecuencia, en el que también se utilizan tres métodos diferentes.
- El capítulo seis contiene las conclusiones extraídas del trabajo con la comparación de los resultados obtenidos en los dos capítulos anteriores, además de las líneas futuras.
- Y el capítulo número siete corresponde a las referencias bibliográficas utilizadas durante su elaboración.

Para completar el trabajo se añaden tres anexos en los que se explican las instrucciones básicas para arranque y posterior funcionamiento de la plataforma de movimiento Simumak, la configuración del software DEWEsoft X3 para la correcta obtención de los datos pertinentes, y el cálculo de la masa del soporte móvil que forma parte del TMD.

Por último, hay que indicar que debido al formato de números decimales usado por el software DEWEsoft, la parte entera y decimal de todos los números expuestos en este trabajo están separados por un punto.



## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Introducción

Los sistemas mecánicos poseen una serie de propiedades intrínsecas que los caracterizan, como son la masa, la elasticidad y el amortiguamiento.

Estos sistemas se ven sometidos a fuerzas internas y externas dando lugar a un posible movimiento relativo entre las partículas que lo componen. Si este movimiento se repite en un intervalo de tiempo se denomina vibración.

La gran mayoría de máquinas y estructuras poseen elementos elásticos y en consecuencia un número infinito de grados de libertad. Según el número de grados de libertad existen dos sistemas: sistemas continuos, con infinitos grados de libertad, y sistemas discretos que tienen un número finito.

Dentro de los diferentes tipos de sistemas de vibraciones se va a estudiar el sistema con un grado de libertad, el cual tiene una gran importancia en la Teoría de Vibraciones porque:

- Son los sistemas más sencillos
- Muchas de sus propiedades aparecen en sistemas de más grados de libertad.
- Mediante la técnica del análisis modal, los sistemas lineales con  $n$  grados de libertad pueden resolverse suponiendo  $n$  sistemas con 1 grado de libertad. Es decir, sólo es necesario especificar una coordenada para describir su movimiento.

### 2.2 Sistema discreto de 1 grado de libertad

En el sistema discreto básico de un grado de libertad actúan los siguientes parámetros, como se pueden ver en la Figura 2.1:

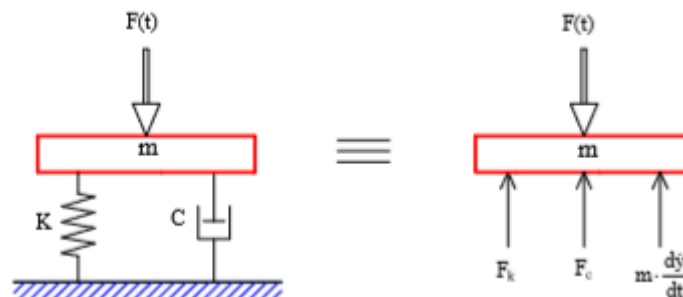


Figura 2. 1 Sistema dinámico de 1 grado de libertad [4].

- M: masa indeformable la cual almacena la energía cinética del sistema.
- K: constante del muelle, de masa despreciable frente a M, en la cual se almacena la energía potencial elástica.

$$F_k(t) = -kx(t) \quad (1)$$

- C: constante de amortiguación, donde tiene lugar la disipación de energía.

$$F_c(t) = -c\dot{x}(t) \quad (2)$$

- Coordenada x: indica el movimiento del sistema y de la que derivan la velocidad y la aceleración.
- F: fuerza externa aplicada sobre el sistema.

Aplicando la segunda Ley de Newton, la ecuación del movimiento del sistema discreto básico queda:

$$\sum F_{ext} = m\ddot{x}(t)$$

$$F(t) + F_k(t) + F_c(t) = m\ddot{x}(t) \quad (3)$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t)$$

A esta ecuación se le denomina Ecuación Diferencial General del Movimiento.

Dentro de los sistemas de un grado de libertad se encuentran distintos tipos según la naturaleza de las vibraciones. Existen las vibraciones libres y las vibraciones forzadas, las cuales se explicarán con más detalle a continuación.

### 2.3 Vibraciones libres

En los sistemas sometidos a vibraciones libres no existe la fuerza exterior F(t), pero si existe unas condiciones iniciales no nulas. Por lo que se obtiene la siguiente ecuación:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (4)$$

Dentro de las vibraciones libres se estudiarán el caso sin amortiguamiento y con amortiguamiento, para obtener características importantes de este tipo de movimiento.

### 2.3.1 Vibraciones libres sin amortiguamiento.

Como su propio nombre indica, el coeficiente de amortiguamiento,  $c$ , es nulo y el sistema sólo contará con un muelle y una masa. Por lo que la ecuación 4 queda:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (5)$$

Y dividiendo por la masa a toda la ecuación:

$$\ddot{x}(t) + w_0^2 x(t) = 0 \quad (6)$$

En donde  $w_0$  se la conoce como frecuencia natural del sistema. Representa la relación entre el parámetro elástico  $k$  y el inercial  $m$ , cuyas unidades son rad/seg.

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

Resolviendo la ecuación diferencial 6, su solución es del tipo:

$$x(t) = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} \quad (8)$$

Donde sus raíces  $s_1$  y  $s_2$  se obtienen resolviendo su ecuación característica:

$$s^2 + w_0^2 = 0 \quad s_{1,2} = \pm i \cdot w_0 \quad (9)$$

Por lo tanto, sustituyendo los valores de las raíces en la ecuación (8) queda:

$$x(t) = C_1 e^{-iw_0 t} + C_2 e^{iw_0 t} \quad (10)$$

La cual aplicando las propiedades del número  $e$  cuando está elevado a un número imaginario, se obtiene otra expresión para la ecuación (10):

$$x(t) = A \sin(w_0 t) + B \cos(w_0 t) \quad (11)$$

Donde  $A$  y  $B$  son dos nuevas constantes que dependerán de las condiciones iniciales a las que esté sometido el sistema de 1 grado de libertad.

### 2.3.2 Vibraciones libres amortiguadas.

En este apartado se expondrán los fundamentos teóricos de los diferentes tipos de amortiguadores que se van a ensayar para la evaluación del factor de amortiguamiento tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

El amortiguamiento es el proceso por el cual una vibración disminuye de amplitud. Existen distintos tipos de amortiguamiento, siendo los más importantes:

- Amortiguación fluida: puede ser viscosa o turbulenta.
- Amortiguación por fricción seca o de Coulomb.
- Amortiguación histéretica o estructural.

### 2.3.2.1 Amortiguamiento viscoso

Es el mecanismo de amortiguación más usado, en donde un medio fluido presenta una resistencia al movimiento del sistema dando lugar a una disipación de energía.

El amortiguamiento viscoso tiene la ventaja de poder linealizar la ecuación del movimiento, en donde la fuerza de amortiguamiento será proporcional a la velocidad, siempre que la amortiguación esté producida por un flujo laminar de fluido viscoso y que las fuerzas disipativas sean de un orden pequeño. Entonces:

$$F_c(t) = -c\dot{x}(t) \quad (12)$$

La ecuación del movimiento para amortiguación viscosa y vibraciones libres es la misma que la ecuación 4 pero se suele reescribir de la siguiente forma, dividiendo todo entre la masa  $m$ :

$$\ddot{x}(t) + 2 \cdot \xi \cdot w_0 \cdot \dot{x}(t) + w_0^2 x(t) = 0 \quad (13)$$

Donde se define un nuevo parámetro denominado factor de amortiguamiento, y que es el parámetro más importante de este trabajo. Es adimensional, aunque es común dar su valor en %:

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{k \cdot m}} = \frac{c}{2 \cdot m \cdot w_0} \quad (14)$$

Resolviendo la ecuación característica de la ecuación diferencial (13):

$$s^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_0 \cdot s + w_0^2 = 0 \quad (15)$$

Y sus raíces:

$$s_{1-2} = w_0 \cdot \left( -\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \quad (16)$$

Como se puede apreciar, dependiendo del factor de amortiguamiento se obtendrá tres tipos de raíces y por tanto tres tipos de movimientos:

- **Movimiento sobreamortiguado ( $\xi > 1$ )**

Si el factor de amortiguamiento es mayor que 1 se obtienen dos raíces reales dando lugar al denominado movimiento sobreamortiguado. Estas raíces



siempre van a ser negativas, lo que implica que la función  $x(t)$  sea decreciente con el tiempo.

$$x(t) = C_1 e^{(-\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})t} + C_2 e^{(-\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})t} \quad (17)$$

En la siguiente Figura se puede apreciar la representación del movimiento sobreamortiguado para diferentes condiciones de velocidad inicial del sistema. Todas ellas tienden a regresar a la posición de equilibrio sin que se produzca ninguna oscilación. Por lo tanto, no se produce ningún movimiento vibratorio en sistemas sobreamortiguados.

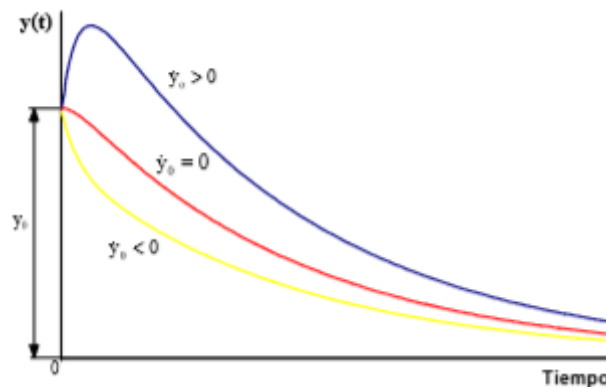


Figura 2. 2: Representación gráfica del movimiento sobreamortiguado [4].

- **Movimiento subamortiguado ( $\xi < 1$ )**

Si el factor de amortiguamiento es menor que 1 se obtienen dos raíces complejas dando lugar al denominado movimiento subamortiguado. Las raíces complejas se reescriben para introducir un nuevo término:

$$s_{1-2} = -\xi \cdot w_o \pm i \cdot w_d \quad (18)$$

En donde  $w_d$  recibe el nombre frecuencia angular amortiguada del movimiento:

$$w_d = w_o \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \quad (19)$$

La solución de la ecuación diferencial es:

$$x(t) = C_1 e^{(-\xi \cdot w_o + i \cdot w_d)t} + C_2 e^{(-\xi \cdot w_o - i \cdot w_d)t} \quad (20)$$

Que aplicando las fórmulas de Euler para exponenciales:

$$x(t) = e^{(-\xi \cdot w_o)t} \cdot (A_1 \cos(w_d t) + A_2 \sin(w_d t)) \quad (21)$$

Donde  $A_1$  y  $A_2$  son constantes que dependen de las condiciones iniciales.  $A$  recibe el nombre de amplitud y  $\varphi$  es el ángulo de fase.

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \sqrt{\frac{(v_o + \xi \cdot w_o \cdot x_o)^2 + (x_o \cdot w_d)^2}{w_d^2}} \quad (22)$$

$$\varphi = \arctan \frac{x_o \cdot w_d}{v_o + \xi \cdot w_o \cdot x_o} \quad (23)$$

En la siguiente Figura se puede apreciar la representación del movimiento subamortiguado de uno de los ensayos realizados. En este caso si que se producen oscilaciones y por lo tanto existe un movimiento vibratorio.

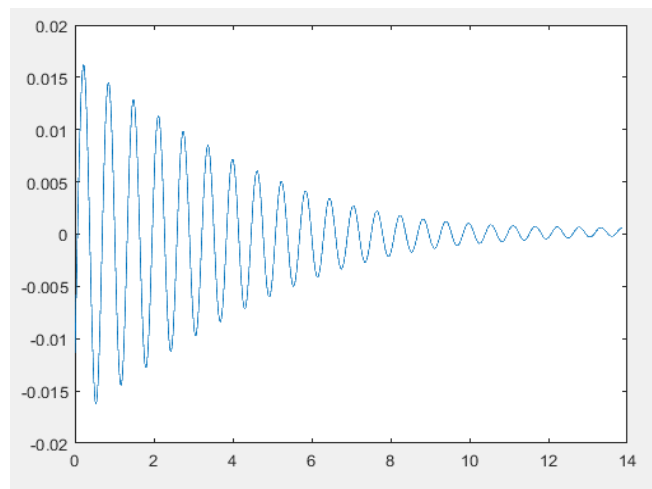


Figura 2. 3: Representación gráfica del movimiento subamortiguado.

Esta curva sigue la siguiente expresión, derivada de la ecuación 21, que será utilizada en capítulos posteriores para el cálculo del factor de amortiguamiento:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot e^{(-\xi \cdot \omega_o)t} + ruido \quad (24)$$

- **Movimiento críticamente amortiguado ( $\xi = 1$ )**

Si el factor de amortiguamiento es exactamente 1 se obtiene una raíz doble negativa. Representa un caso límite en el que la influencia de los elementos elásticos supera a los efectos amortiguadores, dando lugar a una oscilación. Las raíces de la ecuación característica y la correspondiente solución de la ecuación diferencial son:

$$s_{1-2} = -\omega_o \quad (25)$$

$$x(t) = (C_1 + C_2 \cdot t)e^{(-\omega_o)t} \quad (26)$$

Como ejemplo del movimiento críticamente amortiguado se muestra la siguiente Figura en la que se compara con otro movimiento sobreamortiguado.

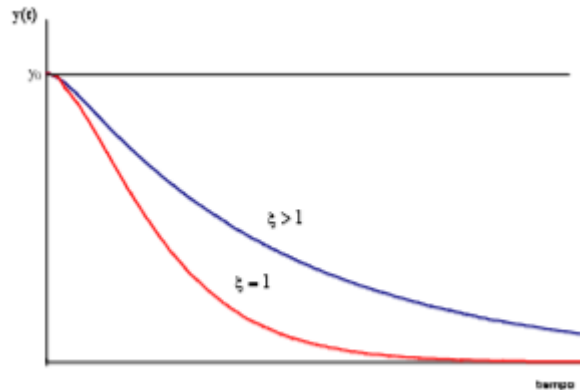


Figura 2. 4: Representación gráfica del movimiento críticamente amortiguado [4].

### 2.3.2.2 Amortiguamiento histetérico

Todas las estructuras y materiales poseen amortiguamiento interno el cuál retira la energía mecánica de un sistema vibratorio mediante su conversión en calor debido a la fricción interna molecular.

Por ejemplo, en una viga de metal vibrando, el amortiguamiento estructural se puede describir por una fuerza proporcional al desplazamiento, pero en fase con la velocidad.

El modelo de amortiguamiento en este caso se relaciona con el ciclo de histéresis que presenta el diagrama tensión-deformación de un sistema que oscila en torno a su posición de equilibrio estático, y en donde el área encerrada corresponde a la energía disipada en un ciclo de vibración.

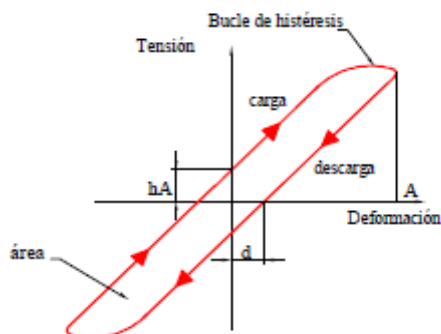


Figura 2. 5: Ciclo de histéresis [4].

Aparece una nueva constante,  $h$ , denominada constante de amortiguamiento histerético, la cuál es una propiedad de cada material o estructura en función de la curva de histéresis.

$$h = c \cdot w \quad (27)$$

Si el sistema vibra a su frecuencia natural y teniendo en cuenta la ecuación (27), la constante  $h$  se puede reescribir como:

$$h = 2 \cdot \xi \cdot w_0^2 \cdot m = 2 \cdot \xi \cdot k \quad (28)$$

### 2.3.2.3 Amortiguamiento por fricción seca

También denominado amortiguamiento de Coulomb, corresponde a un caso de amortiguamiento no lineal producido por fricción entre superficies rugosas secas o con lubricación insuficiente. Su valor es constante y siempre opuesto a la dirección del movimiento. Por esta razón es necesario establecer dos ecuaciones para describir el movimiento del sistema en ambas direcciones del movimiento.

La fuerza de disipación debida al amortiguamiento por fricción seca se define por el coeficiente dinámico de rozamiento,  $\mu_d$ , y por la fuerza normal,  $N$ :

$$F_d(\dot{y}) = \mu_d \cdot N \quad (29)$$

Para el caso de  $\dot{y} > 0$ , movimiento en dirección positiva, la ecuación del movimiento es:

$$m\ddot{y}(t) + ky(t) = -\mu_d \cdot N \quad (30)$$

Y cuya solución es:

$$y(t) = A_1 \cdot \sin(w_0 t) + B_1 \cos(w_0 t) - \frac{\mu_d \cdot N}{k} \quad (31)$$

Para el caso de  $\dot{y} < 0$ , movimiento en dirección negativa:

$$m\ddot{y}(t) + ky(t) = \mu_d \cdot N \quad (32)$$

Y cuya solución es:

$$y(t) = A_2 \cdot \sin(w_0 t) + B_2 \cos(w_0 t) + \frac{\mu_d \cdot N}{k} \quad (33)$$

Donde las constantes  $A_1, A_2, B_1, B_2$  dependen de las condiciones iniciales en cada semiciclo sucesivo.

Este tipo de amortiguamiento también se puede asemejar a los amortiguadores formados por cables metálicos en donde la disipación de energía se debe al micro rozamiento entre los hilos que forman el cable. Y cuanto mayor sea el contacto entre ellos mayor será la energía disipada y por tanto mayor será el factor de amortiguamiento.

### 2.4 Vibraciones forzadas amortiguadas

Este es el caso más general que se produce en la realidad, debido a que las vibraciones que presenta un sistema mecánico se producen debido a la aplicación de fuerzas variables en el tiempo sobre el propio sistema.

La respuesta de este tipo de sistema se denomina Vibración Forzada y cuya ecuación del movimiento correspondiente a la figura 2.6 es:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F(t) \tag{34}$$

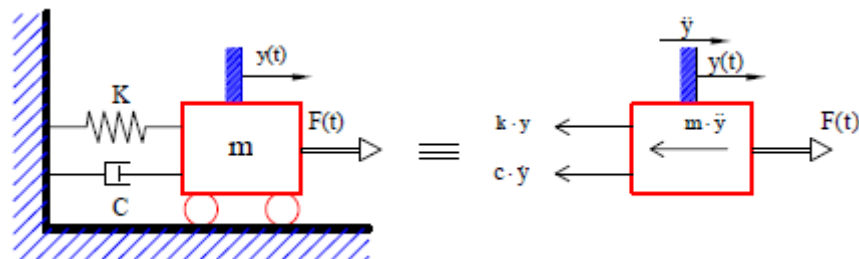


Figura 2. 6: Sistema dinámico de 1 grado de libertad forzado [4].

La solución de la ecuación diferencial 34 se divide de la siguiente forma, una solución de la ecuación homogénea y otra de la solución particular, que dependerá de  $F(t)$ .

$$y(t) = y_H(t) + y_P(t) \tag{35}$$

$$y_H(t) = e^{(-\xi \cdot \omega_0)t} \cdot (C_1 \cos(\omega_d t) + C_2 \sin(\omega_d t)) \tag{36}$$

La solución homogénea corresponde al término transitorio ya que cuando  $t$  tiende a infinito el valor de  $y_H(t)$  tiende a cero. Y la solución particular corresponde al término permanente en el tiempo.

Las vibraciones forzadas pueden ser producidas por cargas constantes, por excitaciones armónicas o por impulsos.

#### 2.4.1: Vibraciones forzadas por excitaciones armónicas

Considerando el sistema formado por una masa, un muelle y un amortiguador sometido a la acción de una fuerza exterior  $F(t)$  de la siguiente forma:

$$F(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (37)$$

En donde  $F_0$  corresponde a la amplitud de la fuerza aplicada y  $\omega$ , a la frecuencia de excitación de dicha fuerza.

Volviendo a la ecuación 34, se obtiene la siguiente ecuación diferencial del movimiento:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (38)$$

La solución de la ecuación homogénea es la misma que la ecuación 36 y la solución de la ecuación particular sigue la siguiente expresión:

$$y_p = B_1 \cdot \sin(\omega t) + B_2 \cdot \cos(\omega t) \quad (39)$$

Las constantes  $B_1$  y  $B_2$  se calcularán derivando dos veces la ecuación anterior, sustituir  $\ddot{y}$  e  $\dot{y}$  en la ecuación 38 y resolviendo el sistema formado por los términos que acompañan al seno y al coseno. De esta forma la solución de la ecuación particular para el caso de vibración forzada por excitaciones armónicas queda:

$$y_p = \frac{F_0 \cdot c \cdot \omega}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + c^2 \cdot \omega^2} \sin(\omega t) + \frac{F_0 (k - m \cdot \omega^2)}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + c^2 \cdot \omega^2} \cos(\omega t) \quad (40)$$

Pero esta ecuación no suele aparecer así, si no que se puede escribir de una forma más compacta añadiendo dos nuevos términos:

$$y_p = \chi \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad (41)$$

Donde:

- $\chi$  es la amplitud del movimiento:  $\chi = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (c \cdot \omega)^2}}$  (42)

- $\varphi$  es el ángulo de fase:  $\varphi = \arctg \frac{c \cdot \omega}{k - m \cdot \omega^2}$  (43)

### 2.4.2 Sistemas con excitación en la base

El modelo de excitación en la base es el que se sigue para la evaluación del amortiguamiento en el dominio de la frecuencia realizado en el capítulo 5. Su principal interés radica en la semejanza al estudio de edificios sometidos a movimientos sísmicos.

En la Figura 2.7 se muestra la equivalencia del banco de ensayos simplificado a un sistema de un grado de libertad. Y está formado por:

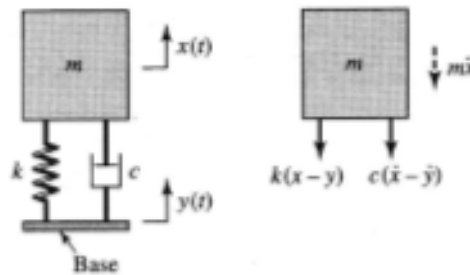


Figura 2. 7: Sistema dinámico de 1 grado de libertad con excitación en la base [1].

- Base: corresponde a la plataforma de movimiento Simunak.
- Masa m: engloba la masa móvil formada por los listones y el soporte móvil que conforman el TMD.
- K: constante de los muelles.
- C: coeficiente de amortiguamiento de los diferentes tipos de amortiguadores ensayados.
- X(t): desplazamiento de la masa móvil a partir de la posición de equilibrio estático del sistema. Velocidad absoluta.
- Y(t): desplazamiento de la base

Para la obtención de la ecuación del movimiento de la masa móvil en el dominio de la frecuencia primero se va a definir la coordenada relativa z(t):

$$z(t) = x(t) - y(t) \quad (44)$$

Aplicando el equilibrio de fuerzas dinámicas a la Figura 2. se obtiene:

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (45)$$

Para obtener la función de transferencia que relaciona la entrada con la salida, se aplica el teorema de Laplace para pasar la ecuación anterior al dominio en s:

$$s^2 \cdot m \cdot Z(s) + s \cdot c \cdot Z(s) + k \cdot Z(s) = -m \cdot s^2 \cdot Y(s) \quad (46)$$

Y la función de transferencia queda:

$$H = \frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{-m \cdot s^2}{s^2 \cdot m + s \cdot c + k} \quad (47)$$

Para pasarla al dominio de la frecuencia se aplica la conversión  $s = j \cdot \omega$ , por lo tanto, en la ecuación anterior se sustituye  $s$  por  $j\omega$  y se obtiene:

$$H = \frac{m \cdot \omega^2}{-m \cdot \omega^2 + j \cdot \omega \cdot c + k} \quad (48)$$

La cual dividiendo el numerador y el denominador por la masa y aplicando las relaciones 7 y 14 se obtiene una expresión que presenta las variables que se desean estudiar:

$$H = \frac{\omega^2}{-\omega^2 + j \cdot \omega \cdot \frac{c}{m} + \frac{k}{m}} = \frac{\omega^2}{-\omega^2 + j \cdot \omega \cdot 2 \cdot \xi \cdot \omega_o + \omega_o^2} \quad (49)$$

Se ha calculado la función de transferencia de la coordenada relativa  $z(t)$ , pero la que se va a estudiar en el capítulo 5 es la función de transferencia de la coordenada absoluta  $x(t)$ . Por lo tanto, se vuelve a la ecuación 44 que es equivalente en el tiempo y en el dominio en  $s$ :

$$Z(s) = X(s) - Y(s) \quad (50)$$

Que dividiendo cada término entre  $Y(s)$  se obtiene:

$$\frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{X(s) - Y(s)}{Y(s)} = \frac{X(s)}{Y(s)} - 1 \quad (51)$$

En donde se conoce  $\frac{Z(s)}{Y(s)}$  que es la ecuación 47, por lo que despejando  $\frac{X(s)}{Y(s)}$  y realizando las operaciones pertinentes se obtiene la función de transferencia de la coordenada absoluta:

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{Z(s)}{Y(s)} + 1 = \frac{-m \cdot s^2}{s^2 \cdot m + s \cdot c + k} + 1 = \frac{c \cdot s + k}{s^2 \cdot m + s \cdot c + k} \quad (52)$$

Para pasarla al dominio de la frecuencia se vuelve a aplicar la expresión  $s = j \cdot \omega$  y además se divide arriba y abajo entre la masa  $m$ , para volver a obtener la expresión con los coeficientes que se van a estudiar:

$$\frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} = \frac{j \cdot \omega \cdot c + k}{- \omega^2 \cdot m + j \cdot \omega \cdot c + k} = \frac{j \cdot \omega \cdot 2 \cdot \xi \cdot \omega_o + \omega_o^2}{- \omega^2 + j \cdot \omega \cdot 2 \cdot \xi \cdot \omega_o + \omega_o^2} \quad (53)$$



## 3. BANCO DE ENSAYOS

En este capítulo se explicarán los diferentes dispositivos que conforman el conjunto del banco de ensayos, como se puede ver en la Figura 3.1.

