



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Desarrollo y puesta a punto de un sistema de medida de vibraciones para la determinación de FRFs

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Jiménez Balbastre, Alba

Tutor/a: Baeza González, Luis Miguel

Cotutor/a: Fuenmayor Fernández, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen

La medida de vibraciones es una práctica frecuente en ingeniería que tiene diversas aplicaciones, tales como la caracterización dinámica de una estructura, o la determinación del nivel vibratorio para ponderar el confort o la fiabilidad estructural. Dentro de esta primera utilidad se encuentra la medida de funciones de respuesta en frecuencia (FRFs) tipo receptancia (o sus funciones derivadas: movilidad e inertancia), las cuales proporcionan toda la información relativa al comportamiento vibratorio de un sistema mecánico cuando se cumplen condiciones de linealidad entre la excitación y la respuesta. Dicha medida precisa de un tratamiento matemático específico que debe considerar los efectos de la digitalización y la duración finita de la medida, y establecer procedimientos para el cálculo de la transformada de Fourier de las señales, y para el uso de ventanas que minimizan el *leakage* y de filtros *antialiasing*. La finalidad de este trabajo es poner a punto un sistema de adquisición de vibraciones basado en medida de aceleración y fuerza de excitación producida por un martillo instrumentado. La finalidad de la medida es el cálculo de FRFs. Tanto el cálculo de las FRFs como la gestión de la adquisición se basará en un programa desarrollado en MATLAB. El sistema se validará a través de medidas sobre una barra asimilable a una viga, elemento que dispone de una solución analítica que será usada como referencia.

Palabras clave:

Medida de vibraciones; Aliasing; Leakage; FRF; Transformada discreta de Fourier

Abstract

Vibration measurement is a common practice in engineering that has several applications, such as dynamic characterization of a structure, or determination of the vibration level to weigh comfort or structural reliability. Within this, the first utility is the measurement of frequency response functions (FRFs) such as receptance (or its derived functions: mobility and inertance), which provide all information relating to the vibrational behaviour of a mechanical system when linearity conditions are met between excitation and response. That measure requires a specific mathematical treatment that must consider the effects of digitization and finite duration of measurement, and establish procedures for calculation of the Fourier transform of signals, and for the use of windows that minimize the *leakage* and *antialiasing* filters. The purpose of this work is to develop a system of vibration acquisition based on measurement of acceleration and excitation force produced by an impact hammer. The purpose of the measure is the calculation of FRFs. Both the calculation of FRFs and the management of the acquisition will be based on a developed program in MATLAB. The system will be validated through measurements on a bar assimilable to a beam, an element that has an analytical solution that will be used as reference.

Keywords:

Vibration measurement; Aliasing; Leakage; FRF; Discrete Fourier transform

Resum

La mesura de vibracions és una pràctica freqüent en enginyeria que té diverses aplicacions, com ara la caracterització dinàmica d'una estructura, o la determinació del nivell vibratori per a ponderar el confort o la fiabilitat estructural. Dins d'aquesta primera utilitat es troba la mesura de funcions de resposta en freqüència (FRFs) tipus receptància (o les seues funcions derivades: mobilitat i inertància), les quals proporcionen tota la informació relativa al comportament vibratori d'un sistema mecànic quan es compleixen condicions de linealitat entre l'excitació i la resposta. Aquesta mesura precisa d'un tractament matemàtic específic que ha de considerar els efectes de la digitalització i la duració finita de la mesura, i establir procediments per al càlcul de la transformada de Fourier dels senyals, i per a l'ús de finestres que minimitzen el *leakage* i de filtres *antialiasing*. La finalitat d'aquest treball és posar a punt un sistema d'adquisició de vibracions basat en mesura d'acceleració i força d'excitació produïda per un martell instrumentat. La finalitat de la mesura és el càlcul de FRFs. Tant el càlcul de les FRFs com la gestió de l'adquisició es basarà en un programa desenvolupat en MATLAB. El sistema es validarà a través de mesures sobre una barra assimilable a una biga, element que disposa d'una solució analítica que serà usada com a referència.

Paraules clau:

Mesura de vibracions; Aliasing; Leakage; FRF; Transformada discreta de Fourier

Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis padres y familia, quienes siempre se han preocupado por mí y se han alegrado de todo lo que he conseguido y se han esforzado para que no me faltara nada. A mis amigos de la universidad, Batiste, Pau, Diego y Sergi, que me han acompañado estos cuatro años en los cuales hemos estudiado, pero también hemos viajado y compartido muchos momentos. A Laia por contar siempre conmigo e intentar aconsejarme, aunque a veces no le haga mucho caso. A mi tutor, Luis, por su orientación y confianza en mí durante el desarrollo de este trabajo. Y a mi abuela, que nunca se olvidó de mí.