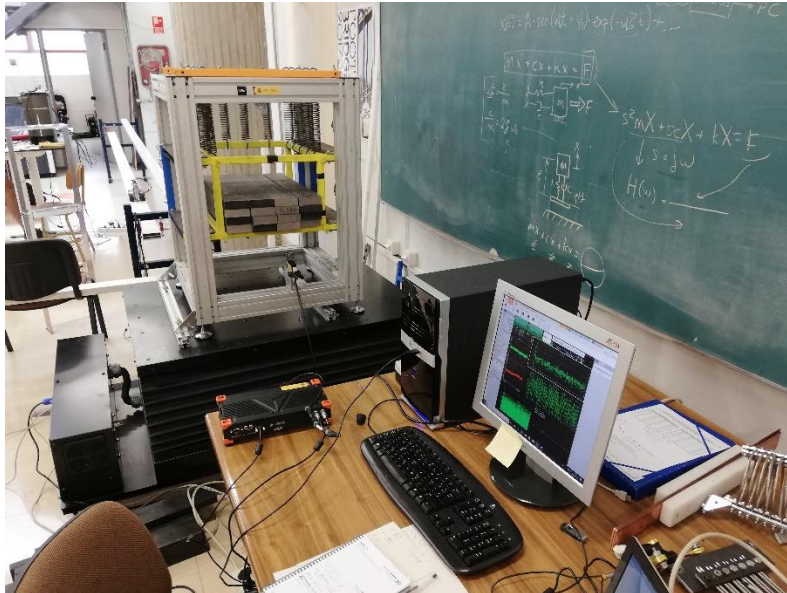


Figura 3. 1: Banco de ensayos.

Para la realización de la toma de datos experimentales se van a utilizar los siguientes elementos: plataforma de movimiento Simumak, TMD, acelerómetros, sensor láser, diferentes tipos de amortiguadores y dispositivo Sirius de Dewesoft. A continuación, se explicarán detalladamente cada elemento, su geometría, función y conexión.

### 3.1 Plataforma de movimiento Simumak

La plataforma de movimiento que se ha utilizado en el estudio de la amortiguación en el dominio de la frecuencia es el modelo SMK3DOF250MB de la marca Simumak.

Es una plataforma de movimiento electromecánica concebida para aplicaciones de simulación y movimiento controlado. Tiene tres grados de libertad en su movimiento y está preparada para soportar una carga constante de hasta 250 kg.

Para su conectividad con el sistema de simulación la plataforma incorpora un puerto Ethernet a través del cual se reciben, en tiempo real, las órdenes de posicionamiento. Y que se conectará a un ordenador, en dónde con la aplicación proporcionada por Simumak se elegirá el tipo de movimiento cómo se explica en el Anexo A.

Principalmente la plataforma se compone de tres partes como se puede observar en la Figura 3.2:

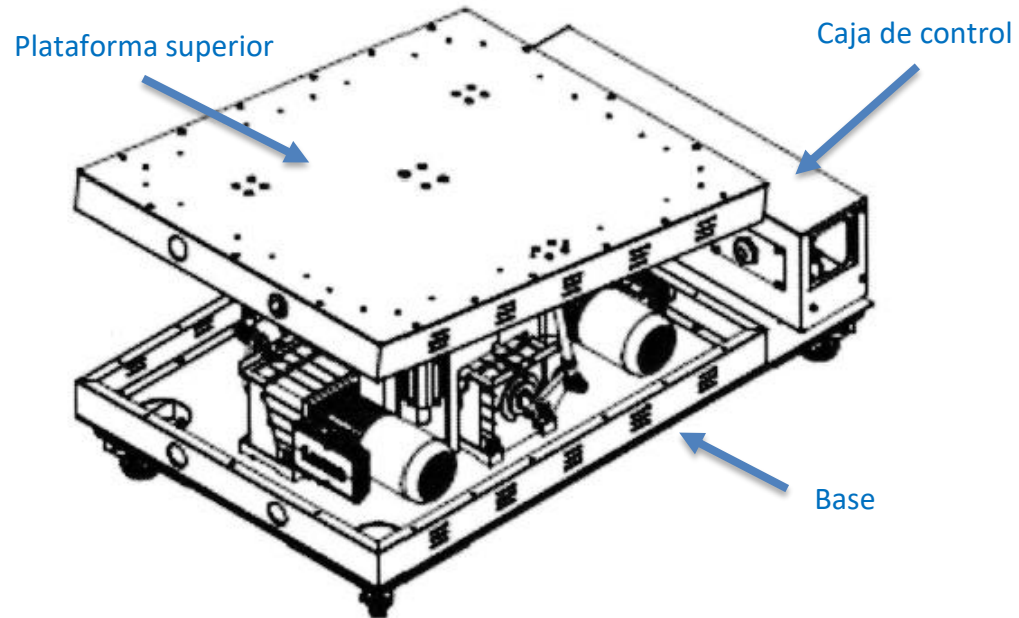


Figura 3. 2: Partes de la plataforma mecánica [7].

- Caja de control: Sistema por donde la plataforma recibe la alimentación, las órdenes de movimiento y de control de seguridad. Además, posee cuatro bombillas de diferentes colores que indican el estado de funcionamiento de la plataforma.
- Base: Estructura de soporte sobre la que se encuentra anclado todo el sistema motriz de la plataforma y la caja de control. La base posee cuatro ruedas con frenos para facilitar su desplazamiento.
- Plataforma superior: Estructura sobre la que se anclan los elementos que se quieran mover, en este caso el TMD. Dispone perforaciones en el perímetro de la superficie de chapa, que permitirán atornillar el TMD a la plataforma. Además, es posible realizar perforaciones con la ayuda de un taladro si es necesario.

A continuación, se muestra una tabla en donde se recogen las principales especificaciones mecánicas de la plataforma, cuyos valores se han obtenido de los diferentes libros proporcionados por Simumak:

PARÁMETRO	VALOR
Ancho	890 mm
Largo	1460 mm
Altura máxima	741 mm
Altura mínima	571 mm
Ángulo de inclinación frontal máximo (PITCH)	15.1°
Ángulo de inclinación lateral máximo (ROLL)	16.9°
Peso	300 Kg (sin carga)

Tabla 3. 1: Especificaciones mecánicas de la plataforma [7].

Y en las siguientes cuatro imágenes se pueden ver los parámetros anteriormente expuestos de forma esquemática:

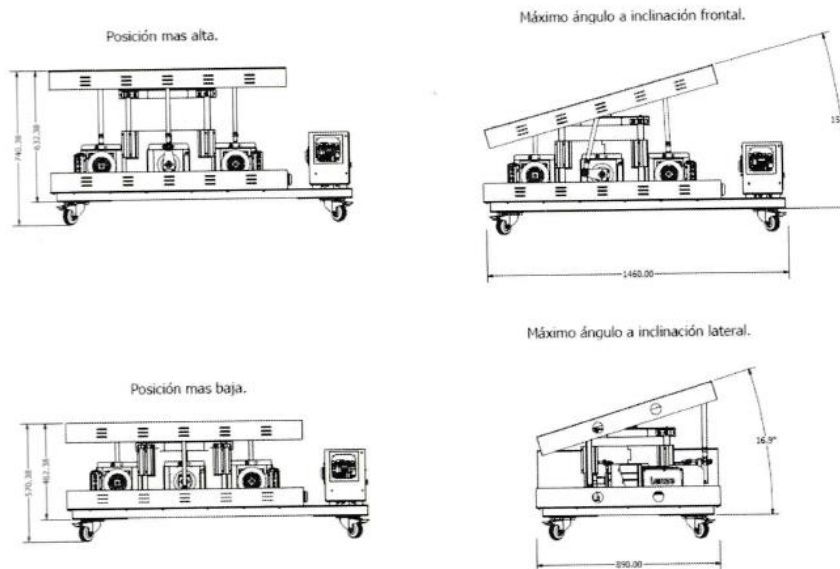


Figura 3. 3: Especificaciones mecánicas de la plataforma [7].

### 3.2 TMD

Según sus siglas en inglés Tuned Mass Damper, amortiguador de masa, es un dispositivo que consiste básicamente en una masa, un muelle y un amortiguador que se adjunta a su estructura con el objetivo de reducir la respuesta dinámica de la misma.

Para este trabajo el TMD utilizado ya se encontraba en el laboratorio, por lo que no se ha tenido ni que modificar ni que diseñar nuevas cosas. A continuación, se

realizará una breve descripción de las partes que los forman, como se puede ver en la Figura 3.4:

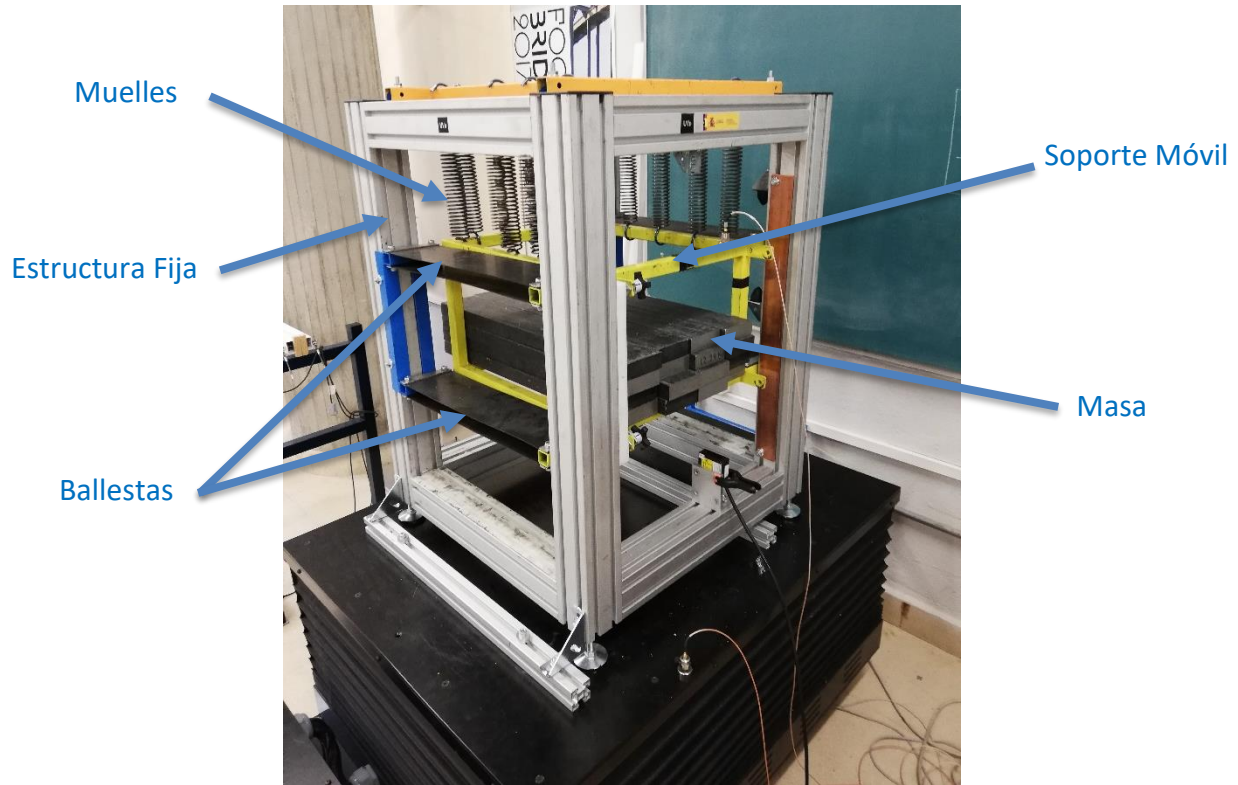


Figura 3. 4: Partes del TMD.

- Estructura Fija: elaborada con perfiles de aluminio de sección cuadrada de 80x80 mm. Estos perfiles disponen de ranuras en toda su longitud para introducir tornillos y poder facilitar la sujeción de los diferentes elementos que van anclados a ella. Su función es ser el elemento que une la plataforma mecánica y el soporte móvil. En la siguiente tabla se recogen las dimensiones de la estructura fija:

PARÁMETRO	VALOR
Ancho	660 mm
Largo	660 mm
Altura	860 mm

Tabla 3. 2: Dimensiones estructura fija.

- Soporte Móvil: estructura elaborada con perfiles metálicos huecos de sección cuadrada de 25x25 mm y espesor 1.8 mm. Este soporte hará la función de la masa dentro del TMD ya que se colocarán listones para aumentar el valor de la masa y así también el de la inercia. En la Tabla 3.3 se recogen las

principales dimensiones del soporte, en donde el cálculo de la masa está explicado en el Anexo C.

PARÁMETRO	VALOR
Ancho	420 mm
Largo	480 mm
Altura	300 mm
Peso	10.85 Kg

Tabla 3. 3: Dimensiones soporte móvil.

- Muelles: cómo se ha explicado al principio de este apartado, uno de los elementos que forman un TMD es el muelle. Para este caso se han utilizado 13 muelles dispuestos de la forma más simétrica posible para que la posición en reposo del TMD junto con el número de listones colocados sobre el soporte móvil, se obtenga como resultado que las ballestas estén lo más horizontal posible, como en la Figura 3.5. Siguiendo esta consigna se han colocado 4 muelles en la barra frontal, 5 muelles en la barra posterior y los 4 restantes en la barra lateral izquierda.

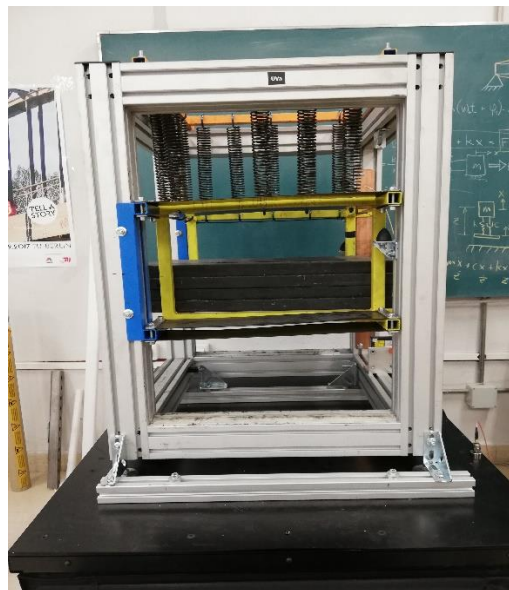


Figura 3. 5: Posición en reposo.

En cuanto a la colocación de los muelles, por el extremo superior, los muelles están unidos a una estructura formada por perfiles metálicos huecos de sección cuadrada de 25x25 mm y espesor 1.8 mm, la cual está anclada a los perfiles de aluminio de la Estructura Fija. Y por el extremo inferior están unidos al Soporte Móvil. Esta colocación se puede observar en la Figura 3.6.



Figura 3. 6: Colocación de los muelles.

- Ballestas: planchas metálicas unidas por un extremo a los perfiles de aluminio de la Estructura Fija y por el otro al Soporte Móvil, Figura 3.7. Estas ballestas aportan una pequeña amortiguación al sistema.



Figura 3. 7: Colocación de las ballestas.

Hay un total de 8 ballestas, 4 situadas en la parte frontal y otras 4 en la parte posterior. Como se puede observar en la Figura 3.7 están dispuestas de 2 en 2 con una separación entre ballestas de 30 mm. En la Tabla 3.4 se recogen sus dimensiones:

PARÁMETRO	VALOR
Largo	480 mm
Ancho	110 mm
Espesor	1.6 mm

Tabla 3. 4: Dimensiones ballestas.

- Masa: como se ha explicado antes sobre el Soporte Móvil se colocan un determinado número de listones metálicos macizos, con forma de prisma rectangular, para que la posición en reposo del TMD sea horizontal, Figura

3.5. En total se han colocado 16 listones dispuestos en 4 filas y 4 columnas. En la tabla 3.5 se recogen sus dimensiones:

PARÁMETRO	VALOR
Ancho	90 mm
Largo	580 mm
Altura	30 mm
Peso 1 Listón	12.24 Kg
Peso total (16 Listones)	195.84 Kg

*Tabla 3. 5: Dimensiones listones metálicos.*

### 3.3 Instrumentación

En este apartado se explican los diferentes instrumentos de medición utilizados para medir el movimiento, recoger la señal medida y procesar esta señal para obtener los resultados del factor de amortiguamiento.

#### 3.3.1 Acelerómetros

Un acelerómetro es un transductor cuya salida es proporcional a la aceleración. Es un dispositivo muy común que mide la vibración o la aceleración de un punto que pertenece a un sistema en movimiento.

Los acelerómetros que se utilizan en este trabajo son de tipo piezoeléctricos y dentro de estos son de tipo cortantes. Por ser piezoeléctrico su funcionamiento se basa en las propiedades de estos materiales, los cuales producen una corriente eléctrica cuando son sometidos a alguna fuerza, debido a los cambios que experimenta su estructura cristalina. Y para el cálculo de la aceleración, la corriente generada se convierte en un voltaje de baja impedancia por ser un IEPE (Integrated Electronic Piezo Electric). Mientras que, por ser de tipo cortante, la salida eléctrica del elemento piezoeléctrico es proporcional al cambio en el ángulo de corte. Se caracterizan por tener una alta relación sensibilidad-masa, una relativa alta frecuencia de resonancia y un buen aislamiento a las deformaciones de la base y a los transitorios de temperatura.

Se han utilizado dos acelerómetros, uno situado en el soporte móvil y otro en la plataforma superior de la plataforma de movimiento, como se puede observar en la Figura 3.8. Para su perfecto anclaje se utiliza un imán, como el de la Figura 3.9 en cuya parte superior hay un elemento roscado para roscar el acelerómetro:

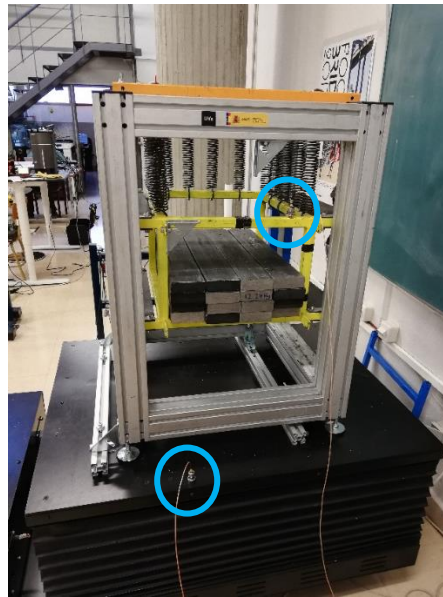


Figura 3. 8: Colocación de los acelerómetros.



Figura 3. 9: Imán para la colocación de los acelerómetros.

Los acelerómetros estarán conectados mediante un adaptador específico para sensores de tipo IEPE con el modelo DSI-ACC 0.16 Hz de 9 pines, Figura 3.9, a uno de los puertos de entrada del hardware Sirius.



Figura 3. 10: Adaptador DSI-ACC 0.16 Hz.

Cada acelerómetro tiene una sensibilidad de voltaje diferente que se tendrá en cuenta para posterior configuración de estos el software de Dewesoft. Son de la



marca MMF, del tipo KS76.C100, como el de la Figura 3.11, y sus números de serie son:



Figura 3. 11: Acelerómetro KS76.C100 [8].

- 15009: número de serie del acelerómetro situado en el soporte móvil cuya sensibilidad de voltaje es de 10.219 mV/(m/s<sup>2</sup>).

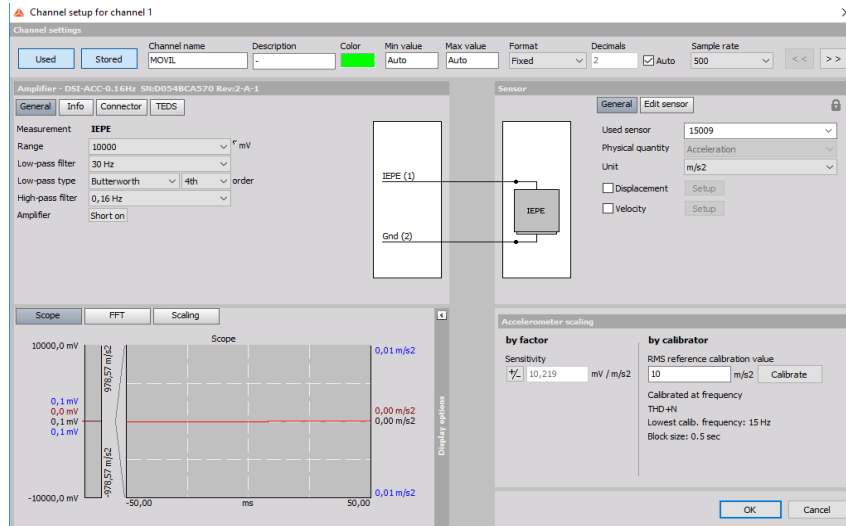


Figura 3. 12: Captura de las características del 15009 en Dewesoft.

- 16045: número de serie del acelerómetro situado en la plataforma superior cuya sensibilidad de voltaje es de 10.265 mV/(m/s<sup>2</sup>).

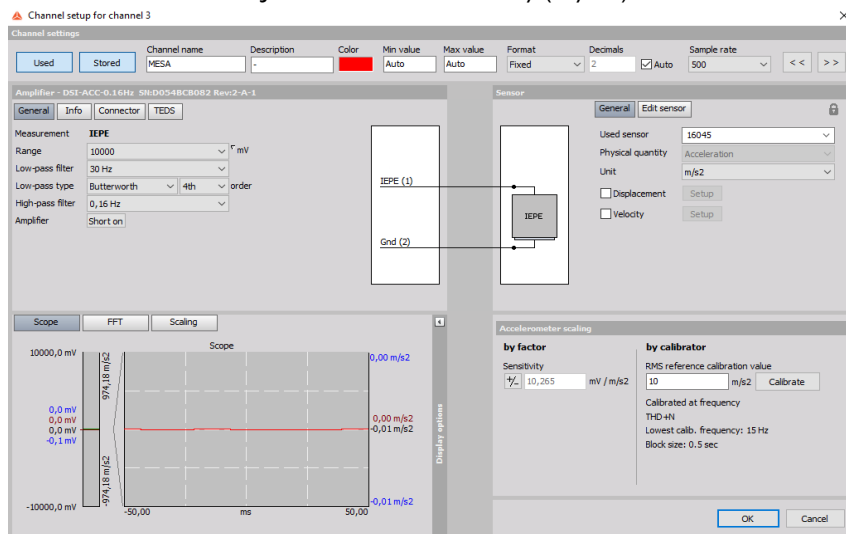


Figura 3. 13: Captura de las características del 16045 en Dewesoft.

### 3.3.2 Sensor Láser

Es un tipo de sensor que detecta la posición de un objeto mediante el uso de un sistema de triangulación de posición. El láser emite un rayo láser hacia el objeto, la luz reflejada por el objeto es captada por una lente dentro del sensor formando una imagen sobre el elemento receptor. Si la distancia del objeto al láser cambia, porque se está moviendo, la luz concentrada por la lente cambia de ángulo y por lo tanto la imagen formada cambia de posición.

El sensor láser se colocará sobre la estructura fija de perfiles de aluminio para medir el movimiento del soporte móvil, como se aprecia en la Figura 3.14, con ayuda de una pletina y unas pinzas, como se ve en el detalle de la Figura 3.15. Los datos que proporciona el sensor serán recogidos por el dispositivo Sirius para su utilización con el software Dewesoft.

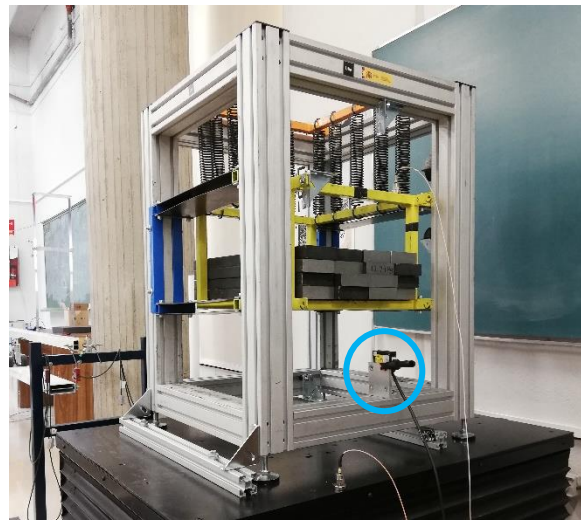


Figura 3. 14: Colocación del sensor láser.

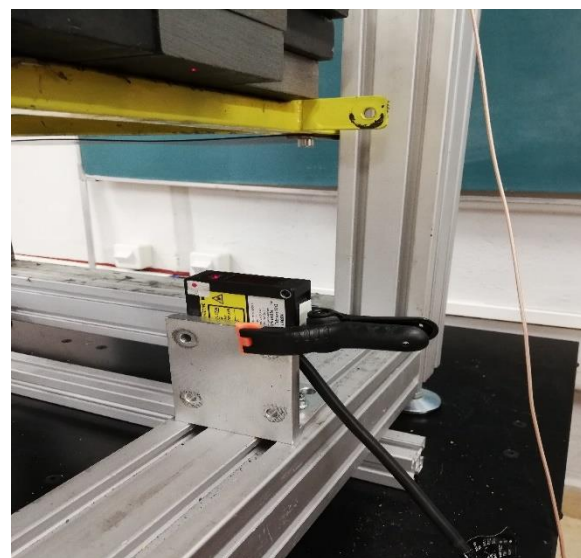


Figura 3. 15: Detalle del sensor láser.

El sensor láser utilizado es el modelo HL-G112-A-C5 de la marca Panasonic, Figura 3.16, que se caracteriza por tener una distancia al centro de medición de 120 mm y un rango de medición de  $\pm 60$  mm. Esto quiere decir que la distancia del láser al objeto de medida, en este caso a uno de los listones del soporte móvil, tiene que ser aproximadamente de 120 mm.



Figura 3. 16: Sensor láser HL-G112-A-C5.

Por último, en la Figura 3.17, se recogen las especificaciones de calibrado del sensor que Dewesoft pide para una correcta medición de la distancia.

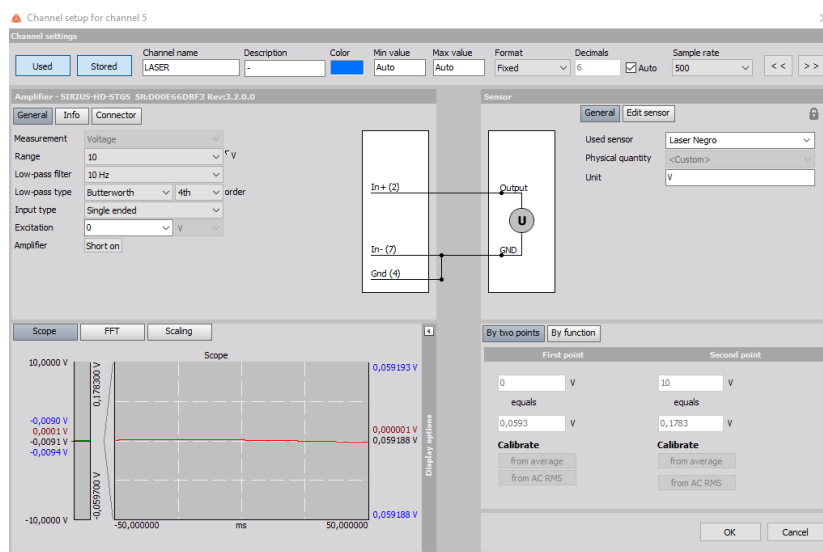


Figura 3. 17: Captura de las características del sensor láser en Dewesoft

### 3.3.3 Dispositivo de registro de señal.

Para poder llevar toda la información de los datos recogidos por los sensores explicados anteriormente, tales como la aceleración o la posición de las estructuras deseadas del banco de ensayos, a un ordenador se ha utilizado el hardware SIRIUS HD-STG del fabricante DEWESoft. Mientras que para registrar y procesar estos datos

para poder calcular el amortiguamiento del sistema se ha utilizado el software DEWEsoft X3 proporcionado también por el mismo fabricante.

- SIRIUS HD-STG

Para la adquisición de datos, dentro de los diferentes hardware presentes en el laboratorio, se ha utilizado el modelo SIRIUS HD-STG, como el de la Figura 3.18, porque permite realizar un análisis modal.



Figura 3. 18: SIRIUS HD-STG [6].

Como se puede observar en la imagen inferior de la Figura 3.17, el dispositivo consta de 16 canales de entrada del tipo D-SUB hembra de 9 pines donde se conectarán los dos acelerómetros y el sensor láser. En el canal 1 y 3 se conectarán los acelerómetros del soporte móvil y de la plataforma superior respectivamente, mientras que el sensor láser se conectará en el canal 5. Como en la Figura 3.19:



Figura 3. 19: Conexión de los acelerómetros y el sensor láser.

Por otro lado, en la imagen superior de la Figura 3.18, se encuentran diferentes puertos como, por ejemplo:

- Entrada de la alimentación de corriente.
- Salida tipo USB para conectar el SIRIUS al ordenador.
- Salida para conectar el sensor láser a la alimentación de corriente.



Figura 3. 20: Conexión frontales.

- DEWESoft X3

El mismo fabricante, DEWESoft, proporciona el software adecuado para procesar los datos recogidos por el SIRIUS y en este trabajo se ha utilizado el software DEWESoft X3 de 64 bits. Dispone de dos módulos principales, uno para medir y otro para analizar.

En primer lugar, el módulo para medir, Measure en el programa, permite configurar los sensores dentro del Channel Setup, como se ve en la Figura 3.21, y es donde modificamos las características de estos, como se pudo observar en las Figura 3.12, 3.13 y 3.17.

ID	Used	C	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Values	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
1	Used		MOVIL	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-0,98	-0,00212	0,98	Acceleration	m/s2	Zero	Setup
2	Unused		AI 2	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0001	10,00		V	Zero	Setup
3	Used		MESA	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-0,97	-0,00551	0,97	Acceleration	m/s2	Zero	Setup
4	Unused		AI 4	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0275	10,00		V	Zero	Setup
5	Used		LASER	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-0,06	0,11700	0,18		V	Zero	Setup
6	Unused		AI 6	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0434	10,00		V	Zero	Setup
7	Unused		AI 7	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	0,0101	10,00		V	Zero	Setup
8	Unused		AI 8	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,1067	10,00		V	Zero	Setup
9	Unused		AI 9	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0280	10,00		V	Zero	Setup
10	Unused		AI 10	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,1025	10,00		V	Zero	Setup
11	Unused		AI 11	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0903	10,00		V	Zero	Setup
12	Unused		AI 12	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,1123	10,00		V	Zero	Setup
13	Unused		AI 13	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0249	10,00		V	Zero	Setup
14	Unused		AI 14	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0838	10,00		V	Zero	Setup
15	Unused		AI 15	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0770	10,00		V	Zero	Setup
16	Unused		AI 16	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,0222	10,00		V	Zero	Setup

Figura 3. 21: Captura del módulo Channel Setup.

También dentro de este módulo permite visualizar en tiempo real toda la información que recogen los sensores conectados al SIRIUS, Figura 3.22, y poder grabarlos con el botón Store dentro de la ventana Recorder. En este caso, la gráfica superior muestra la señal del Láser en tiempo real.

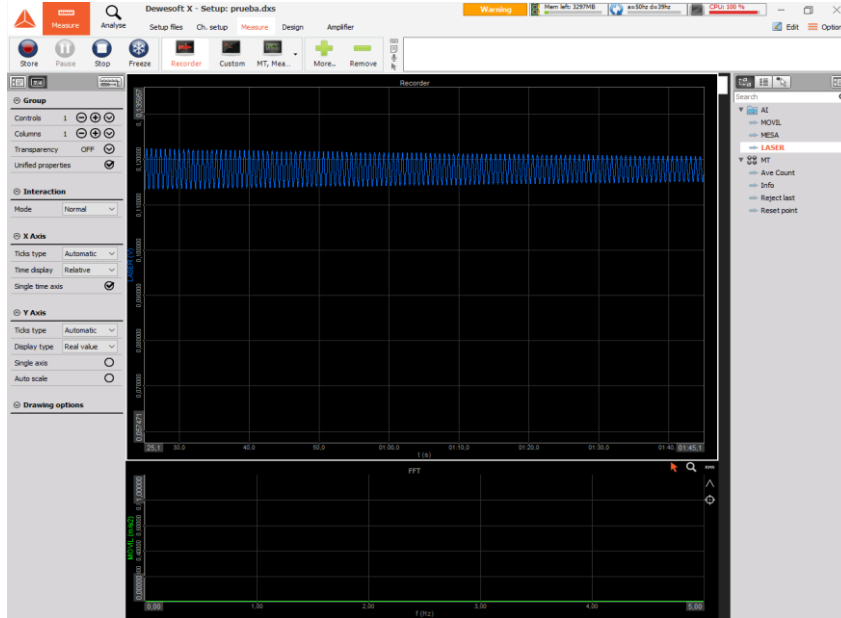


Figura 3. 22: Captura del módulo Recorder.

Como se explicó antes, el hecho de elegir este hardware era que tenía la posibilidad de realizar análisis modal para poder calcular el amortiguamiento del sistema en el dominio de la frecuencia dentro de la ventana MT Measure, cuya apariencia corresponde a la Figura 3.23.

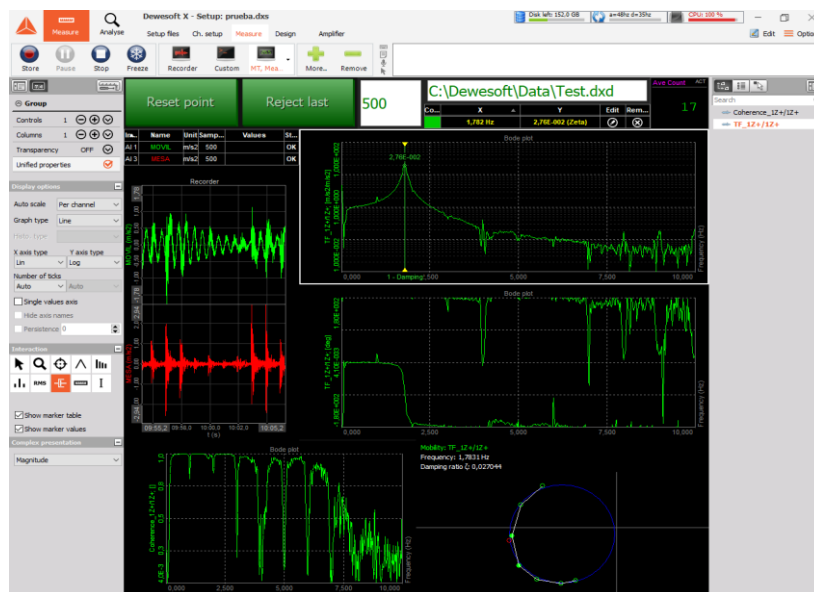


Figura 3. 23: Captura del módulo MT Measure.

En segundo lugar, el módulo para analizar, Analyse en el programa, permite exportar los datos recogidos con el módulo Measure a otros formatos como, por ejemplo, .txt o .xlsx. Así podrán ser leídos por otros programas como Excel o Matlab y poder post procesarlos para calcular el amortiguamiento mediante diferentes métodos.

Como complemento en el Anexo se recoge una guía básica para el arranque y puesta a punto del software DEWEsoft y poder realizar las mismas pruebas que tienen lugar en este trabajo partiendo desde cero. Para más información, el fabricante en su web proporciona un manual completo del funcionamiento del programa.

### 3.4 Diseño de experimentos

En este apartado se recogen los diferentes experimentos, o mejor dicho los diferentes amortiguadores utilizados para el cálculo del amortiguamiento del sistema. Se explicarán sus características, dimensiones y colocación dentro del TMD.

#### 3.4.1 Configuración Inicial.

La prueba número 1 consiste en la configuración inicial del TMD sin la colocación de ningún amortiguador. Es la misma que la explicada en el apartado 3.2 y la que se puede ver en la Figura 3.4

#### 3.4.2 Amortiguación con cables metálicos.

Como ya se ha explicado en el apartado 2.3.2.3, este tipo de amortiguación se asemeja a la amortiguación por fricción. Para ello se dispone de dos tipos de cables que se explican a continuación y con los cuales se han diseñado dos tipos de amortiguadores con diferente configuración.

##### 3.4.2.1 Bobina de cables metálico 1x19 de 7 espiras.

Este amortiguador metálico consiste en una bobina formada por un cable de 19 hilos, como se puede observar en la Figura 3.24.

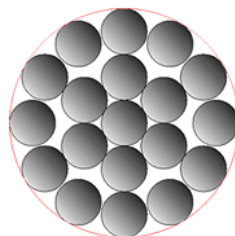


Figura 3. 24: Cable metálico de 19 hilos [10].

Para su diseño se ha utilizado un cable metálico de 19 hilos de una longitud aproximada de 3010 mm y 4 pletinas de acero de 130 mm de longitud con 9

perforaciones para introducir el conjunto de tuerca-tornillo y poder formar la bobina con 7 espiras y un diámetro aproximado de 140 mm, como la Figura 3.25.



Figura 3. 25: Bobina de cables metálicos 1x19.

Mientras que su colocación en el TMD, está unido por la parte inferior de la pletina izquierda al soporte móvil y por la parte superior de la pletina derecha a la estructura fija con ayuda, en ambos casos, de un perfil triangular. Así es como queda:

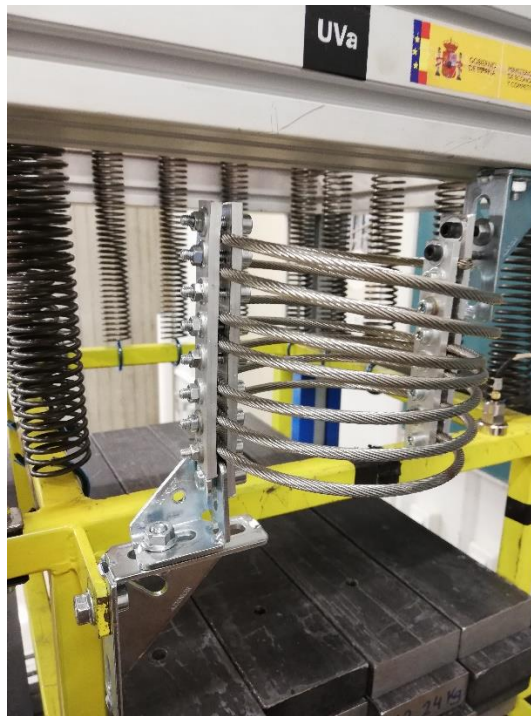


Figura 3. 26: Colocación bobina de cables metálicos 1x19.



### 3.4.2.2 Bobina de cables metálico 6x7 de 8 espiras

El siguiente amortiguador metálico experimentado está formado por un cable de acero inoxidable de 6 cordones formado cada uno de ellos por 7 hilos, como la Figura 3.27, en cuyo interior se encuentra el alma de fibra.

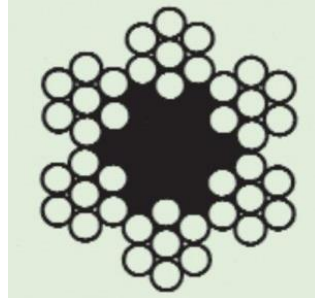


Figura 3. 27: Cable de acero inoxidable de 6x7 hilos [11].

Como el amortiguador anterior, está formado por un cable de acero inoxidable de 6x7 de una longitud de 3020 mm y 4 pletinas de acero de 200 mm con otras 9 perforaciones para dar lugar a una bobina con 8 espiras de un diámetro de 120 mm.



Figura 3. 28: Bobina de cables metálicos 6x7

Su colocación en el TMD, por un lado, está unido por la parte inferior de la pletina izquierda al soporte móvil directamente con ayuda de una tuerca y un perno y, por otro lado, está unido a la estructura fija por la parte superior de la pletina derecha con ayuda de un perfil triangular. Así es como queda:



Figura 3. 29: Colocación bobina de cables metálicos 6x7

### 3.4.2.3 Batería de 12 cables metálicos 1x19.

Para esta prueba se han vuelto a utilizar el cable metálico de 19 hilos, Figura 3.23, pero en vez de formar una bobina se ha formado una batería con un total de 12 cables. La longitud de cada cable es de 450 mm.

Como se puede ver en la Figura 3.30, en el extremo izquierdo la pletina de acero es de 200x60 mm, mientras que la pletina derecha es de 210x80 mm. Y para fijar los 12 cables a estas pletinas se utilizan otras dos pletinas de menor tamaño y una serie de tuercas y pernos.



Figura 3. 30: Batería de 12 cables 1x19

Para su colocación en el TMD, por el extremo izquierdo va a estar sujeto a la estructura fija y por el otro, con ayuda de un perno en forma de U como el de la Figura 3.32, se une al soporte móvil. Se puede observar en la siguiente imagen:



Figura 3. 31: Colocación de la batería de cables 1x19.



Figura 3. 32: Perno en forma de U.

### 3.4.3 Amortiguación viscosa

Para calcular el amortiguamiento viscoso se ha decidido utilizar un pequeño amortiguador viscoso comúnmente utilizado en motocicletas. Recibe el nombre de Steering Damper y es de la marca FXCNC Racing. Normalmente este tipo de amortiguadores tienen la posibilidad de regular la cantidad de fluido que pasa, pero en el que se utiliza para este ensayo sólo tiene una posición.



Figura 3. 33: Steering Damper de FXCNC Racing [13].

Como se puede ver en la Figura 3.34, normalmente este tipo de amortiguador se utiliza para evitar que el manillar de las motocicletas se des controle. Este descontrol es debido a las vibraciones producidas por circular a excesiva velocidad, por el desgaste de los neumáticos o por fallos en la amortiguación.



Figura 3. 34: Colocación del Steering Damper en una moto [12].

Par su colocación en el TMD, está unido por el extremo superior del vástago a la estructura fija con ayuda de un perfil triangular. Y para unirlo al soporte móvil se utilizan varias piezas: una agarradera (pieza dorada), una pletina con perforaciones y un perno con forma de U. La agarradera se fija al cilindro del amortiguador y ésta se une a la pletina mediante un tuerca-tornillo, la cual, a su vez, está fijada al soporte móvil gracias al perno con forma de U.



Figura 3. 35: Colocación del Steering Damper en el TMD.

El amortiguador viscoso que hay en el laboratorio tiene un recorrido máximo del vástago de 70 mm. Por lo que para su colocación y posterior ensayo hay que tener precaución en no sobrepasar su recorrido máximo porque puede romperse y además daría lugar a inestabilidades en el ensayo. Por esto se han colocado una serie de finales de carrera situados en los perfiles de aluminio de la estructura fija, como se ven en la Figura 3.36, los cuales chocarían con las ballestas.



Figura 3. 36: Finales de carrera.

### 3.4.4 Amortiguación magnética

#### 3.4.4.1 Amortiguador magnético simple.

También se ha probado un diseño de amortiguador magnético formado por una placa de cobre y un prisma rectangular de plástico donde se encuentran 8 imanes dispuestos intercaladamente el polo Norte y el Sur, como se aprecia en la Figura 3.37.

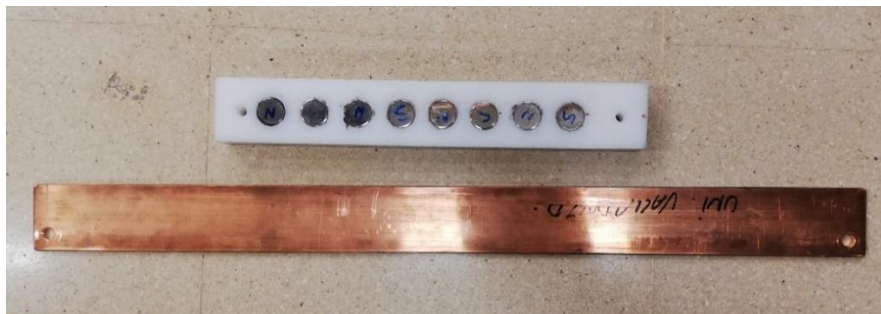


Figura 3. 37: Imanes y placa de cobre.

Las dimensiones de este diseño están recogidas en la Tabla 3.6:

PARÁMETRO	VALOR
Placa de Cobre	
Largo	610 mm
Ancho	50 mm
Espesor	4 mm
Prisma rectangular de Plástico	
Largo	300 mm
Ancho	45 mm
Alto	25 mm

Tabla 3. 6: Dimensiones amortiguador magnético.

En cuanto a su colocación en el TMD, la placa de cobre es la que va a estar fija en el perfil de aluminio. Mientras que el prisma con los imanes es el que se va a mover y estará fijado al soporte móvil, como se aprecia en la Figura 3.38. Dado que la distancia de separación entre el cobre y los imanes se puede regular manualmente, se ha decidido colocar los imanes lo más cerca posible del cobre, pero sin tocarlo. De esta forma la fuerza magnética producida por el movimiento de los imanes será mayor que si estos están más alejados, y por lo tanto el amortiguamiento también será mayor.

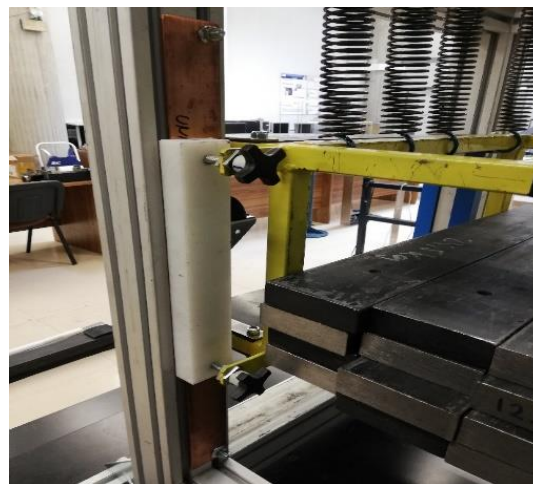


Figura 3. 38: Colocación del amortiguador magnético.

#### 3.4.4.2 Amortiguador magnético doble.

Misma configuración que el caso anterior, pero en vez de tener solo un amortiguador magnético en el lado izquierdo también se coloca otro en el lado derecho como se ven en la Figura 3.39:



Figura 3. 39: Colocación del amortiguador magnético a ambos lados.

### 3.4.5 Amortiguación por fricción seca.

#### 3.4.5.1 Amortiguador por fricción seca simple.

Por último, se va a experimentar el amortiguamiento de Coulomb o de fricción seca, que como se ha explicado en el capítulo 2, se debe a la fuerza que se produce cuando dos superficies sólidas en movimiento están en contacto.

Para su montaje se van a utilizar los mismos elementos que en la prueba anterior, es decir, se van a utilizar como superficies de contacto la placa de cobre, que estará fija al perfil de aluminio, y el prisma rectangular anclado al soporte móvil como en la Figura 3.37.

#### 3.4.5.2 Amortiguador por fricción seca doble.

Misma configuración que la figura 3.39 pero en este caso los prismas de plástico tienen que rozar con la placa de cobre.





## 4. EVALUACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Como se puede ver en el Índice de este trabajo el amortiguamiento del sistema se va a evaluar de dos formas distintas: en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, la cual se va a tratar en este capítulo.

Estamos en un sistema de 1 grado de libertad, el cual para su evaluación del amortiguamiento en el dominio del tiempo se va a estudiar su respuesta libre. Es decir que  $F(t)=0$ , como se recoge en el apartado 2.3.

Para este experimento no se va a utilizar el movimiento de la plataforma de movimiento Simunak, si no que el movimiento del sistema será el denominado free decay o caída libre. El free decay consiste en llevar al soporte móvil, Figura 3.4, a una determinada amplitud, no tiene por qué ser la misma siempre, soltar en esa posición y dejar que decaiga hasta su posición de equilibrio.

En cuanto a los datos recogidos por el Sirius para posteriormente procesarlos en Excel y Matlab, son aquellos que se obtienen del sensor Láser, Figura 3.16.

En primer lugar, una vez que ya se han grabado los datos del free decay hay que exportar en un formato .txt que son de fácil lectura para un software como Matlab. Para ello se tienen que seguir los siguientes pasos:

1. Dentro de la ventana Measure de Analyse se elige la señal que se ajusta mejor al experimento moviendo las barras blancas que aparecen en los laterales, como se observa en la figura 4.1.:

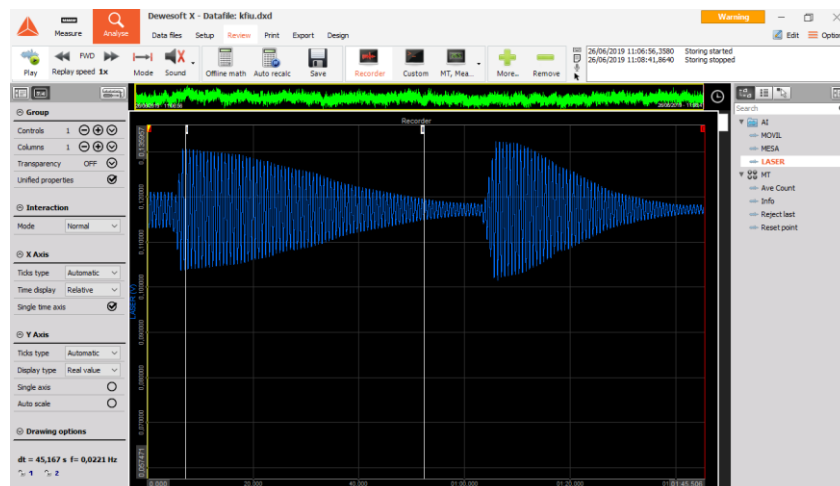


Figura 4. 1: Captura de Measure de Analyse.

2. Se da doble clic dentro de la zona delimitada.

- Se procede a ir a la ventana Export donde a la derecha aparecen todos los canales que han recogido datos durante la grabación. Se elegirá el canal que corresponda al sensor láser dejándolo en YES y el resto de los canales en NO.

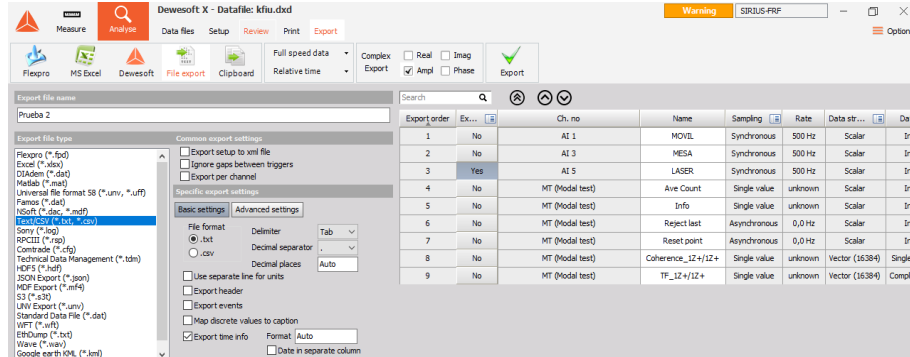


Figura 4. 2: Ventana selección de datos.

- También dentro de esta ventana, a la izquierda, se elige el formato en el que se quiere exportar, en este caso en .txt, que es el Text/CSV(\*.txt). Dentro de las opciones que tiene, sólo puede estar marcada 'Export time info'.
- Por último, se clic en Export, aparece una ventana que pregunta si se quiere exportar sólo la zona donde se ha hecho el zoom (Paso 2) y se clic a Sí.

A continuación, se explican los diferentes amortiguadores elegidos para el cálculo del amortiguamiento de cada una de las pruebas explicadas en el apartado 3.6.

Para cada prueba se han grabado/guardado 6 ficheros .txt para calcular seis valores de amortiguación y para posteriormente realizar la media y así obtener un valor más real de la amortiguación de cada prueba.

#### 4.1 Técnica de la envolvente exponencial.

En este método se va a utilizar una función de Matlab creada por el tutor que permite calcular el amortiguamiento a partir de unos datos temporales.

Una vez que se tienen los datos en formato .txt, se guardan en la misma carpeta en la que se encuentra la función que recibe el nombre de getDamping3.m, para así facilitar a la función la búsqueda del fichero.

Esta función estima el amortiguamiento de una señal mediante el método de la envolvente exponencial negativa de las crestas de oscilación. Permite cuatro tipos de entradas distintas en función del formato de la señal, siendo la utilizada en este método, la de la forma:

$$[ \text{ksi} , \dots ] = \text{getDamping3} ( \text{'Clean'} , \text{time\_position} )$$

que lee desde un fichero .txt que contiene los datos numéricos por columnas, como es nuestro caso. El time\_position indica que columna corresponde a los datos

temporales, poniendo 'first' si es la primera columna o 'last' si es la segunda. Y 'Clean' indica que los datos no tienen ningún encabezamiento, es decir, empiezan directamente con los datos. Mientras que devolverá el valor del amortiguamiento, que recibe el nombre de ksi.

Para facilitar el uso de esta función se ha creado un Script, como el de la Figura 4.3, que permite ejecutarla sin necesidad de escribirlo en el Command Window de Matlab.

```
1 % Técnica de la envolvente exponencial
2 % Primeramente tendremos cargado en la misma carpeta que getDamping3 los
3 % .txt de las distintas pruebas
4
5 % Escribir en el Command Window getDamping3('Clean','first')
6 % Seleccionamos el .txt que queremos probar y seguimos todos los pasos que
7 % nos va indicando el programa.
8 %%
9 - close all
10 - format long
11 - getDamping3('Clean','first')
```

Figura 4. 3: Script envolvente exponencial.

1. Cuando se ejecuta la función `getDamping3` lo primero que se pide es seleccionar el fichero `.txt` que se quiere evaluar, lo lee, lo carga y crea 3 gráficas como se ve en la Figura 4.4, y cada una de ellas corresponde a:
  - Gráfica 1: representación de la señal en donde la señal realiza una serie de operaciones para que empiece en  $t$  igual a 0 segundos y que además la amplitud oscile en torno a 0.
  - Gráfica 2: representación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que convierte la señal temporal en una serie de contribuciones de señales periódicas a todas las frecuencias. Indica la frecuencia propia de la señal.
  - Gráfica 3: representación de la misma señal que la Gráfica 1, pero en este caso se indican con asteriscos los máximos encontrados por la función.

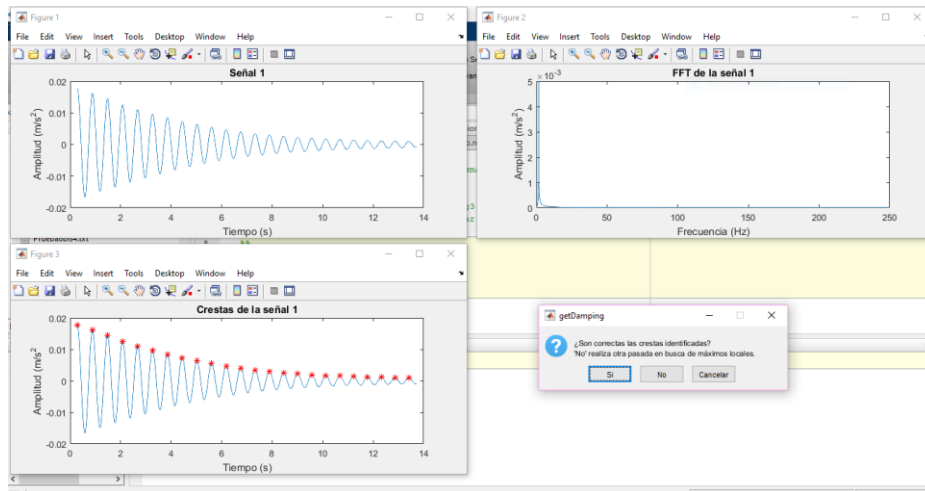


Figura 4. 4: Captura de pantalla del Paso 1.

Para pasar a la siguiente operación, la función pregunta si las crestas identificadas son correctas. Si se decide que no son correctas, la función va a realizar otra pasada buscando los máximos de estos máximos, esto conviene realizarlo cuando la señal presenta mucho ruido. Para todas las señales evaluadas en este trabajo no ha hecho falta realizar otra búsqueda de crestas ya que todas las señales presentan poco ruido.

2. En la siguiente operación aparece otra pequeña ventana, Figura 4.5, que pide introducir los límites de los tramos de división de la señal. Por defecto vienen puesto el punto inicial y el final. En ocasiones se recomienda añadir un límite intermedio cuando se tienen señales muy largas en donde al principio la amplitud es muy grande comparado con la amplitud al final. De esta forma la función calcula la envolvente desde el punto inicial al intermedio y desde el intermedio al final.

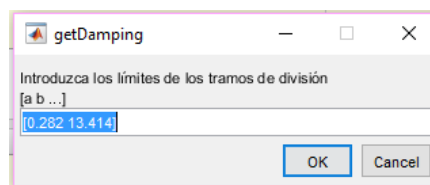


Figura 4. 5: Ventana para introducir los límites de división

3. Cuando se toman logaritmos de las amplitudes máximas de una envolvente exponencial negativa, ésta se convierte en una recta. Facilitando el cálculo de una regresión lineal. Y esto es lo que realiza la función en el siguiente paso, en donde se muestra una nueva gráfica:
  - Gráfica 4: representación de la regresión lineal calculada con los logaritmos de los máximos de la Gráfica 3.

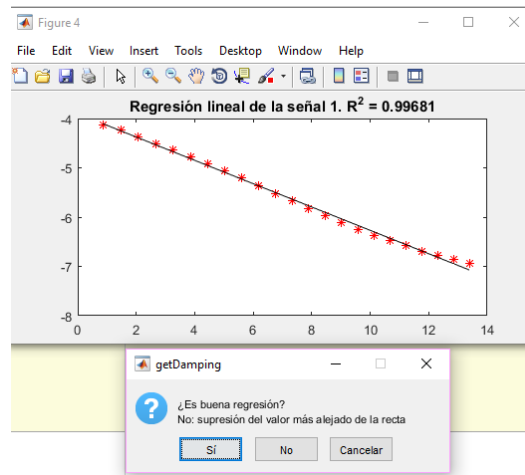


Figura 4. 6: Captura de pantalla del Paso 3.

Para finalizar este paso, se pregunta si la regresión calculada es buena y se tienen dos opciones:

- Sí: continuamos con los cálculos si el coeficiente de determinación,  $R^2$ , se encuentra entre 0.97 y 1. Esto quiere decir que el ajuste del modelo a la variable que se pretende calcular es bastante bueno.
- No: si el valor de  $R^2$  no se considera aceptable, dando a No, la función elimina aquel valor (asterisco) más alejado de la recta y vuelve a calcular  $R^2$ , mejorándolo. Realizar esto hasta considerar un valor aceptable siempre y cuando se tenga más de 2 puntos.

4. Ahora la función pide el valor de la frecuencia propia de la señal, Figura 4.7, porque como se determinó en el capítulo 2, la ecuación del movimiento para el caso de respuesta libre es el siguiente:

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi) \cdot e^{(-\omega_0 \cdot \xi \cdot t)}$$

En donde la función ya sabe el valor del exponente, pero para determinar el amortiguamiento ( $\xi$ ) necesita saber  $\omega_0$ . Por defecto la función calcula una frecuencia a partir de hacer la inversa de la media de todos los incrementos temporales de todas las crestas de la Gráfica 3. Pero este valor no suele ser muy preciso y es por eso por lo que se tiene la Gráfica 2 donde la FFT da el valor exacto de la frecuencia propia.

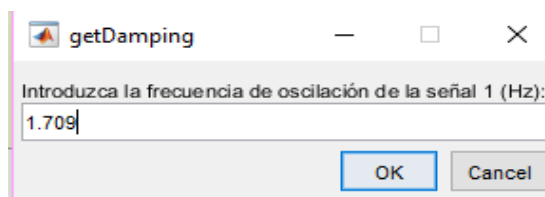
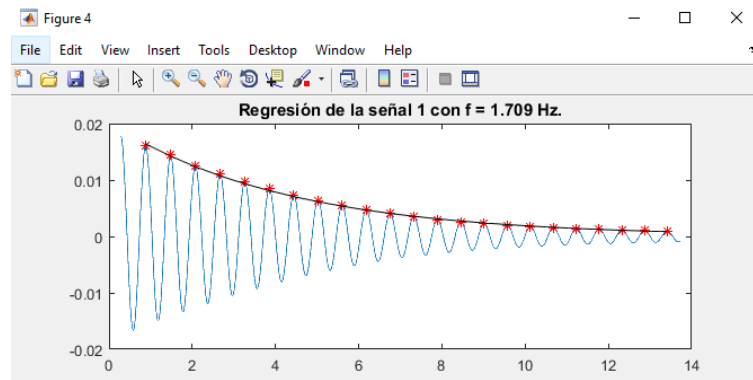


Figura 4. 7: Ventana de la frecuencia propia.

5. Por último, la función crea la Gráfica 4.1 que representa la señal junto con las crestas y la regresión calculada en el paso 3. Mientras que en el Command Window de Matlab se encuentra el valor del amortiguamiento que ha calculado en tanto por uno.



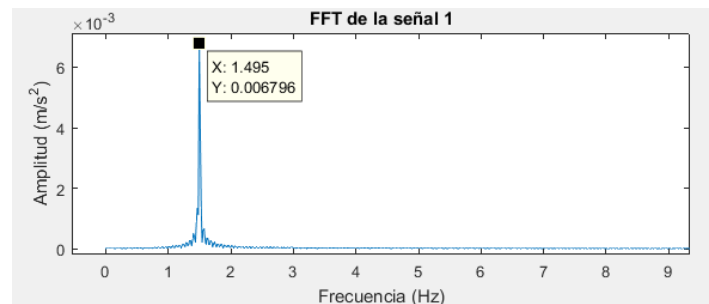
Gráfica 4. 1: Resultado final de la función `getDamping3`.

A continuación, se expondrán los resultados obtenidos para cada uno de los diferentes amortiguadores experimentados, mostrando gráficas similares a la Gráfica 4.1 y el valor del amortiguamiento calculado para cada uno de los 6 ficheros grabados durante cada ensayo.

#### 4.1.1 Configuración inicial.

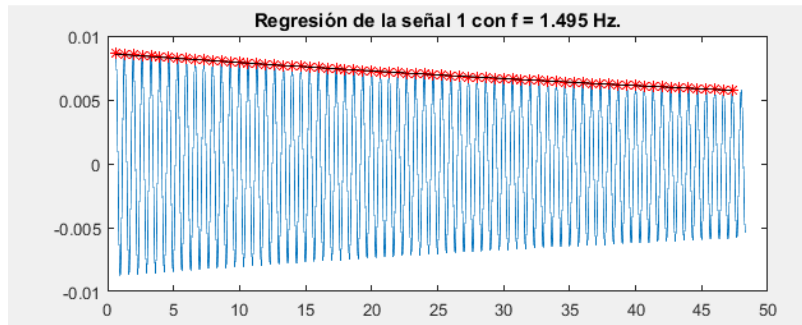
Aplicando los pasos descritos anteriormente con la función `getDamping3`, para el ensayo sin amortiguador primeramente se determina la frecuencia propia del sistema.

En este primer caso, la  $w_0$  es de 1.495 Hz, como se ve en la Gráfica 4.2:



Gráfica 4. 2: FFT para la configuración inicial.

Para el cálculo de la envolvente exponencial no ha hecho falta dividir en dos los tramos de los límites de división ya que la disminución de las amplitudes máximas es muy pequeña por ser un sistema muy poco amortiguado. Por otra parte, tampoco se han eliminado ningún máximo para el cálculo de la regresión lineal porque el valor de  $R^2$  inicialmente es de 0.999, es decir una regresión casi perfecta. Todo esto se puede ver en la Gráfica 4.3:



Gráfica 4. 3: Envolvente exponencial de la configuración inicial.

Para las otras 5 señales guardadas se obtienen la misma frecuencia propia y gráficas muy similares. Es por esto por lo que no se muestran.

En la Tabla 4.1 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por el método de la envolvente exponencial para la configuración inicial. La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
0.087
0.096
0.092
0.089
0.090
0.091
0.091

Tabla 4. 1: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la configuración inicial.

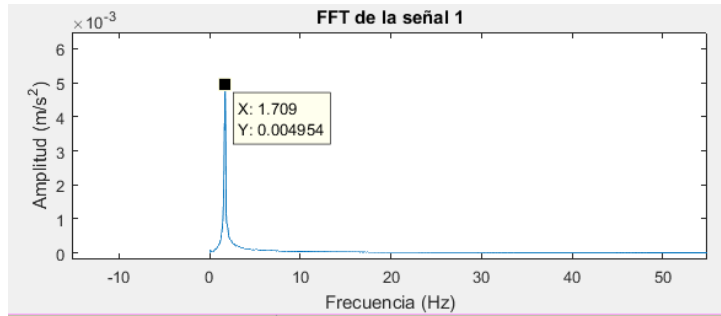
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia es de 1.495 Hz, que hay que pasarlo a rad/s. Se recuerda que el valor de la masa de los 16 listones es de 195.84 Kg y el resto de la masa móvil de 10.84 Kg.

$$c = 3.520 \text{ Ns/m}$$

#### 4.1.2 Amortiguación por cables metálicos.

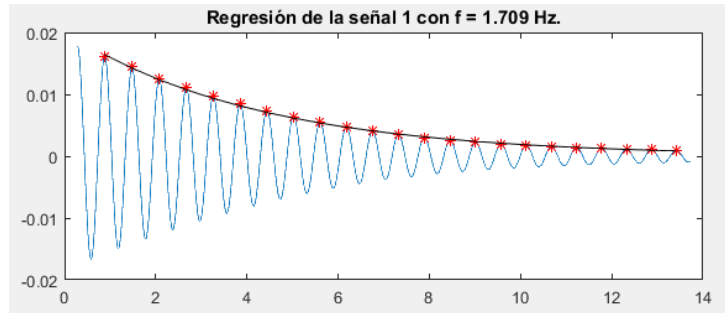
##### 4.1.2.1 Bobina de cables metálicos 1x19 de 7 espiras.

La frecuencia propia en este tipo de amortiguador, al tener forma de muelle introduce un  $k$ , que hace que la  $w_0$  aumente. En este caso vale 1.709 Hz:



Gráfica 4. 4: FFT para la bobina de 1x19 de 7 espiras.

A pesar de que entre la amplitud inicial y la final de la señal medida a priori parece bastante diferencia no ha hecho falta separar en dos tramos el cálculo de la envolvente exponencial. En cuanto a la recta de regresión calculada el valor inicial de  $R^2$  es de 0.997, por lo que no hace falta quitar ningún máximo. Todo esto se puede ver en la Gráfica 4.5, que es equivalente al resto de las señales medidas para este tipo de amortiguador:



Gráfica 4. 5: Envolvente exponencial de la bobina de 1x19 de 7 espiras.

En la Tabla 4.2 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ , hallados para los 6 ficheros guardados en donde la fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
2.030
2.160
2.120
2.070
2.200
2.200
2.129

Tabla 4. 2: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la bobina de 1x19 de 7 espiras.

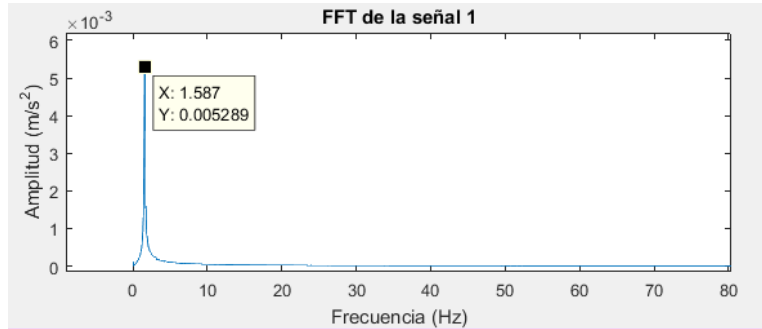
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.709 Hz, es:

$$c = 94.5 \text{ Ns/m}$$



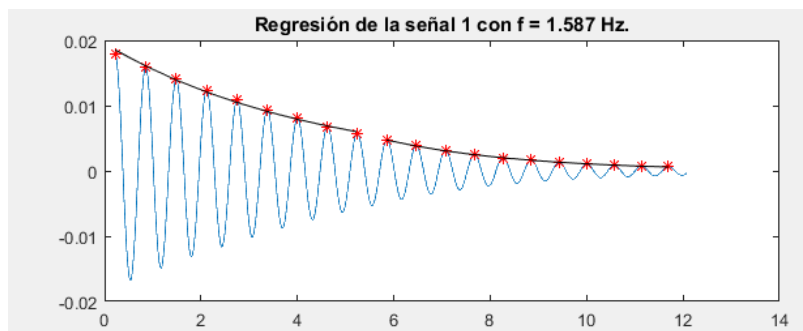
#### 4.1.2.2 Bobina de cables metálicos 6x7 de 8 espiras.

Al tener otro número de espiras y dimensiones diferentes a la bobina anterior, la frecuencia propia varía. Para este caso la  $\omega_0$  es de 1.587 Hz:



Gráfica 4. 6: FFT para la bobina de 6x7 de 8 espiras.

Para el cálculo de la envolvente exponencial, esta vez si que es necesario dividir a la mitad los límites de división de tramo. Ya que, si no se realiza, la envolvente calculada al inicio de la señal es bueno, pero al final está lejos de los máximos. De esta forma la función calcula dos envolventes: una entre el inicio y el punto medio y otra entre el punto medio y el final. Como calcula dos envolventes se tienen dos rectas de regresión cuyos valores de  $R^2$  son de 0.995 y 0.999, respectivamente. Todo esto se puede ver en la Gráfica 4.7, que es equivalente al resto de las señales medidas para este tipo de amortiguador:



Gráfica 4. 7: Envolvente exponencial de la bobina de 6x7 de 8 espiras.

Y también se obtienen dos valores de  $\xi$ , que como se ha dividido en dos tramos iguales se puede realizar su valor medio recogidos en la Tabla 4.3, junto con los valores del coeficiente de amortiguamiento correspondientes. La fila coloreada corresponde al valor medio:

$\xi$ (%)
2.800
2.860
2.815
2.785

2.865
2.922
2.841

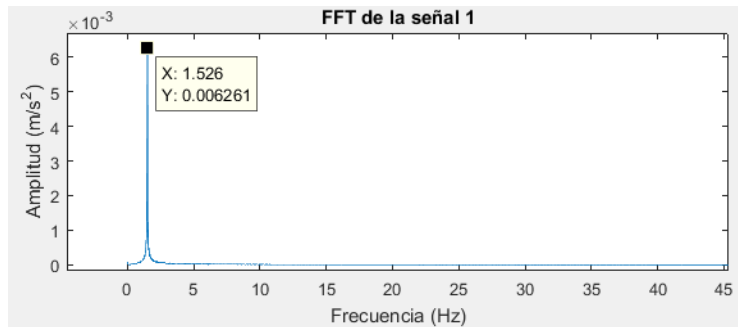
Tabla 4. 3: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la bobina de 6x7 de 8 espiras.

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.587 Hz, es:

$$c = 117.091 \text{ Ns/m}$$

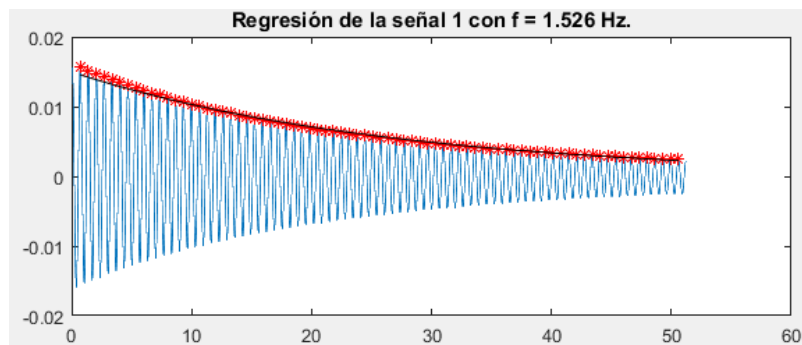
#### 4.1.2.3 Batería de 12 cables metálicos.

Para esta configuración de amortiguador por cables metálicos también se produce un aumento de la frecuencia propia del sistema como se ve en la Gráfica 4.8. Su valor es de 1.526 Hz.



Gráfica 4. 8: FFT para la batería de 12 cables.

En cuanto al procedimiento del cálculo de la envolvente exponencial no ha hecho falta separar en dos tramos su estudio ya que es una configuración poco amortiguada. El valor de  $R^2$  es de 0.996 y no se han eliminado ningún máximo.



Gráfica 4. 9: Envolvente exponencial de la batería de 12 cables.

Por último, en la Tabla 4.4 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
0.386%

0.389%
0.385%
0.374%
0.382%
0.376%
0.382%

Tabla 4. 4: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para la batería de 12 cables.

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación ( ) al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.526 Hz, es:

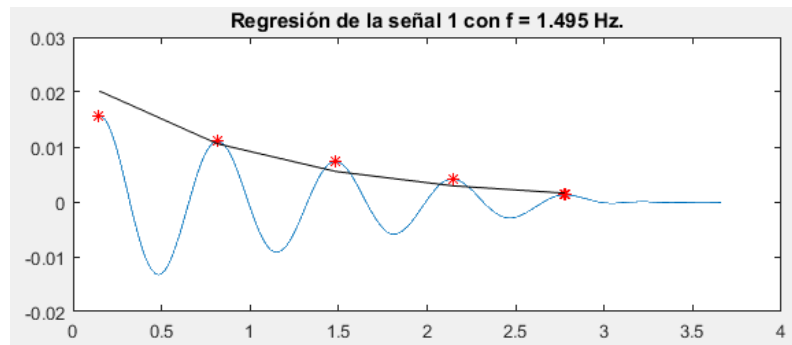
$$c = 15.128 \text{ Ns/m}$$

#### 4.1.3. Amortiguador viscoso.

La frecuencia propia del sistema se mantiene igual a la de la configuración, tanto para este caso como en los casos sucesivos. Por lo tanto, la  $w_0$  es de 1.495 Hz.

Como este tipo de amortiguador hace que el sistema esté bastante amortiguado, ya que en 5 oscilaciones el sistema se para. Esto implica que, para el cálculo de la envolvente exponencial, la función sólo tenga 5 máximos por lo que el cálculo del factor de amortiguamiento puede ser poco fiable. Además, no se puede dividir en tramos porque si no uno de ellos estaría formado por únicamente 2 máximos.

Teniendo en cuenta todo esto, el valor máximo de  $R^2$  conseguido es de 0.96 y por lo tanto la envolvente no queda muy exacta, cómo se ve en la Gráfica 4.10:



Gráfica 4. 10: Envolvente exponencial del amortiguador viscoso.

Por último, en la Tabla 4.5 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
7.580
8.140
10.110
7.684

6.890
8.446
8.083

Tabla 4. 5: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador viscoso.

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

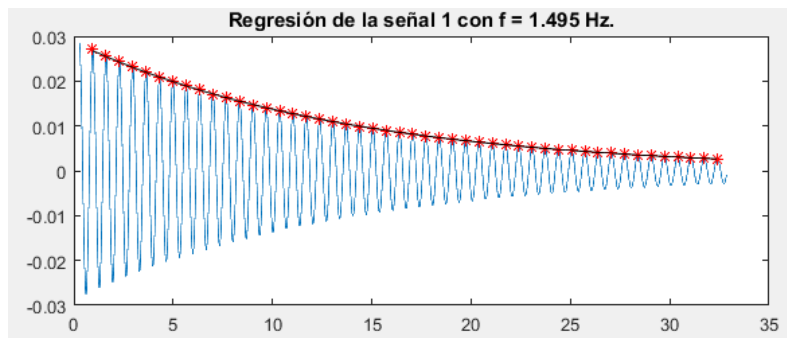
$$c = 307.56 \text{ Ns/m}$$

#### 4.1.4 Amortiguación magnética.

##### 4.1.4.1 Amortiguador magnético simple.

Como se ha dicho antes la frecuencia propia se mantiene constante en 1.495 Hz.

En cuanto al procedimiento del cálculo de la envolvente exponencial no ha hecho falta separar en dos tramos su estudio ya que es una configuración poco amortiguada. El valor de  $R^2$  es de 0.999 para todas las diferentes señales evaluadas, por lo que recta de regresión es prácticamente perfecta. Y es por esto por lo que la envolvente queda de la siguiente forma:



Gráfica 4. 11: Envolvente exponencial del amortiguador magnético simple.

Por último, en la Tabla 4.6 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
0.778
0.785
0.779
0.785
0.784
0.783

0.782

Tabla 4. 6: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador magnético simple.

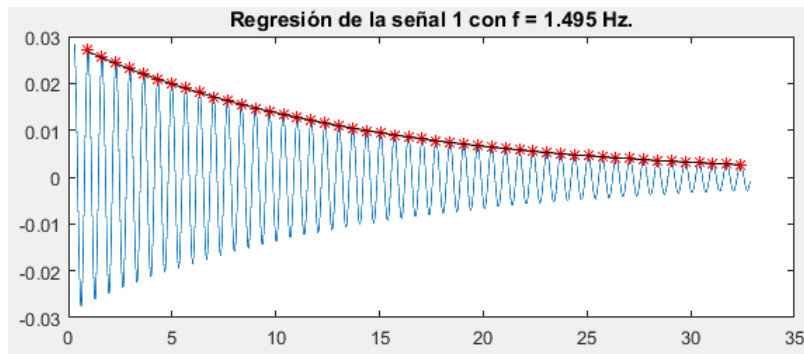
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 30.377 \text{ Ns/m}$$

#### 4.1.4.2 Amortiguador magnético doble.

Es el mismo caso anterior, pero en vez de un amortiguador se tiene dos veces el mismo amortiguador. Por lo que a priori se debería obtener el doble de amortiguamiento.

En cuanto a la envolvente exponencial, no es necesario dividir en dos tramos su cálculo ya que inicialmente se obtiene una recta de regresión con un R<sup>2</sup> de 0.999 para las 6 señales. La Gráfica 4.12 es equivalente para las demás señales.



Gráfica 4. 12: Envolvente exponencial del amortiguador magnético doble.

Por último, en la Tabla 4.7 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
1.531
1.533
1.534
1.528
1.543
1.531
1.533

Tabla 4. 7: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador magnético doble.

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 59.537 \text{ Ns/m}$$

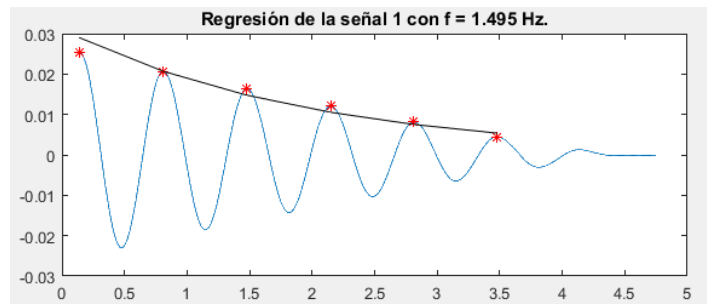
#### 4.1.5 Amortiguación por fricción seca

##### 4.1.5.1 Amortiguador por fricción seca simple

Como se ha dicho antes la frecuencia propia se mantiene constante en 1.495 Hz.

Este tipo de amortiguador que para la misma amplitud inicial de inicio de ensayo se pare en 7 oscilaciones. Esto implica que, para el cálculo de la envolvente exponencial, la función sólo tenga 7 máximos por lo que el cálculo del factor de amortiguamiento puede ser poco fiable.

Teniendo en cuenta todo esto, el valor máximo de  $R^2$  conseguido es de 0.95 y teniendo que eliminar uno o dos máximos. Por lo tanto, la envolvente calculada no es muy precisa, cómo se ve en la Gráfica 4.13:



Gráfica 4. 13: Envolvente exponencial del amortiguador de fricción seca simple.

Por último, en la Tabla 4.8 se recogen los 6 valores del factor del amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
6.689
7.816
5.480
6.607
5.055
5.220
6.069

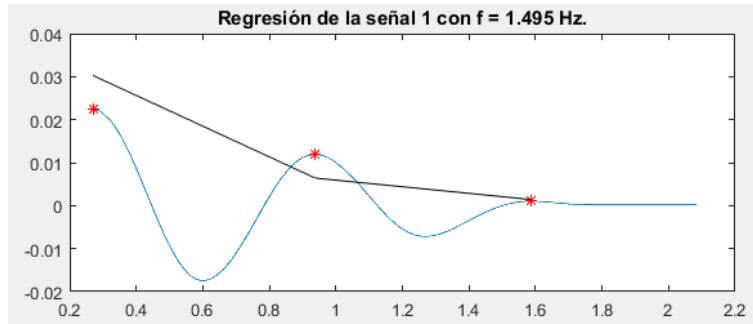
Tabla 4. 8: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador por fricción seca simple.

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 230.905 \text{ Ns/m}$$

#### 4.1.5.2 Amortiguador por fricción seca doble

Es el mismo caso que el anterior, pero con aproximadamente el doble de amortiguamiento por lo que la aplicación de este método resulta más difícil al haber sólo 3 máximos. De esta forma se obtiene una recta de regresión con  $R^2$  igual a 0.90 y una envolvente exponencial como la siguiente:



Gráfica 4. 14: Envolvente exponencial del amortiguador de fricción seca doble.

En cuanto a los valores del del factor del amortiguamiento,  $\xi$ , se exponen a continuación, pero no son para nada fiables, debido a que sólo hay 3 picos y la envolvente exponencial no se ajusta a estos picos. Es por esto por lo que hay tanta variación entre una señal y otra.

$\xi$ (%)
13.330
34.660
8.010
28.770
17.860
2.433
12.908

Tabla 4. 9: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial para el amortiguador por fricción seca doble.

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 491.159 \text{ Ns/m}$$

## 4.2. Técnica del Curve-Fitting.

Esta técnica consiste en ajustar la señal medida a la curva cuya ecuación del movimiento se ha visto antes, ecuación 24. Esta vez no se tiene en cuenta sólo las crestas si no que se ajusta todos y cada uno de los puntos que forman la señal.

También se ha utilizado Matlab para calcular el amortiguamiento con esta técnica, en el que se siguen los siguientes pasos:

1. Cargar los datos del fichero .txt a Matlab en la matriz data y crear dos vectores para guardar por un lado el tiempo de la señal, t, y por otro la amplitud, x. Con el siguiente código:

```
%% PASO 1
close all
format long
data = load('Prueba2bis4.txt', '-ascii'); %Para cargar los datos del fichero
t = data(:,1); %La columna 1 corresponde al tiempo
x = data(:,2); %La columna 2 corresponde a la aceleracion
plot(t,x) % Comprobamos que la señal medida es correcta
```

Figura 4. 8: Código Matlab paso 1.

2. Por un lado la señal tiene que empezar desde t igual a 0, para ello a cada valor del vector t se le resta el valor del t(1). Y por otro lado la señal tiene que oscilar en torno a 0, para ello se utiliza la función “detrend” que nos proporciona el propio Matlab.

```
%% PASO 2
close all
format long
t = t - t(1); % Para que el tiempo empiece en 0
x = detrend(x); % Para que la señal oscile en torno a 0
plot(t,x) % Comprobamos que la señal empieza en 0 y oscila en torno a 0
```

Figura 4. 9: Código Matlab paso 2.

3. Utilizar la herramienta de Matlab denominada “cftool”. Aplicación que ya viene programada por Matlab y que permite realizar el ajuste de la curva. Las opciones y pestañas que hay que rellenar son las siguientes, y que se puede ver en la Figura 4.10:

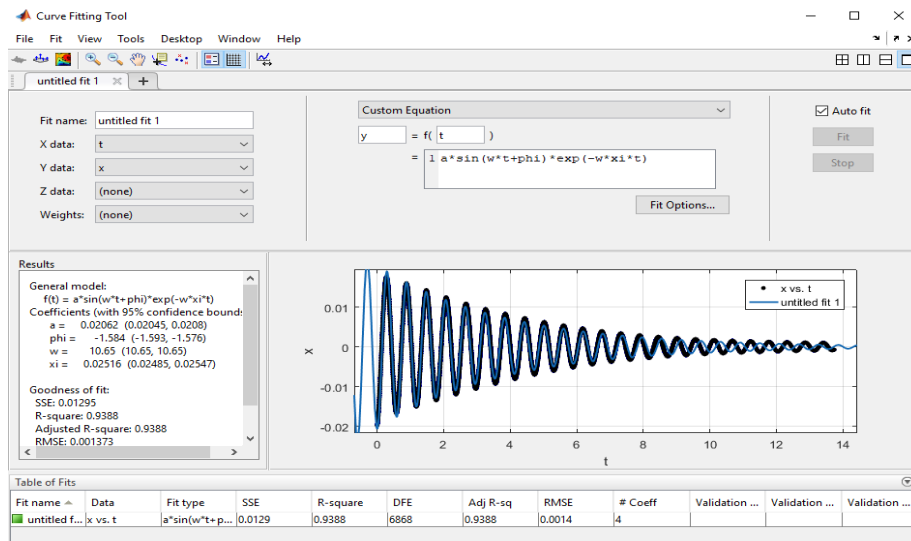


Figura 4. 10: Captura de la herramienta cftool.



- En X data elegir t.
  - En Y data elegir x.
  - Dentro de las posibles ecuaciones a la que ajustar la señal elegimos Custom Equation, ya que permite poner la ecuación del movimiento vista antes. Además, se tiene que indicar que la curva “y” es función del tiempo “t”.
  - Ajuste de las constantes de la ecuación con Fit Options para así facilitar al programa el ajuste de la curva:
    - a: es el valor de la amplitud, que puede ir desde  $\pm\infty$  y que se recomienda poner como valor inicial el orden de la amplitud que se observa en la gráfica de la señal.
    - phi: valor del desfase, cuyos límites son -3.14 y +3.14, lo que equivale a una circunferencia.
    - w: frecuencia propia del sistema que nunca puede ser negativa por lo que sus límites van de 0 a  $+\infty$ . Y como valor inicial poner la frecuencia hallada con el método 4.1 en radianes.
    - Xi: valor del amortiguamiento del sistema que puede tomar un valor entre 0 y 1.
4. Por último, el programa realiza iteraciones hasta hallar el mejor ajuste posible y dar los valores de las constantes anteriores que determinan este ajuste. También presenta la posibilidad de crear un código que guarda toda la configuración establecida antes. De esta forma, para el estudio sucesivo de las diferentes señales se escribe en el Command Window el siguiente código:

*curvefitting ( t , x )*

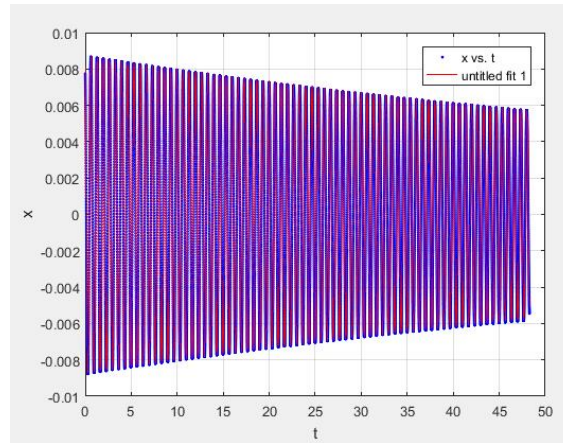
Al ejecutarlo presenta una gráfica y los valores que tienen las distintas constantes, entre ellas el amortiguamiento. La gráfica está formada por dos curvas, una azul que corresponde a la señal real y otra en rojo que corresponde a la curva ajustada por este método.

Como en el apartado 4.1, a continuación, se expondrán para cada uno de los diferentes tipos de amortiguación:

- Una gráfica que represente la señal real y la ajustada con un breve comentario.
- Una tabla donde se recogerán todos los valores calculados del factor y coeficiente de amortiguamiento.

### 4.2.1 Configuración inicial

En la Gráfica 4.15 prácticamente no se distingue entre la curva roja y la azul porque el ajuste realizado es muy bueno. Es por esto que los resultados obtenidos por esta técnica serán los más precisos de las tres técnicas expuestas en este capítulo.



Gráfica 4. 15: Curve-Fitting de la configuración inicial (tiempo).

Mientras que en la tabla 4.10 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica. La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
0.086
0.097
0.092
0.088
0.090
0.092
0.091

Tabla 4. 10: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la configuración inicial (tiempo).

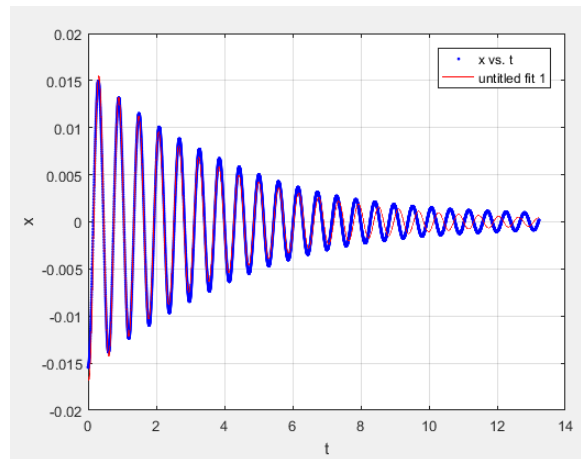
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 3.524 \text{ Ns/m}$$

### 4.2.2 Amortiguación con cables metálicos

#### 4.2.2.1 Bobina de cables metálicos 1x19 de 7 espiras

Como se puede ver en la Gráfica 4.16, la curva ajustada se descompensa de la real. Esto es debido a que estos sistemas, aunque se suponen lineales en la realidad no lo son y la frecuencia propia varía en función de la amplitud. Aunque esto no tiene por qué dar resultados incorrectos.



Gráfica 4. 16: Curve-Fitting de la bobina de 1x19 de 7 espiras (tiempo).

Y en la tabla 4.11 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica. La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
2.480
2.590
2.679
2.476
2.516
2.400
2.522

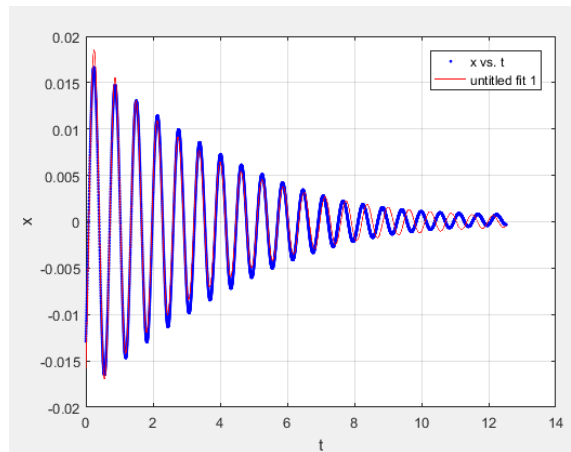
Tabla 4. 11: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 1x19 de 7 espiras (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.709 Hz, es:

$$c = 111.939 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.2.2 Bobina de cables metálicos 6x7 de 8 espiras

Como se puede ver en la Gráfica 4.17, la curva ajustada se descompensa de la real. Esto es debido a que estos sistemas, aunque se suponen lineales en la realidad no lo son y la frecuencia propia varía en función de la amplitud. Además al principio la curva ajustada es superior al valor real y a medida que la oscilación disminuye la curva ajustada obtiene valores inferiores a los reales.



Gráfica 4. 17: Curve-Fitting de la bobina de 6x7 de 8 espiras (tiempo).

Y en la tabla 4.12 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica. La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
2.793
2.724
2.786
2.590
2.560
2.802
2.707

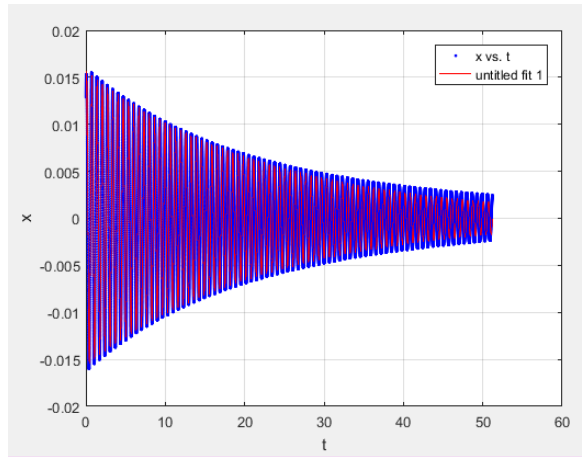
Tabla 4. 12: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 6x7 de 8 espiras (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.587 Hz, es:

$$c = 111.591 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.2.3 Batería de 12 cables metálicos

Como se puede ver en la Gráfica 4.18, en este caso la curva ajustada siempre se encuentra por debajo de la real y no sufre ningún desajuste apreciable en cuanto a la frecuencia propia.



Gráfica 4. 18: Curve-Fitting de la batería de 12 cables metálicos (tiempo).

Y en la tabla 4.13 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
0.450%
0.451%
0.440%
0.443%
0.431%
0.418%
0.439%

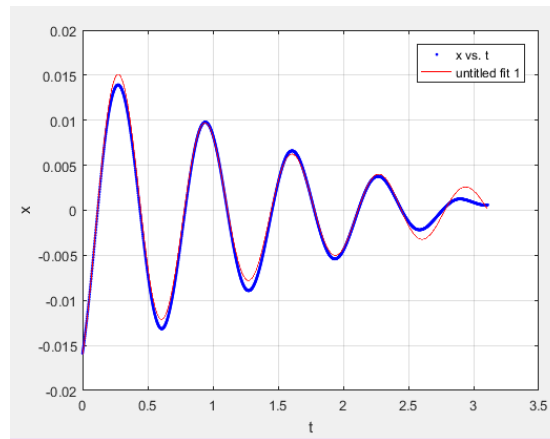
Tabla 4. 13: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la batería de 12 cables metálicos (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación ( ) al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.526 Hz, es:

$$c = 17.387 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.3 Amortiguación viscosa

En la Gráfica 4.19, se puede observar que los máximos están bien ajustados mientras que los mínimos siempre están por encima. Esto se debe a que el sistema no es 100% lineal. Y en cuanto al desajuste final, se debe a que en la realidad el sistema ya se encuentra en su posición de equilibrio, consideración que la función de la curva ajustada no sabe.



Gráfica 4. 19: Curve-Fitting del amortiguador viscoso (tiempo).

Y en la tabla 4.14 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica, junto con su correspondiente coeficiente de amortiguamiento, C. La fila coloreada corresponde al valor medio. Estos datos son más fiables que los obtenidos por la técnica de la envolvente exponencial.

$\xi$ (%)
7.030
6.600
7.400
7.390
7.140
7.730
7.206

Tabla 4. 14: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador viscoso (tiempo).

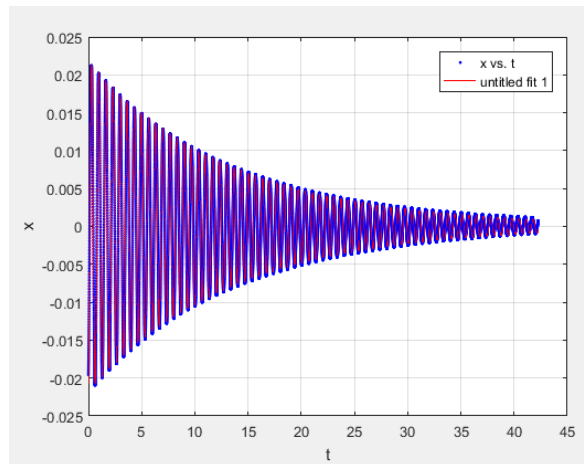
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 274.192 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.4 Amortiguación magnética

##### 4.2.4.1 Amortiguación magnética simple

En la Gráfica 4.20 prácticamente no se distingue entre la curva roja y la azul porque el ajuste realizado es muy bueno. Es por esto que los resultados obtenidos por esta técnica serán los más precisos de las tres técnicas expuestas en este capítulo.



Gráfica 4. 20: Curve-Fitting del amortiguador magnético simple.

Y en la tabla 4.15 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica. La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
0.797
0.819
0.800
0.804
0.798
0.804
0.804

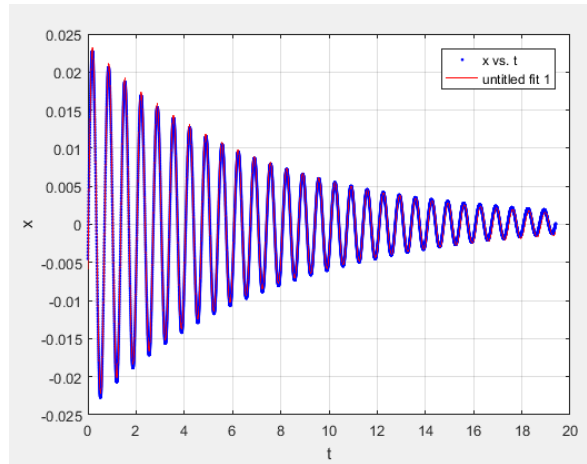
Tabla 4. 15: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético simple (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación ( ) al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 31.204 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.4.2 Amortiguación magnética doble

En la Gráfica 4.15 el ajuste realizado es bastante aceptable ya que la señal ni se descompensa, la frecuencia propia no sufre variación, y tanto los máximos como los mínimos son semejantes.



Gráfica 4. 21: Curve-Fitting del amortiguador magnético doble (tiempo).

Y en la tabla 4.16 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ . La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
1.520
1.526
1.525
1.520
1.527
1.525
1.524

Tabla 4. 16: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético doble (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

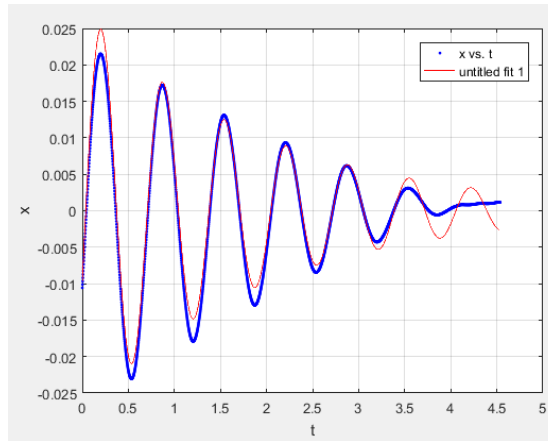
$$c = 59.168 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.5 Amortiguación por fricción seca

##### 4.2.5.1 Amortiguador de fricción seca simple

Como la amortiguación es elevada, es un caso muy similar al obtenido anteriormente con el amortiguador viscoso. En donde los máximos están bien ajustados mientras que los mínimos ajustados siempre están por encima. Esto se debe a que el sistema no es 100% lineal.





Gráfica 4. 22: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca simple (tiempo).

Y en la tabla 4.17 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica. La fila coloreada corresponde al valor medio.

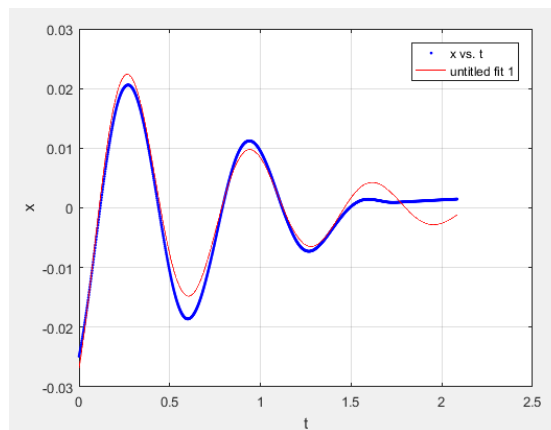
$\xi$ (%)
5.706
5.467
4.896
5.704
4.463
5.268
5.231

Tabla 4. 17: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca simple (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación ( ) al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 199.025 \text{ Ns/m}$$

#### 4.2.5.2 Amortiguador de fricción seca doble



Gráfica 4. 23: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca doble (tiempo).

Y en la tabla 4.18 se recogen los valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica. La fila coloreada corresponde al valor medio.

$\xi$ (%)
8.112
19.050
6.988
13.200
7.809
12.780
10.605

Tabla 4. 18: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca doble (tiempo).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación () al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y la frecuencia propia de 1.495 Hz, es:

$$c = 403.514 \text{ Ns/m}$$

### 4.3. Técnica del decremento logarítmico

La última técnica para evaluar el amortiguamiento en el dominio del tiempo es el decremento logarítmico. Se define como el logaritmo neperiano de la razón de cualquiera de dos amplitudes sucesivas de la respuesta temporal separadas por un periodo  $T_D$ .

Según se obtiene del desplazamiento para un movimiento subamortiguado:

$$\frac{y(t)}{y(t + T_D)} = e^{\xi \cdot \omega_o \cdot T_D} \quad (54)$$

Y aplicando logaritmo neperiano a ambos lados de la ecuación se obtiene el denominado decremento logarítmico  $\delta$  :

$$\delta = \ln \frac{y(t)}{y(t + T_D)} = \xi \cdot \omega_o \cdot T_D \quad (55)$$

Si se desarrolla la expresión anterior sustituyendo  $T_D$  por:

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} = \frac{2\pi \cdot \xi}{\omega_o \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (56)$$

Sustituyéndolo en la ecuación del decremento logarítmico y despejando el amortiguamiento, se obtiene la siguiente relación:

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (57)$$

Cómo la señal medida tiene  $j$  máximos también se tienen  $j$  periodos. Por lo tanto si se nombra por  $y_i, y_{i+j}$  las amplitudes en los instantes  $t_i$  y  $t_i + jT_D$  respectivamente, se obtiene:

$$\frac{y_i}{y_{i+j}} = \frac{y(t_i)}{y(t_i + j \cdot T_D)} = \frac{e^{-\xi \cdot \omega_o \cdot t_i}}{e^{-\xi \cdot \omega_o \cdot (t_i + j \cdot T_D)}} = e^{\xi \cdot \omega_o \cdot j \cdot T_D} \quad (58)$$

Y volviendo a tomar logaritmos neperianos:

$$\ln \frac{y_i}{y_{i+j}} = \xi \cdot \omega_o \cdot j \cdot T_D = j \cdot \delta \quad (59)$$

Despejando el decremento logarítmico, se obtiene la ecuación utilizada para hallar su valor cuando la señal presenta  $j$  máximos:

$$\delta = \frac{1}{j} \cdot \ln \frac{y_i}{y_{i+j}} \quad (60)$$

Para la evaluación del amortiguamiento por esta técnica se han utilizado Matlab para recoger los datos y Excel para realizar el cálculo siguiendo estos pasos:

1. En Matlab se cargan los datos de las señales guardadas en ficheros .txt, como se hizo en el apartado 4.2. y también se hace que las amplitudes oscilen en torno a 0 y que la señal empiece en  $t$  igual a 0.
2. Una vez se tienen la cargada, se utiliza el comando `findpeaks`, presente en Matlab, que encuentra los máximos de esta señal. En la Figura 4.11 se puede ver el código utilizado que devuelve en forma de vectores la amplitud de esos máximos y el tiempo donde tienen lugar:

```
%%  
%Se utiliza el comando findpeaks para encontrar los máximos de nuestra  
%grafica con su valor de Amplitud y de Tiempo  
format long  
[Amplitud, Tiempo]=findpeaks(x,t)
```

Figura 4. 11: Captura del código `findpeaks`.

3. Al ejecutar el código anterior, en el Command Window aparecen los valores de las amplitudes máximas y sus tiempos. Los cuales se copian y se pegan en Excel en columnas distintas, las columnas B y C de la Figura 4.12.
4. Se crea una columna que corresponde a la  $j$ , siendo el primer máximo obtenido el  $j$  igual a 0. Como se ve en la columna A de la Figura 4.12.

5. Por otro lado, se calcula el decremento logarítmico con la ecuación 60, en donde  $i$  siempre es 0. Por lo tanto, la ecuación utilizada queda:

$$\delta = \frac{1}{j} \cdot \ln \frac{y_0}{y_j} \tag{61}$$

6. Una vez ya se tiene los  $j-1$  valores del decremento logarítmico se procede a calcular el amortiguamiento para cada uno de ellos utilizando la ecuación 57.
7. Por último, se realiza la media de todos los amortiguamientos obtenidos en donde se puede comprobar que para valores pequeños de  $j$  el método no es muy preciso, aunque sí que funciona.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Time	LASER		PI	3.14159265			
2	$j$	s	V		Decremento logarítmico		Amortiguamiento		
3	0	0.282	0.01768553		0.09614235		0.015299739		
4	1	0.88	0.01606438		0.104588514		0.016643473		Media
5	2	1.48	0.01434741		0.115405301		0.018364227		0.02110246
6	3	2.076	0.01251003		0.120220457		0.019130179		
7	4	2.67	0.01093387		0.1231319		0.019593289		
8	5	3.262	0.00955522		0.124835256		0.019864228		
9	6	3.852	0.00836231		0.126834154		0.020182171		
10	7	4.438	0.00727838		0.128797007		0.020494375		
11	8	5.022	0.00631148		0.131013274		0.020846879		
12	9	5.602	0.00543917		0.13299162		0.021161534		
13	10	6.18	0.00467781		0.134931037		0.021469991		
14	11	6.754	0.00400885		0.136147277		0.021663427		
15	12	7.324	0.00345209		0.137205191		0.02183168		
16	13	7.89	0.00297154		0.137591651		0.021893143		
17	14	8.454	0.00257658		0.137198919		0.021830682		
18	15	9.014	0.00225864		0.136699414		0.02175124		
19	16	9.572	0.00198488		0.135707158		0.021593429		
20	17	10.126	0.00176072		0.133432541		0.021231661		
21	18	10.68	0.00160153		0.131629078		0.020944823		
22	19	11.23	0.00145033		0.129619448		0.020625187		
23	20	11.778	0.0013236		0.127290967		0.020254831		
24	21	12.324	0.00122096		0.124620209		0.019830022		
25	22	12.87	0.00114008		0.122115182		0.019431565		
26	23	13.414	0.0010662						
27									

Figura 4. 12: Captura del Excel para Decremento Logarítmico.

A continuación, se expondrán para cada uno de los diferentes tipos de amortiguación una tabla donde se recogerán todos los valores calculados del factor y coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14.

Como este método también depende del número de oscilaciones, cuantas más oscilaciones presente el sistema mejores resultados se van a obtener. De esta forma se puede determinar que para los casos muy amortiguados, como son el amortiguador viscoso y los dos amortiguadores de fricción seca, los resultados obtenidos pueden ser poco fiables.

Es por esto por lo que únicamente se exponen las tablas de los resultados directamente sin explicación.

### 4.3.1 Configuración inicial

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
0.082	3.184
0.097	3.747
0.095	3.669
0.090	3.495
0.091	3.533
0.089	3.456
0.090	3.509

Tabla 4. 19: Factores de amortiguamiento s obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la configuración inicial.

### 4.3.2 Amortiguación con cables metálicos

#### 4.3.2.1 Bobina de cables metálicos 1x19 de 7 espiras

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
2.017	89.527
2.160	95.875
2.156	95.697
2.063	91.569
2.110	93.655
2.050	90.992
2.092	92.856

Tabla 4. 20: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la bobina de 1x19 de 7 espiras.

#### 4.3.2.2 Bobina de cables metálicos 6x7 de 8 espiras

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
2.555	105.312
2.530	104.281
2.604	107.331
2.500	103.045
2.410	99.335
2.586	106.589
2.530	104.282

Tabla 4. 21: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la bobina de 6x7 de 8 espiras.

#### 4.3.2.3 Batería de 12 cables metálicos

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
0.425	16.844
0.423	16.765
0.415	16.448

0.408	16.170
0.413	16.369
0.410	16.250
0.416	16.472

Tabla 4. 22: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para la batería de 12 cables.

#### 4.3.3 Amortiguador viscoso

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
8.200	312.004
6.290	239.330
7.000	266.345
7.147	271.938
7.195	273.764
7.740	294.501
7.237	275.374

Tabla 4. 23: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador viscoso.

#### 4.3.4 Amortiguación magnética

##### 4.3.4.1 Amortiguador magnético simple

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
0.783	30.403
0.785	30.480
0.787	30.558
0.790	30.674
0.790	30.674
0.794	30.830
0.788	30.603

Tabla 4. 24: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador magnético simple.

##### 4.3.4.2 Amortiguador magnético doble

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
1.500	58.243
1.510	58.631
1.507	58.514
1.509	58.592
1.516	58.864
1.510	58.631

1.509	58.579
-------	--------

Tabla 4. 25: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador magnético doble.

### 4.3.5 Amortiguación por fricción seca

#### 4.3.5.1 Amortiguador de fricción seca simple

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
5.993	228.029
5.270	200.519
4.690	178.451
5.790	220.305
4.240	161.329
4.910	186.822
5.112	194.523

Tabla 4. 26: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador de fricción seca simple.

#### 4.3.5.2 Amortiguador de fricción seca doble

$\xi$ (%)	C (Ns/m)
8.100	308.199
9.145	347.960
42.390	1612.907
15.150	576.446
6.677	254.055
14.820	563.890
12.946	492.578

Tabla 4. 27: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del decremento logarítmico para el amortiguador de fricción seca doble.





## 5. EVALUACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

En segundo lugar, se va a estudiar el factor de amortiguamiento, para cada uno de los amortiguadores ensayados, en el dominio de la frecuencia con la ayuda del software DEWEsoft.

Para este caso se va a utilizar el movimiento vertical aleatorio que puede asemejarse a los pasos que realiza una persona cuando camina de la plataforma Simumak. Por lo que la configuración de la mesa es:

- Modo 8: movimiento vertical aleatorio (Heave).
- Amplitud: 0.4.
- Frecuencia: 0.2, que equivale a 2 Hz.

Mientras que, para el cálculo del factor de amortiguamiento, para la técnica del peak-picking y circle fit se utilizará únicamente el módulo de Modal Test, configurado como en el Anexo B, y cuyo aspecto es como la figura 5.1. Por otro lado, para la técnica del curve-fitting se post-procesarán en Matlab los datos de las señales exportadas desde DEWEsoft.

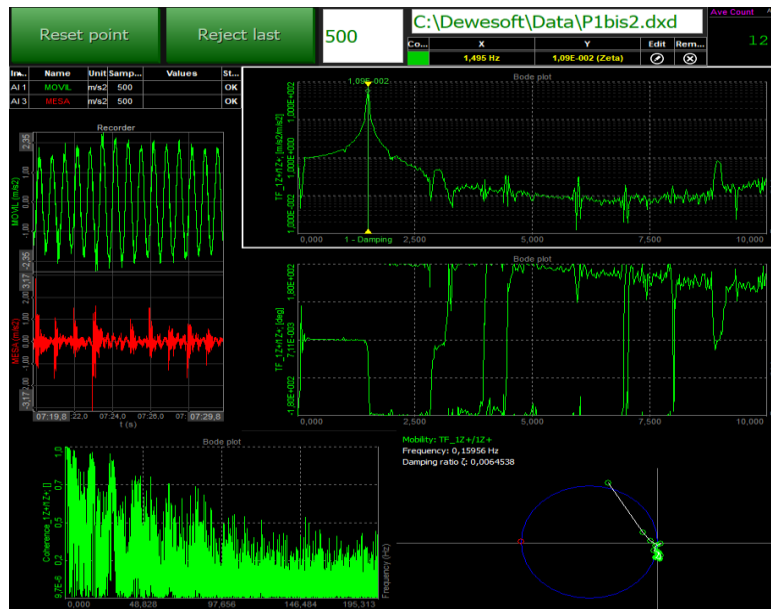


Figura 5. 1: Captura de pantalla módulo Modal Test.

## 5.1 Técnica del Peak-Picking

La técnica del Peak-Picking para la evaluación del factor del amortiguamiento el propio software DEWesoft utiliza la curva FRF que el mismo crea a partir de la relación entre la salida, acelerómetro del soporte móvil, y la entrada, acelerómetro de la plataforma de movimiento, como el de la figura 5.2, en donde la gráfica de arriba relaciona las magnitudes, valor absoluto de S/E, y la gráfica de abajo corresponde al desfase entre dichas magnitudes.

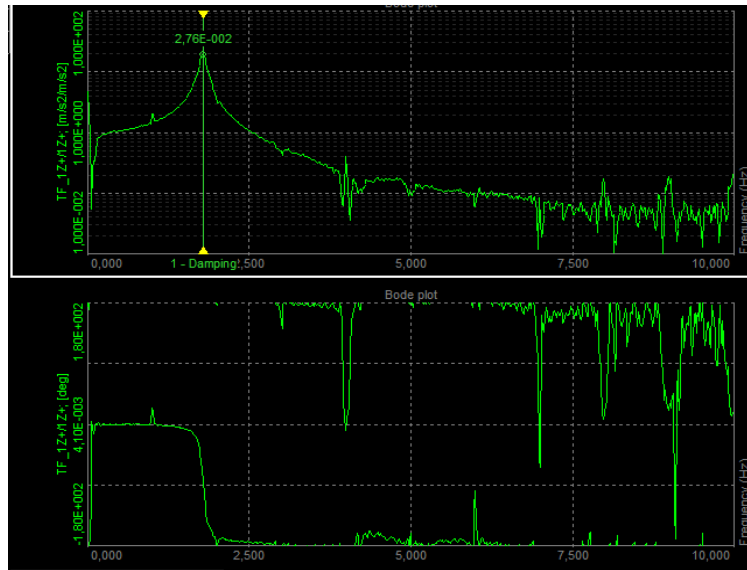


Figura 5. 2: Captura de pantalla FRF.

A partir de estas dos gráficas el propio software calcula el valor del factor de amortiguamiento y la frecuencia a la que se encuentra, como se puede ver en la ventana de la Figura 5.3.

Co...	X	Y	Edit	Rem...
	1,782 Hz	2,76E-002 (Zeta)		

Figura 5. 3: Ventana con el factor de amortiguamiento calculado por el Peak-Picking.

La configuración interna del software para calcular el factor de amortiguamiento consiste en aplicar básicamente la técnica del Peak-Picking, que sigue los siguientes pasos:

1. Encontrar el punto máximo en la gráfica superior de la Figura 5.2.
2. Desde este punto bajar 3 dB o una distancia cuyo valor sea  $\frac{\text{magnitud máx}}{\sqrt{2}}$  que son equivalentes.
3. Bajando la distancia anterior, se obtienen dos puntos que determinan el valor del  $\Delta\omega$ , como se aprecia en la Figura 5.4.

4. Por último, el factor de amortiguamiento sigue la siguiente ecuación, en donde  $w_0$  es la frecuencia propia donde se alcanza ese máximo:

$$\xi = \frac{\Delta w}{w_0} \tag{62}$$

La efectividad de este método depende de los incrementos entre los puntos consecutivos que el software va calculando, ya que puede llegar a darse la situación en que entre un punto y otro cercanos al máximo, se pierda el valor real de ese máximo. Para ello el software permite cambiar el número de puntos que crea por segundo. De esta forma cuantos más puntos evalúe menor será la distancia entre ellos y más difícil será perderse el valor real del máximo. La elección óptima está explicada en el Anexo B.

El software cada 40 segundos aproximadamente va calculando una nueva FRF, en la que va eliminando el ruido, y por tanto determina un nuevo valor del factor del amortiguamiento. Este cálculo tiene una duración infinita, por lo que se ha decidido que para cada amortiguador se creen 10 FRF, de las cuales las 5 primeras se desechan por tener ruido y de las 5 siguientes se recogen el valor del amortiguamiento.

A continuación, se expondrá dos tablas:

- Tabla 5.1 donde se recogen todos los valores medios de los factores de amortiguamiento de cada amortiguador calculados por la técnica del Peak-Picking junto con la frecuencia propia determinada por la Figura 5.3 para cada uno de los diferentes amortiguadores ensayados.

TIPO DE AMORTIGUADOR	MEDIA 1	MEDIA 2	MEDIA 3	$\xi$ (%)	$w_n$ (rad/s)
Configuración inicial	0.985	1.09	0.957	1.009	9.368
Amortiguación con cables metálicos					
Bobina 1x19 7 espiras	2.882	1.731	3.485	2.591	11.103
Bobina 6x7 8 espiras	3.07	3.87	4.041	3.635	10.21
Bateria de 12 cables	1.091	0.903	0.871	0.950	9.483
Amortiguación viscosa	10.7	13.102	11.23	11.633	9.961
Amortiguación magnética					
Amortiguador magnético simple	0.92	0.945	1.072	0.977	9.389
Amortiguador magnético doble	1.942	2.184	1.84	1.984	9.414
Amortiguación por fricción seca					
Amortiguador de fricción seca simple	15.21	23.64	21.06	19.637	11.457
Amortiguador de fricción seca doble	32.105	34.836	39.056	35.218	10.334

Tabla 5. 1: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Peak-Picking.

- Tabla 5.2 que recoge los valores del coeficiente de amortiguamiento calculados a partir de la ecuación 14. Se recuerda que el valor de la masa de los 16 listones es de 195.84 Kg y el resto de la masa móvil de 10.84 Kg.

TIPO DE AMORTIGUADOR	C (Ns/m)
Configuración inicial	39.075
Amortiguación con cables metálicos	
Bobina 1x19 7 espiras	118.896
Bobina 6x7 8 espiras	153.391
Batería de 12 cables	37.249
Amortiguación viscosa	478.996
Amortiguación magnética	
Amortiguador magnético simple	37.910
Amortiguador magnético doble	77.187
Amortiguación por fricción seca	
Amortiguador de fricción seca simple	929.989
Amortiguador de fricción seca doble	1504.388

Tabla 5. 2: Coeficientes de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Peak-Picking.

## 5.2 Técnica del Circle Fit

La FRF de la Figura 5.2 también se puede representar por un lado la parte real y por otro la parte imaginaria de un número complejo.

A partir de esto, el procedimiento del Circle Fit es trabajar simultáneamente con la parte real y la parte imaginaria en lo que se denomina el diagrama de Nyquist. Como se ve en la Figura 5.4, en donde el eje horizontal corresponde a la parte real y el eje vertical a la parte imaginaria:

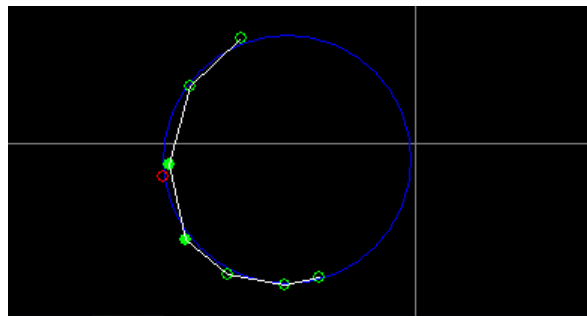


Figura 5. 4: Diagrama de Nyquist.

En este diagrama el software crea una circunferencia formada por el punto correspondiente a la frecuencia propia, el punto máximo, y los puntos más próximos a él. Y seguidamente se aplican una serie de expresiones que a partir del valor del centro y del radio de la circunferencia se calcula tanto el factor de amortiguamiento como la frecuencia propia. El software ofrece el resultado en la siguiente ventana:

Mobility: TF\_1Z+/1Z+  
 Frequency: 1,7831 Hz  
 Damping ratio  $\zeta$ : 0,027044

Figura 5. 5: Ventana con el factor de amortiguamiento calculado por el Curve Fit.

La efectividad de este método está sometida al ruido de la señal porque a poco ruido que se tenga la circunferencia se distorsiona porque los puntos que la forman varían de posición, provocando que los resultados obtenidos difieran mucho unos de otros. También depende del número de puntos elegidos para la formación de dicha circunferencia. El software da la posibilidad de elegir que esté formada por los siguientes números de puntos: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 y 21. Los resultados no tienen por qué ser iguales como ocurre en cada uno de los ensayos realizados. Ya que en ocasiones si se eligen pocos puntos el software es incapaz de crear una circunferencia o si se eligen muchos puntos puede que alguno de ellos se encuentre muy alejado del pico de frecuencia propia dando lugar a una distorsión de la circunferencia.

La obtención de resultados es simultánea al apartado 5.1, por lo tanto, se van obteniendo 10 mediciones diferentes.

Teniendo en cuenta todo esto, a continuación, se expondrá dos tablas:

- Tabla 5.3: se recogen todos los valores medios de los factores de amortiguamiento de cada amortiguador calculados por la técnica del Circle Fit, indicando entre paréntesis el número de puntos utilizado para formar la circunferencia.

TIPO DE AMORTIGUADOR	MEDIA 1	MEDIA 2	MEDIA 3	$\zeta$ (%)
Configuración inicial	0.061 (21)	1.48 (13)	1.03 (9)	0.857
Amortiguación con cables metálicos				
Bobina 1x19 7 espiras	2.27 (3)	3.64 (19)	2.69 (15)	2.867
Bobina 6x7 8 espiras	2.71 (17)	4.23 (9)	3.56 (7)	3.5
Batería de 12 cables	1.19 (13)	0.22 (15)	1.54 (13)	0.983
Amortiguación viscosa	13.68 (11)	7.55 (3)	10.5 (3)	10.577
Amortiguación magnética				
Amortiguador magnético simple	1.45 (21)	1.08 (21)	1.01 (21)	1.18
Amortiguador magnético doble	2.01 (9)	2.8 (9)	1.61 (7)	2.14
Amortiguación por fricción seca				
Amortiguador de fricción seca simple	19.72 (11)	16.55 (7)	18.96 (9)	18.41
Amortiguador de fricción seca doble	22.8 (3)	28.24 (7)	30.56 (7)	27.2

Tabla 5. 3: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Circle-Fit.

- Tabla 5.4: recoge los valores del coeficiente de amortiguamiento calculados a partir de la ecuación 14.

TIPO DE AMORTIGUADOR	C (Ns/m)
Configuración inicial	33.186
Amortiguación con cables metálicos	
Bobina 1x19 7 espiras	131.567
Bobina 6x7 8 espiras	147.714
Batería de 12 cables	38.546
Amortiguación viscosa	435.492
Amortiguación magnética	
Amortiguador magnético simple	45.796
Amortiguador magnético doble	83.275
Amortiguación por fricción seca	
Amortiguador de fricción seca simple	871.873
Amortiguador de fricción seca doble	1161.892

Tabla 5. 4: Coeficientes de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Circle-Fit.

### 5.3 Técnica del Curve-Fitting

Como ya se ha explicado en el apartado 4.2, esta técnica consiste en ajustar la curva de la señal real medida a la curva del valor absoluto de la ecuación 53, que se encuentra en el dominio de la frecuencia y que es la señal que DEWESoft permite exportar. La ecuación es la siguiente:

$$\left| \frac{X(j\omega)}{Y(j\omega)} \right| = \frac{\sqrt{\omega_0^4 + (2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot \omega)^2}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot \omega)^2}} \quad (63)$$

Para su aplicación se ha utilizado primero el software DEWESoft y en segundo Matlab, siguiendo los pasos expuestos a continuación:

1. Exportar en formato .xlsx la función de transferencia grabada durante cada ensayo y que recibe el nombre de TF\_1Z+/1Z+, como se puede ver en la Figura 5.6:

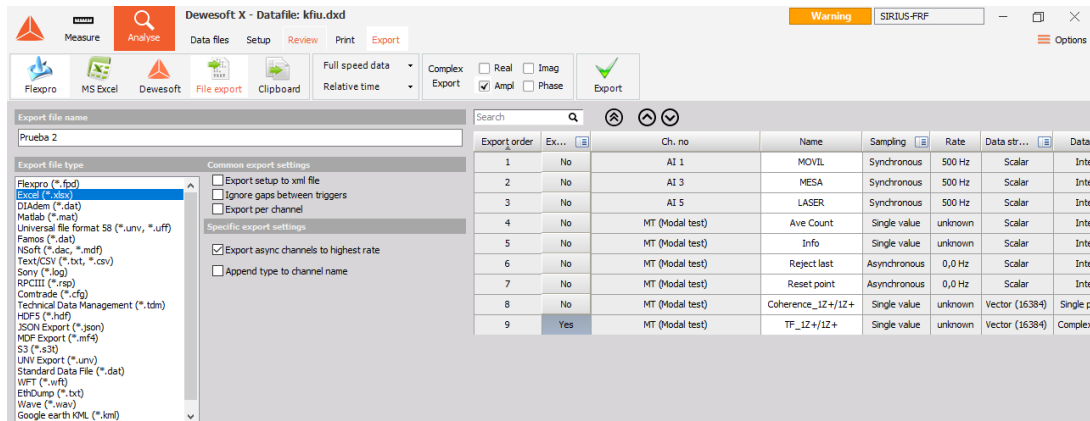


Figura 5. 6: Captura del módulo Export en .xlsx.

2. Cargar los datos del fichero .xlsx a Matlab con ayuda de la función xlsread que permite indicar el nombre de la página donde se encuentran los datos y el rango de celdas que se quieren cargar. Estos datos se guardan en dos vectores: uno para la amplitud de la señal, Amp, y otro para la frecuencia, F, en rad/s. Se utiliza el siguiente código:

```
%%
$num = xlsread(filename,sheet,xlRange) lee a partir de la hoja de cálculo
%y el rango especificados.
close all
clear all
clc
w = xlsread('P1.xlsx','Single value','C4:P24'); %Leer datos de un Excel
w=w'; %Trasponer el vector para que sea una columna
Amp = xlsread('P1.xlsx','Single value','C2:P22'); %Leer datos de un Excel
Amp = Amp'; %Trasponer el vector para que sea una columna
```

Figura 5. 7: Código Matlab paso 2.

3. Dibujar la gráfica con el código plot en el que eje horizontal corresponde al vector frecuencia y el eje vertical al vector amplitud. De esta forma se comprueba que los datos guardados son correctos y se determina el valor de la frecuencia propia, que corresponde a la coordenada x del punto máximo:

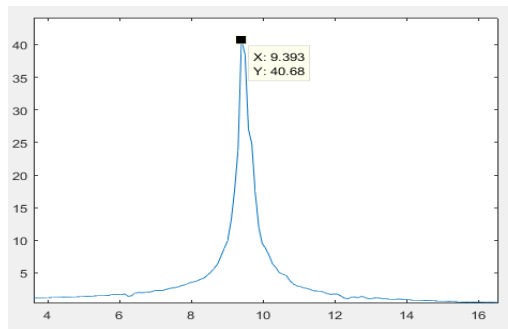


Figura 5. 8: Cálculo de la frecuencia propia de la señal.

4. Utilizar la herramienta de Matlab denominada “cftool”. Aplicación que ya viene programada por Matlab y que permite realizar el ajuste de la curva con una infinidad de opciones y pestañas que se pueden modificar. Se puede ver en la Figura 5.9:

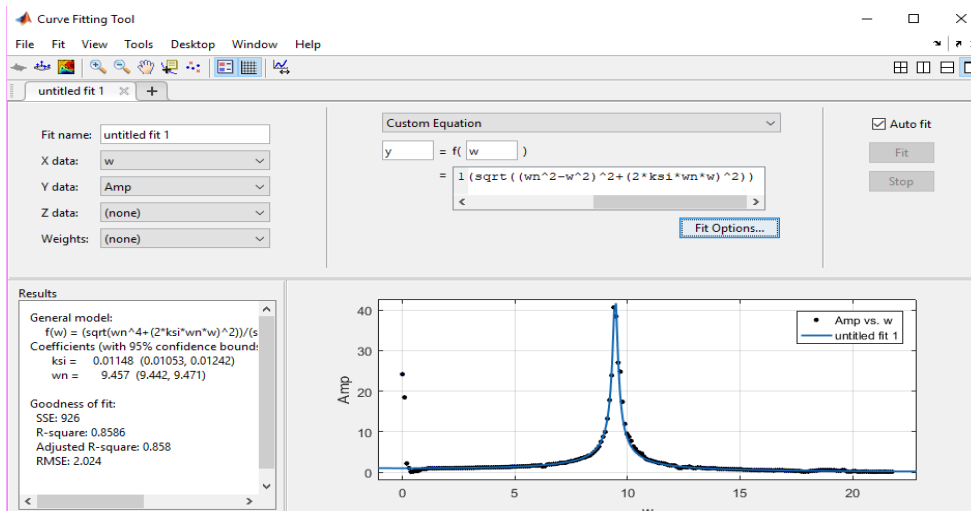


Figura 5. 9: Captura de la herramienta cftool.

- En X data elegir  $w$ .
  - En Y data elegir Amp.
  - Dentro de las posibles ecuaciones a la que ajustar la señal elegimos Custom Equation, ya que permite poner la ecuación en el dominio de la frecuencia vista antes. Además, se tiene que indicar que la curva “y” es función de la frecuencia “w”.
  - Ajuste de las constantes de la ecuación con Fit Options para así facilitar al programa el ajuste de la curva.:
    - $w$ : frecuencia propia del sistema que nunca puede ser negativa por lo que sus límites van de 0 a  $+\infty$ . Y como valor inicial poner la frecuencia hallada antes.
    - $ksi$ : valor del amortiguamiento del sistema que puede tomar un valor entre 0 y 1.
5. Por último, el programa realiza iteraciones hasta hallar el mejor ajuste posible y dar los valores de las constantes anteriores que determinan este ajuste. También presenta la posibilidad de crear un código que guarda toda la configuración establecida antes. De esta forma, para el estudio sucesivo de las diferentes señales se escribe en el Command Window el siguiente código:

*curvefitting ( t , x )*

Al ejecutarlo presenta una gráfica y los valores que tienen las distintas constantes, entre ellas el amortiguamiento. La gráfica está formada por dos curvas, una azul con puntos que corresponde a la señal real y otra en rojo que corresponde a la curva ajustada por este método.

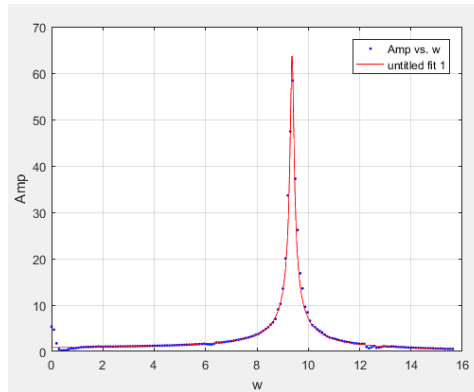
A continuación, se presentarán para cada uno de los diferentes tipos de amortiguación ensayados:

- Una gráfica que represente la señal real y la ajustada con un breve comentario.
- Una tabla donde se recogerán todos los valores calculados del factor y coeficiente de amortiguamiento.



### 5.3.1 Configuración inicial

En la Gráfica 5.1 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul, en donde el máximo de la curva ajustada es superior al punto máximo de la señal real.



Gráfica 5. 1: Curve-Fitting de la configuración inicial (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.5 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
0.875
0.781
0.873
0.842

Tabla 5. 5: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la configuración inicial (frecuencia).

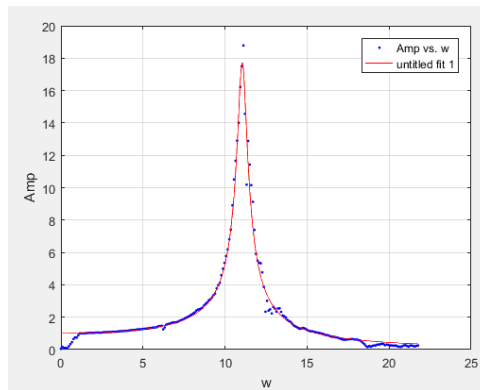
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 9.368 rad/s es:

$$c = 32.598 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.2 Amortiguación con cables metálicos

#### 5.3.2.1 Bobina de cables metálicos 1x19 de 7 espiras

En la Gráfica 5.2 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul, en donde en esta ocasión el máximo de la curva ajustada es inferior al punto máximo de la señal real.



Gráfica 5. 2: Curve-Fitting de la bobina de 1x19 de 7 espiras (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.6 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
2.833
2.83
2.778
2.814

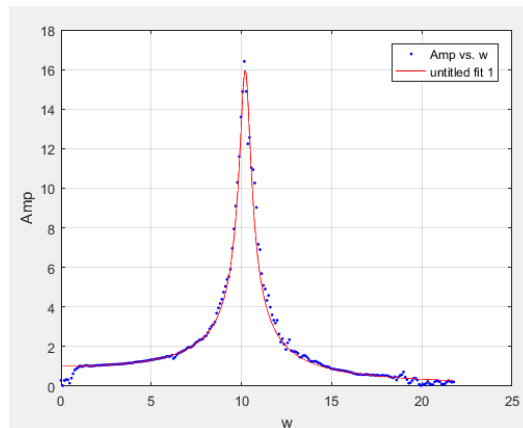
Tabla 5. 6: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 1x19 de 7 espiras (frecuencia).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 11.1 rad/s es:

$$c = 129.094 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.2.2 Bobina de cables metálicos 6x7 de 8 espiras

En la Gráfica 5.3 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul, en donde el máximo de la curva ajustada vuelve a ser superior al punto máximo de la señal real.



Gráfica 5. 3: Curve-Fitting de la bobina de 6x7 de 8 espiras (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.7 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
2.961
3.141
2.996
3.032

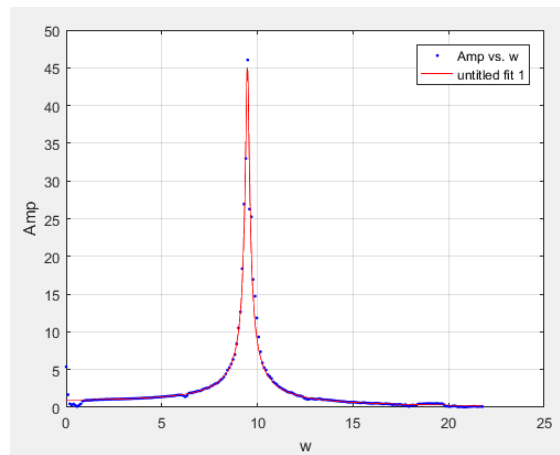
Tabla 5. 7: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la bobina de 6x7 de 8 espiras (frecuencia).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 10.21 rad/s es:

$$c = 127.949 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.2.3 Batería de 12 cables metálicos

En la Gráfica 5.4 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul, en donde el máximo de la curva ajustada vuelve a ser inferior al punto máximo de la señal real.



Gráfica 5. 4: Curve-Fitting de la batería de 12 cables metálicos (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.8 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
1.148
1.108
1.017
1.090

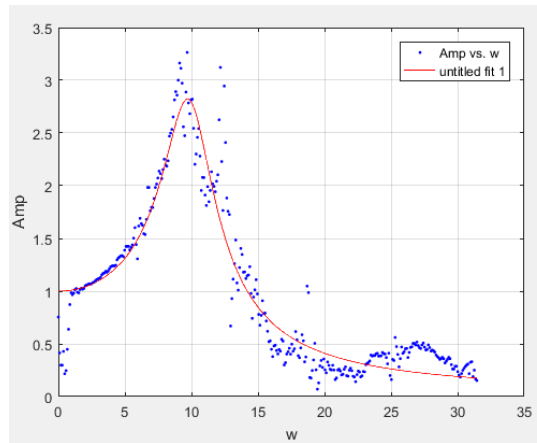
Tabla 5. 8: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para la batería de 12 cables metálicos (frecuencia).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 9.483 rad/s es:

$$c = 42.712 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.3 Amortiguación viscosa

En la Gráfica 5.5 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul. En este caso como el amortiguamiento es mucho mayor que las anteriores se puede comprobar que la amplitud máxima es mucho menor, algo que ya se sabía en la teoría. Además, se puede apreciar que hay numerosos puntos por encima de la curva ajustada, pero esto no tiene por qué significar que el ajuste sea malo.



Gráfica 5. 5: Curve-Fitting del amortiguador viscoso (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.9 se recogen los 4 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
19.84
15.78
18.93
19.26
18.381

Tabla 5. 9: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador viscoso (frecuencia).

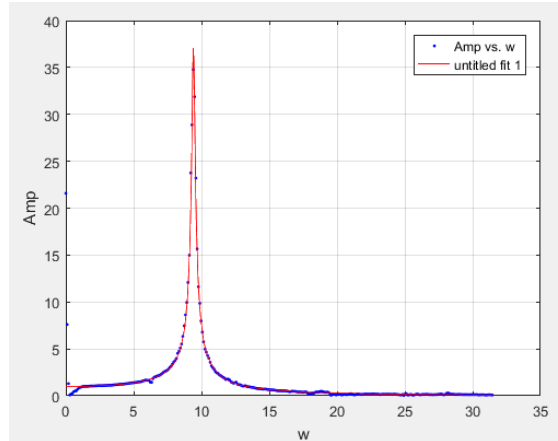
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 9.961 rad/s es:

$$c = 756.79 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.4 Amortiguación magnética

#### 5.3.4.1 Amortiguación magnética simple

En la Gráfica 5.6 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul, en donde el máximo de la curva ajustada es superior al punto máximo de la señal real.



Gráfica 5. 6: Curve-Fitting del amortiguador magnético simple (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.10 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
1.361
1.139
1.349
1.279

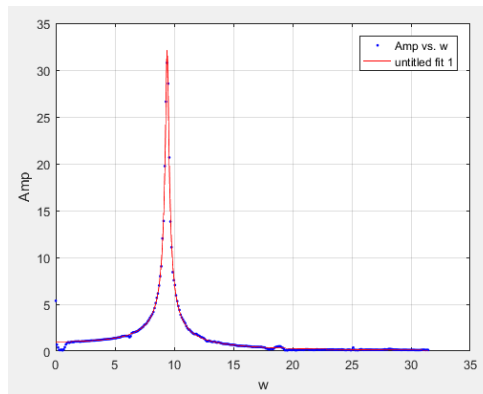
Tabla 5. 10 Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético simple (frecuencia).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 9.389 rad/s es:

$$c = 49.632 \text{ Ns/m}$$

#### 5.3.4.2 Amortiguación magnética doble

En la Gráfica 5.7 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul, en donde el máximo de la curva ajustada es bastante similar al punto máximo de la señal real, por lo que el ajuste es bastante aceptable.



Gráfica 5. 7: Curve-Fitting del amortiguador magnético doble (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.11 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
1.271
1.902
1.561
1.557

Tabla 5. 11: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador magnético doble (frecuencia).

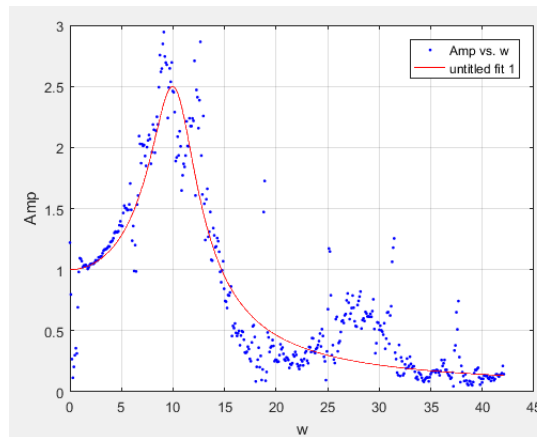
Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 9.414 rad/s es:

$$c = 60.583 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.5 Amortiguación por fricción seca

#### 5.3.5.1 Amortiguador de fricción seca simple

En la Gráfica 5.8 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul. En este caso como el amortiguamiento vuelve a ser elevado se puede comprobar que la amplitud máxima es mucho menor. Además, se puede apreciar que hay numerosos puntos por encima de la curva ajustada, pero esto no tiene por qué significar que el ajuste sea defectuoso.



Gráfica 5. 8: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca simple (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.12 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
22.31
19.6
22.37
21.387

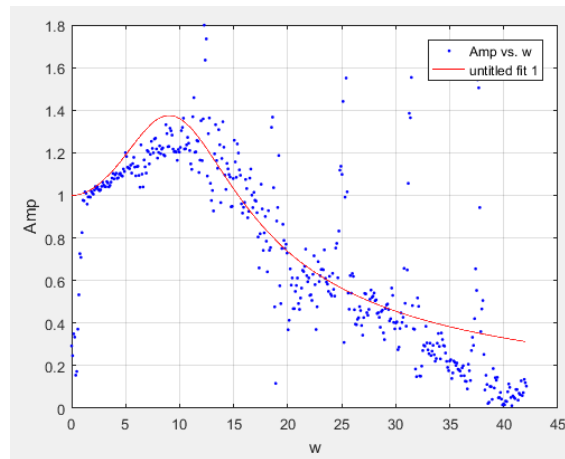
Tabla 5. 12: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca simple (frecuencia).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 10.334 rad/s es:

$$c = 913.549 \text{ Ns/m}$$

### 5.3.5.2 Amortiguador de fricción seca doble

En la Gráfica 5.9 se puede observar la curva ajustada en rojo a los puntos de la señal medida en azul. Este caso con el mayor amortiguamiento de los diferentes amortiguadores ensayados y por lo tanto es el que tiene menor amplitud máxima. Además, se puede apreciar que hay numerosos puntos dispersos a lo largo de la señal debidos a la dificultad de determinar la FRF para amortiguaciones por fricción seca ya que se supone lineal a la velocidad cuando en realidad no lo es.



Gráfica 5. 9: Curve-Fitting del amortiguador de fricción seca doble (frecuencia).

Mientras en la tabla 5.13 se recogen los 3 valores del factor de amortiguamiento,  $\xi$ , calculados por esta técnica junto con su valor medio, la celda coloreada:

$\xi$ (%)
57.71
43.83
59.34
53.144

Tabla 5. 13: Factores de amortiguamiento obtenidos por la técnica del Curve-Fitting para el amortiguador de fricción seca doble (frecuencia).

Y el correspondiente coeficiente de amortiguamiento aplicando la ecuación 14 al valor medio del factor de amortiguamiento anterior y sabiendo que la frecuencia propia es de 11.457 rad/s es:

$$c = 2516.766 \text{ Ns/m}$$



## 6. CONCLUSIONES

### 6.1 Comparación de resultados

En este apartado se recogen para cada uno de los nueve ensayos realizados los resultados finales obtenidos, es decir, el factor de amortiguamiento, el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia propia.

En los que se demuestra que el factor de amortiguamiento es un artificio matemático que se ha creado para dar sentido a las ecuaciones del movimiento y que además se supone lineal y proporcional a la velocidad ya que es un parámetro que no se puede cuantificar de primeras. Debido a estas suposiciones, los resultados obtenidos para un mismo amortiguador pueden diferir considerablemente dependiendo la técnica utilizada, como se demuestra a continuación.

#### 6.1.1 Configuración inicial

Este caso no es muy importante en cuanto a los valores de amortiguamiento si no que su importancia radica en definir la situación inicial, en especial la frecuencia propia inicial del sistema.

Como se puede observar los resultados obtenidos por el dominio del tiempo son 10 veces más pequeños que los del dominio de la frecuencia, esto se debe a que para amortiguamientos muy pequeños las técnicas utilizadas en el dominio de la frecuencia no dan resultados coherentes. Ya que, en casos posteriores, si el tipo de amortiguador ensayado tiene una amortiguación muy pequeña los resultados obtenidos son iguales que si no utiliza el amortiguador.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	0.091	3.52	1.495
Curve fitting	0.091	3.524	1.495
Decremento logarítmico	0.09	3.509	1.495
DOMINO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	1.009	39.075	1.491
Circle fit	0.857	33.186	1.491
Curve fitting	0.842	32.598	1.491

Tabla 6. 1: Resultados obtenidos para la configuración inicial.

#### 6.1.2 Amortiguación con cables metálicos

Este tipo de amortiguación se basa en el micro rozamiento entre los hilos que forman el cable y cuanto mayor sea este rozamiento mayor será la energía disipada el amortiguamiento producido.

En primer lugar, la configuración del amortiguador en bobina produce mayor amortiguamiento que en batería debido a que se modifica la posición natural de los cables ejerciéndose mayor presión entre ellos.

Y, en segundo lugar, la bobina 6x7 de 8 espiras es la que mayor amortiguación produce porque su cable tiene un mayor número de hilos y por lo tanto el rozamiento va a ser mayor. 42 hilos más el alma central frente a 19 hilos.

En cuanto a los resultados obtenidos son todos del mismo orden, siendo ligeramente superiores los del dominio de la frecuencia. Mientras que los obtenidos en el dominio de la frecuencia para la batería de cables se pueden despreciar ya que son semejantes a los obtenidos con la configuración inicial.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	2.129	94.5	1.709
Curve fitting	2.522	111.939	1.709
Decremento logarítmico	2.092	92.856	1.709
DOMINIO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	2.591	118.896	1.767
Circle fit	2.867	131.567	1.767
Curve fitting	2.814	129.093	1.767

Tabla 6. 2: Resultados obtenidos para la bobina de cables 1x19 de 7 espiras.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	2.841	117.091	1.587
Curve fitting	2.707	111.591	1.587
Decremento logarítmico	2.53	104.282	1.587
DOMINIO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	3.635	153.391	1.625
Circle fit	3.5	147.714	1.625
Curve fitting	3.032	127.948	1.625

Tabla 6. 3: Resultados obtenidos para la bobina de cables 6x7 de 8 espiras.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	0.382	15.128	1.526
Curve fitting	0.439	17.387	1.526
Decremento logarítmico	0.416	16.472	1.526

DOMINIO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	0.95	37.249	1.509
Circle fit	0.983	38.546	1.509
Curve fitting	1.09	42.712	1.509

Tabla 6. 4: Resultados obtenidos para la batería de 12 cables metálicos.

### 6.1.3 Amortiguación viscosa

En cuanto a los resultados en el dominio del tiempo se consideran poco fiables, ya que las técnicas utilizadas se basan en los máximos de las oscilaciones que presenta durante el ensayo del free decay. Y al ser muy amortiguado, el número de oscilaciones no es suficiente, Gráfica 4.10, para considerar una evaluación aceptable.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	8.083	307.56	1.495
Curve fitting	7.206	274.192	1.495
Decremento logarítmico	7.237	275.374	1.495
DOMINIO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	11.633	478.996	1.585
Circle fit	10.577	435.492	1.585
Curve fitting	18.381	756.792	1.585

Tabla 6. 5: Resultados obtenidos para el amortiguador viscoso.

### 6.1.4 Amortiguación magnética

Se puede comprobar que el factor de amortiguamiento calculado para el amortiguador magnético doble es prácticamente el doble que el calculado para el simple. Esto se podía esperar ya que es el mismo diseño de amortiguador, pero en un ensayo sólo se utiliza uno y en el otro se utilizan los dos a la vez.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	0.782	30.377	1.495
Curve fitting	0.804	31.204	1.495
Decremento logarítmico	0.788	30.603	1.495
DOMINIO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	0.977	37.91	1.494
Circle fit	1.18	45.796	1.494
Curve fitting	1.279	49.63	1.494

Tabla 6. 6: Resultados obtenidos para el amortiguador magnético simple.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	1.533	59.537	1.495
Curve fitting	1.524	59.168	1.495
Decremento logarítmico	1.504	58.579	1.495
DOMINO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	1.984	77.187	1.498
Circle fit	2.14	83.275	1.498
Curve fitting	1.557	60.58	1.498

Tabla 6. 7: Resultados obtenidos para el amortiguador magnético doble.

### 6.1.5 Amortiguación por fricción seca

Como ya se explicó en el capítulo 2, la evaluación del amortiguamiento por fricción seca no da resultados coherentes, y se puede comprobar en que hay gran diferencia entre el dominio del tiempo y de la frecuencia. Esto se debe a que este tipo de amortiguamiento se supone lineal y proporcional a la velocidad, cuando en realidad no lo es. Por ello la utilización de este tipo de amortiguadores es escasa.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	6.069	230.905	1.495
Curve fitting	5.231	199.025	1.495
Decremento logarítmico	5.112	194.523	1.495
DOMINO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	19.637	929.989	1.645
Circle fit	18.41	871.873	1.645
Curve fitting	21.387	913.54	1.645

Tabla 6. 8: Resultados obtenidos para el amortiguador de fricción seca simple.

	$\xi$ (%)	C (Ns/m)	$W_0$ (Hz)
DOMINIO DEL TIEMPO			
Envolvente exponencial	12.908	491.159	1.495
Curve fitting	10.005	403.514	1.495
Decremento logarítmico	12.946	492.578	1.495
DOMINO DE LA FRECUENCIA			
Peak-Picking	35.218	1504.388	1.823
Circle fit	27.2	1161.842	1.823
Curve fitting	53.144	2516.766	1.823

Tabla 6. 9: Resultados obtenidos para el amortiguador de fricción seca doble

## 6.2 Líneas futuras

Se proponen como recomendaciones a tener en cuenta en futuros desarrollos de este proyecto las siguientes:

- Búsqueda de la relación, si existe, entre las diferentes posiciones de regulación que permite el amortiguador viscoso Steerin Damper FXCNC Racing con el factor de amortiguamiento obtenido.
- Como quinto sistema de amortiguación, estudiar la capacidad amortiguadora de materiales plásticos como por ejemplo el neopreno. Para ello se puede utilizar una lámina de este material de dimensiones iguales al hueco existente entre las ballestas, y de esta forma incrustar la lámina entre ellas como se puede ver en la Figura 6.1



Figura 6. 1: Lámina de neopreno colocada entre las ballestas.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Balachandran and E. Magrab, *Vibraciones*. México: Thomson, 2006.
- [2] Ewins, D. J. *Modal testing: theory, practice and application*, 2nd ed. Baldock, Hertfordshire, England: Research Studies Press, 2000.
- [3] N. Maia and J. Silva, *Theoretical and experimental modal analysis*. Hertfordshire: Research Studies Press, 1998.
- [4] UVa, Escuela de Ingenierías Industriales, *Teoría de las vibraciones*. Valladolid.
- [5] G. Losa Miranda, "Tecnologías de sensorización e identificación modal. Aplicación del amortiguamiento estructural", Universidad de Valladolid, 2015.
- [6] C. Anel Martín, "Parametrización de un prototipo de TMD magnético ajustable en frecuencia y amortiguamiento", Universidad de Valladolid, 2016.
- [7] Simumak, *Documentación especificación técnica SMK3DOFMN*. 2012.
- [8] "Universal Accelerometers", *Mmf.de*, 2019. [Online]. Available: <https://www.mmf.de/pdf/1-1.pdf>. [Accessed: 09- Jul- 2019].
- [9] "Compact Laser Displacement Sensor HL-G1", *Www3.panasonic.biz*. [Online]. Available: <https://www3.panasonic.biz/ac/ae/fasys/measurement/measurement/hl-g1/index.jsp>. [Accessed: 09- Jul- 2019].
- [11] "Cable acero galvanizado 6x7+1", *Herpon*. [Online]. Available: <https://herrajesdelponiente.es/mosquiteras-cerramientos-cables-hilos/704-cable-acero-galvanizado-elevacion-decoracion-invernadero-tensar.html>. [Accessed: 09- Jul- 2019].
- [12] "Steering Damper de FXCNC Racing", *www.alibaba.com*. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/FXCNC-racing-part-adjusting-CNC-steering\\_60558629546.html](https://www.alibaba.com/product-detail/FXCNC-racing-part-adjusting-CNC-steering_60558629546.html). [Accessed: 09- Jul- 2019].
- [13] "FXCNC | Home", *Fxcnc.us*, 2019. [Online]. Available: <http://fxcnc.us/fxcnc-pro-cnc-racing-steering-damper-aluminium-alloy-spare-parts-pid-64.html>. [Accessed: 09- Jul- 2019].





# ANEXO A: MANUAL DE ARRANQUE DE LA PLATAFORMA SIMUMAK

## 1. Conexión de cables:

El primer paso es conectar los tres cables que se ven en la siguiente imagen.



Figura A. 1: Conexión de cables.

- Cable Azul: alimentación de 230 V
- Cable Gris: cable correspondiente a la seta de la parada de emergencia.
- Cable Ethernet: cable que va unido al ordenador para poder comunicarnos con la plataforma desde la aplicación.

## 2. Encendido de la plataforma:

Pulsar el interruptor que tiene la plataforma y esperar a que realice la puesta en marcha.

## 3. Inicio del programa:

Una vez que la plataforma haya terminado la puesta en marcha, se abre la aplicación proporcionada por Simumak que tiene el nombre de SMK3DOFMB\_TESTPROGRAM\_JOYSTICK.exe y que se encuentra en el ordenador. La pantalla es la siguiente:

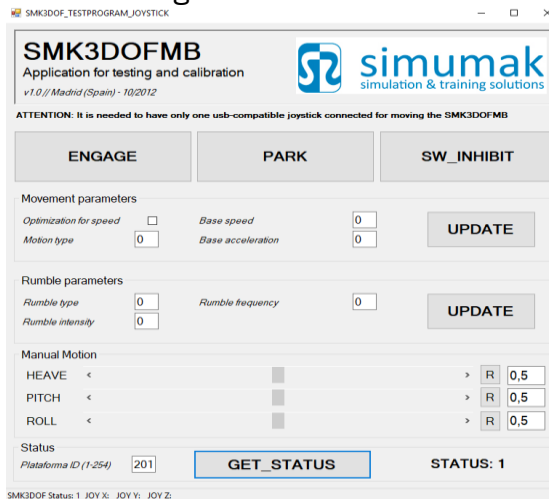


Figura A. 2: Captura aplicación Simumak.

Primero hay que cambiar el ID de la plataforma a 201, que es la que corresponde a nuestra plataforma, pulsar a “intro” y comprobar con el GET\_STATUS en qué estado se encuentra. Si se encuentra en el estado número 1 el arranque se ha realizado de manera satisfactoria.

#### 4. Inicio de movimientos:

Para empezar a mover la plataforma se pulsa el recuadro ENGAGE y a continuación se comprueba con el GET\_STATUS que se encuentra en el estado ENGAGED, número 3. Si esto es así ya se puede empezar a moverlo.

##### Opción 1 - Manual motion:

Opción de movimiento manual para variar la posición de la plataforma según tres movimientos:

- Heave: movimiento vertical
- Pitch: movimiento lateral.
- Role: movimiento frontal.

Los tres movimientos toman valores de 0 a 1, los cuales se pueden variar desplazando la barra o para ser más preciso dando a las flechitas. El botón R (Reset), lleva la mesa a la posición intermedia (0.5).

Manual Motion			
HEAVE	<	>	R 0,5
PITCH	<	>	R 0,5
ROLL	<	>	R 0,5

Figura A. 3: Captura del Manual Motion.

##### Opción 2 – Rumble parameters:

Programa para generar vibraciones con distintas frecuencias y amplitudes que consta de 11 modos:

- Modo 0: no hay movimiento.
  - Modo 1: Movimiento lateral (Pitch).
  - Modo 2: Movimiento frontal (Role).
  - Modo 3: Movimiento vertical (Heave).
  - Modo 4: combinación del modo 1 y 2.
  - Modo 5: combinación del modo 1, 2 y 3.
  - Modos 6.....10: mismos modos que 1....5 pero con movimiento aleatorio.
- Movimiento sinusoidal

Rumble parameters				
Rumble type	0	Rumble frequency	0	UPDATE
Rumble intensity	0			

Figura A. 4: Captura del Rumble parameters.

Para cambiar el modo de movimiento hay que cambiar el número en el Rumble Type, pulsar a “intro” y por último, para que la plataforma comience a realizar ese movimiento pulsar a UPDATE.

Los valores que toman la amplitud (Rumble intensity) y la frecuencia (Rumble frequency) van desde 0 a 1 poniendo los valores decimales con una coma debido a la configuración del programa. Tener cuidado con el valor de la frecuencia ya que es inversamente proporcional a la frecuencia real, siendo



el valor más pequeño recomendable el 0.02, que corresponde a una frecuencia real de 10 Hz.

Es importante recordar que cada vez que se cambia uno de estos tres valores hay que pulsar a “intro” y posteriormente a UPDATE para que la plataforma realice el movimiento deseado.

### **Opción 3 – Superposición de Manual Motion y Rumble Parameters:**

Es posible variar la posición de la plataforma a la vez que está produciendo una vibración debida al Rumble Parameters.

### **5. Parada de la plataforma:**

Para parar la plataforma hay que dar a PARK y comprobar con GET\_STATUS que se encuentra en el estado PARKED, número 1.

Se recomienda poner a cero todos los valores del Rumble Parameters antes de dar a PARK, pulsar el “intro” y luego UPDATE, ya que si se vuelve a arrancar la plataforma con el ENGAGE ésta realizaría los movimientos que estaban guardados antes de dar a PARK.

### **6. Apagado de la plataforma:**

Apagar la plataforma con el interruptor.



## ANEXO B: CONFIGURACIÓN DEWESOFT X3

En este anexo se procede a explicar de forma simplificada los pasos a seguir para la configuración del software DEWESoft X3, para poder evaluar el amortiguamiento:

1. Arrancar el programa DEWESoft X3, que inicialmente abre en el módulo de “Setup Files” donde se guarda la configuración de canales y ventanas modificados.

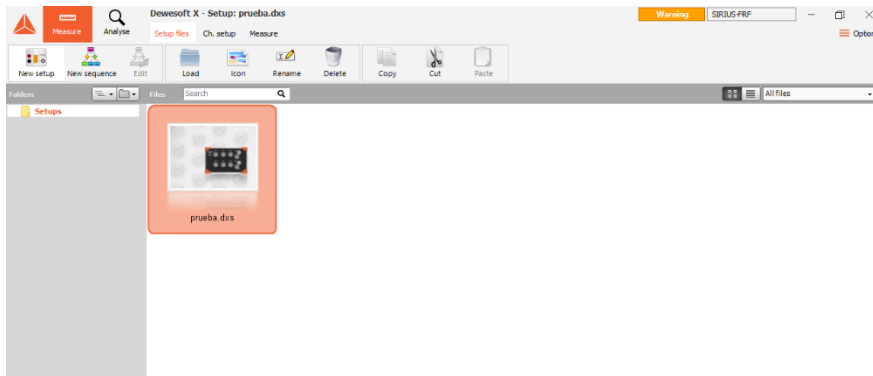


Figura B. 1: Ventana Setup Files.

2. Se selecciona la opción “Chanel setup” y la subopción “Analog in”, que muestra los diferentes puertos conectados al SIRIUS. Permite cambiar el nombre de los puertos y modificar sus características.

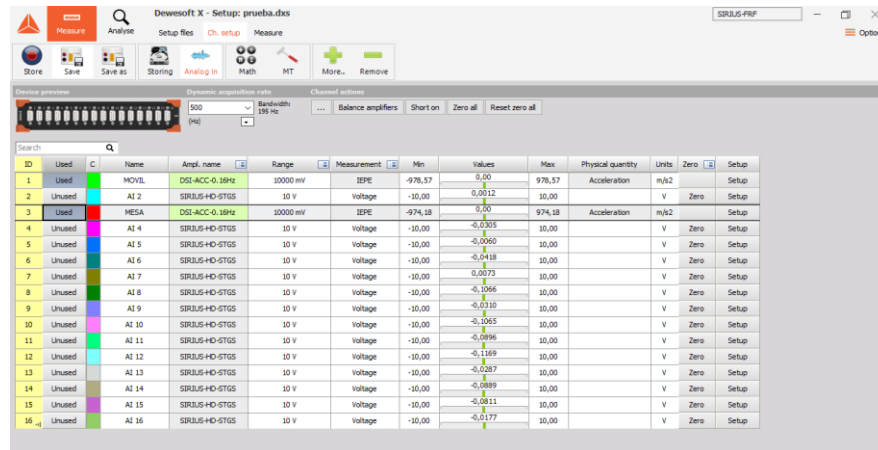


Figura B. 2: Ventana con los diferentes puertos conectados.

3. Dentro de “Chanel Setup” ir a la opción “MT”, Modal Test, y dejar su configuración como la siguiente imagen:

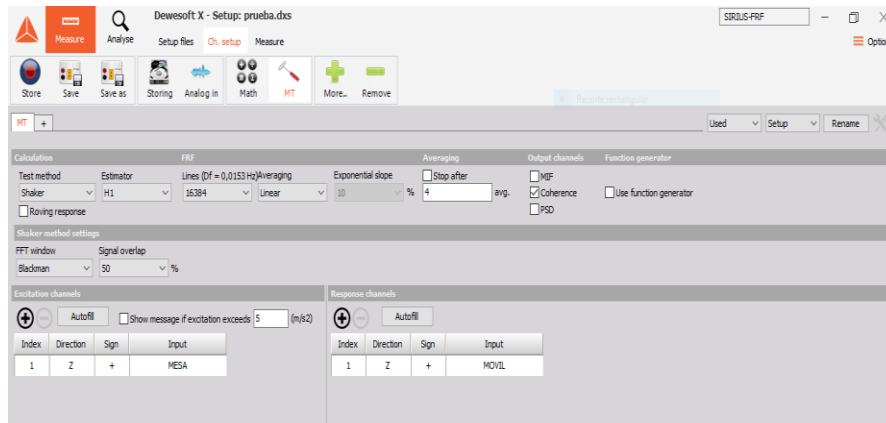


Figura B. 3: Configuración MT.

- En el siguiente paso ir a la opción Measure y de ahí a Recorder. En esta ventana elegir el canal correspondiente al sensor láser para ver su señal. Aquí es donde se graban los ficheros correspondientes a la evaluación del amortiguamiento en el dominio del tiempo. Así sería su configuración:

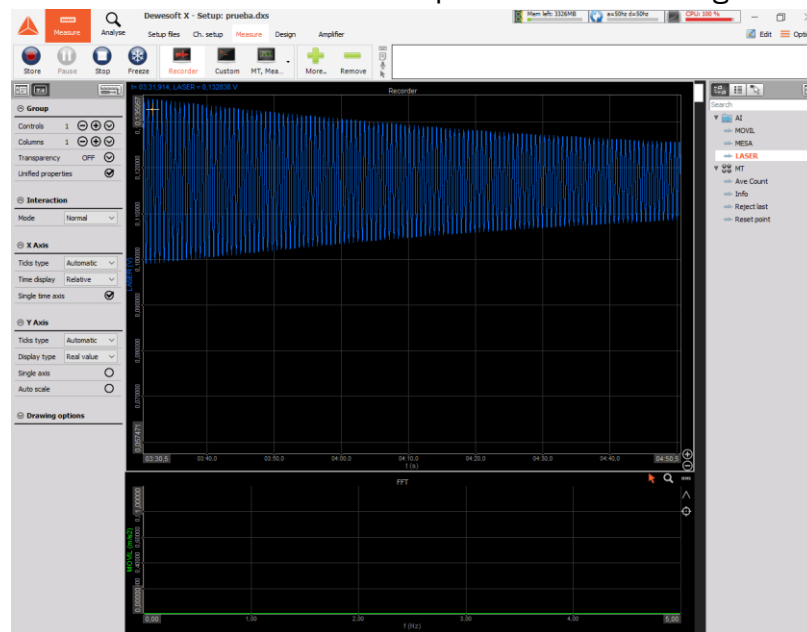


Figura B. 4: Configuración Recorder de Measure.

- Con la opción Custom se puede añadir más gráficas que muestren los diferentes sensores conectados al SIRIUS
- Ir a la opción “MT, Measure”, ventana donde se van a obtener los resultados correspondientes a la evaluación en el dominio de la frecuencia. Con Custom añadir la gráfica FRF indicando como entrada el acelerómetro de la plataforma sísmica y como salida el acelerómetro del soporte móvil. Añadir también la gráfica Circle Fit. Así es como quedaría la ventana:

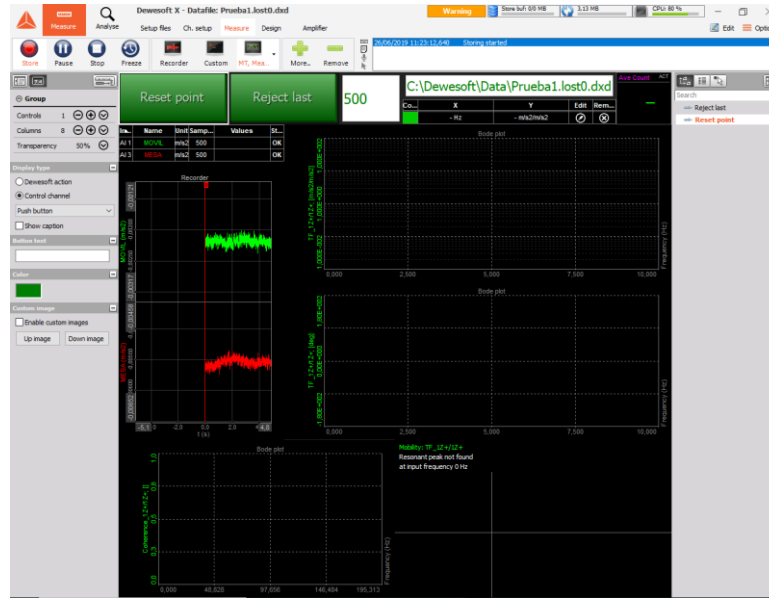


Figura B. 5: Configuración MT Measure.

7. Por último, el programa permite seleccionar la frecuencia de muestreo de la señal. Dependiendo del valor elegido el programa va a tardar más o menos tiempo en obtener los resultados y la resolución será mejor o peor. De esta manera con la elección en el paso 3 de 16384 puntos se ha elegido 500 Hz como frecuencia de muestreo, con la que se obtiene una resolución muy buena y el tiempo de cálculo es aproximadamente 1 minuto.





## ANEXO C: CÁLCULO DEL PESO DEL SOPORTE MÓVIL

En este anexo se explica el procedimiento utilizado para el cálculo de la masa del soporte móvil que forma parte del TMD ensayado, para posteriormente tener en cuenta este valor para la determinación del coeficiente de amortiguamiento de cada ensayo.

En primer lugar, se recupera la ecuación 7 obtenida en el capítulo 2, que relaciona la frecuencia propia del sistema con la constante del muelle y la masa móvil:

$$w_o = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

De esta manera se puede formar un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, la constante  $k$  y la masa móvil  $m$ , que engloba los 16 listones de la configuración inicial y el soporte móvil:

$$\begin{aligned} w_1^2 &= \frac{k}{m} \\ w_2^2 &= \frac{k}{m + \Delta m} \end{aligned} \quad (64)$$

Resolviendo el sistema y despejando la masa  $m$ , se obtiene la siguiente ecuación:

$$m = \frac{\Delta m \cdot w_2^2}{w_1^2 - w_2^2} \quad (65)$$

Una vez se tiene definida la ecuación 65 se procede a la obtención de los valores de las frecuencias propias y del incremento de masa.

- La frecuencia propia se determinará con ayuda de la FFT creada por DEWEsoft al aplicarle al sistema un free decay. Y como durante su obtención se observó que variaba dependiendo de la amplitud de las oscilaciones del sistema se ha decidido dar dos valores de frecuencia para cada ensayo.
- Mientras que el incremento de masa es conocido dependiendo el número de listones que se añaden al soporte móvil, sabiendo que cada listón pesa 12.24

Kg. De esta forma se ha decidido realizar seis pruebas que se recogen en esta tabla:

PRUEBA	Incremento masa	W (Hz) (Amplitud=0.5)	W (Hz) (Amplitud=0.05)
1	0	1.495	1.511
2	24.48	1.413	1.43
3	12.24	1.453	1.468
4	36.72	1.378	1.392
5	48.96	1.344	1.358
6	61.2	1.312	1.328

Tabla C. 1: Recogida de datos para el cálculo del peso del soporte móvil

Ya se tienen los datos necesarios para la realización de cinco sistemas y por lo tanto obtener cinco valores de masa total m. En la siguiente tabla se recogen estos resultados indicando los sistemas realizados con la ecuación 64:

SISTEMA	Masa total	
	Amplitud=0.5	Amplitud=0.05
1 y 2	204.968	210.137
1 y 3	208.706	205.918
1 y 4	207.433	205.962
1 y 5	206.299	205.692
1 y 6	205.081	207.745

Tabla C. 2: Resolución de la ecuación 65.

A continuación, se determina la masa del soporte móvil restando a la masa total el peso de los 16 listones, es decir, restando 195.84 Kg:

Masa soporte=Masa total - 195.84Kg	
9.129	14.297
12.866	10.078
11.594	10.122
10.459	9.853
9.241	11.905

Tabla C. 3: Resultados obtenidos de la masa del soporte móvil.

Por último, se realiza la media aritmética de todos los resultados anteriores, obteniendo que la masa del soporte móvil es aproximadamente de:

$$m_{\text{soporte móvil}} = 10.85 \text{ Kg}$$