Índice general

Resumen	iii
Abstract	v
Resum	vii
Agradecimientos	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xvi
Nomenclatura	xvii
I. Memoria	1
1. Introducción general y objetivos	2
1.1. Introducción general	2
1.2. Objetivos	3
2. Fundamentos de la medida de vibraciones	4
2.1. El análisis de Fourier	4
2.1.1. Transformada de Fourier	4
2.1.2. Transformada Discreta de Fourier	6
2.2. Tratamiento digital de señales	7
2.2.1. Efecto de la longitud finita	7
2.2.2. Efecto de la digitalización de la señal	9
2.3. Medición de FRFs	11
2.3.1. Introducción a los ensayos de impacto	12
3. Configuración de <i>hardware</i>	14
3.1. Sensores	14
3.1.1. Acelerómetro	14

3.1.2.	Martillo instrumentado	15
3.2.	<i>Hardware</i> de medida	17
3.2.1.	Sistema de adquisición de datos	17
3.2.2.	Chasis	18
3.3.	Montaje	19
4.	Desarrollo del sistema de medida de vibraciones	20
4.1.	Introducción	20
4.2.	Funcionamiento del programa e interfaz de usuario	20
4.2.1.	Menú principal	22
4.2.2.	Configuración adquisición de vibraciones	22
4.2.2.1.	Configuración de los canales	23
4.2.2.2.	Configuración del test de impacto	24
4.2.2.3.	Control de adquisición	27
4.2.2.4.	Representación de las medidas	28
4.2.3.	Análisis de FRFs	29
5.	Validación del programa	31
5.1.	Introducción	31
5.2.	Solución analítica	33
5.3.	Configuración de los ensayos	34
5.3.1.	Ensayo 0	36
5.3.2.	Ensayo 1	37
5.3.3.	Ensayo 2	39
5.3.4.	Ensayo 3	41
5.4.	Conclusiones de los ensayos	42
6.	Conclusiones	44
	Bibliografía	46
II.	Pliego de condiciones	48
7.	Objeto del pliego	49
8.	Condiciones particulares	50
8.1.	Condiciones técnicas	50
8.1.1.	Condiciones de los materiales	50
8.1.2.	Control de calidad de los materiales	52
8.1.3.	Condiciones de la validación de la aplicación	53
8.1.4.	Control de calidad de la aplicación	53
8.1.5.	Condiciones de entrega	54

8.1.6. Pruebas y ajustes finales	54
8.2. Condiciones facultativas	54
8.2.1. Obligaciones y derechos del proyectista	54
III. Presupuesto	55
9. Desglose del presupuesto	56
9.1. Coste de personal	56
9.2. Coste de material	57
9.3. Coste de licencias de <i>software</i>	59
10. Coste total del proyecto	61
IV. Anexos a la memoria	62
A. Manual del usuario	63
A.1. Respuesta	63
A.2. Excitación	64
A.3. Sistema DAQ	65
A.4. Chasis	65
B. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030	67

Índice de figuras

2.1.	Forma en el dominio del tiempo de distintos tipos de ventanas temporales	8
2.2.	Forma general de una ventana de fuerza	8
2.3.	Forma general de una ventana exponencial	9
2.4.	Fenómeno de <i>aliasing</i>	10
2.5.	Distorsión de <i>aliasing</i> en el espectro por DFT	10
2.6.	Efecto <i>picket-fence</i>	11
3.1.	Acelerómetro Brüel & Kjær 4533-B-001	15
3.2.	Martillo instrumentado PCB 086D05	16
3.3.	Sistema de adquisición DAQ NI 9230	17
3.4.	Sistema de adquisición DAQ NI 9230 instalado en el chasis NI Compact-DAQ cDAQ-9174	18
3.5.	Montaje con todos los elementos importantes indicados	19
4.1.	Diagrama de flujo de la aplicación	21
4.2.	Menú principal de la aplicación	22
4.3.	Ventana de configuración de la aplicación	23
4.4.	Panel de configuración de los canales de la aplicación	23
4.5.	Panel de configuración del test de impacto de la aplicación	25
4.6.	Ventana de fuerza para distintas longitudes	26
4.7.	Ventana exponencial para distintos porcentajes de decaimiento	26
4.8.	Panel de control de adquisición de la aplicación	27
4.9.	Ventana de análisis de la aplicación vacía	29
5.1.	Barra de aleación de aluminio 7075-T6	31
5.2.	Representación esquemática de la viga, con sus dimensiones acotadas y sistema de coordenadas	32
5.3.	Primeros 5 modos de flexión de una viga libre-libre	34
5.4.	Representación esquemática de la viga, con la posición de la excitación y respuesta	35
5.5.	Montaje general para la validación	36
5.6.	Excitación y respuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia en un ensayo sin ventanas temporales en la ubicación 1Y-/5	37

5.7. Excitación y respuesta promediadas en la ubicación 1Y-/5 para una longitud de ventana de fuerza de 0.001 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%	37
5.8. Magnitud y fase de la FRF tipo receptancia y coherencia para una longitud de ventana de fuerza de 0.001 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%	38
5.9. Excitación y respuesta promediadas en la ubicación 1Y-/5 para una longitud de ventana de fuerza de 0.0015 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%	39
5.10. Magnitud y fase de la FRF tipo receptancia y coherencia para una longitud de ventana de fuerza de 0.0015 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%	40
5.11. Excitación y respuesta promediadas en la ubicación 1Y-/5 para una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%	41
5.12. Magnitud y fase de la FRF tipo receptancia y coherencia para una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%	41
A.1. Montaje general para la validación	63
A.2. Montaje y fijación del acelerómetro en la pieza de validación	64
A.3. Montaje del martillo instrumentado	64
A.4. Conexión de los canales del sistema DAQ	65
A.5. Conexión del PC portátil y la fuente de alimentación con el sistema DAQ .	66

Índice de tablas

5.1. Geometría y propiedades de la viga	31
5.2. Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T6	32
5.3. Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra de aleación de aluminio 7076-T6 calculadas de forma analítica	34
5.4. Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra calculadas con una longitud de ventana de fuerza de 0.001 s, una ventana exponencial con un decaimiento del 0% y el error relativo respecto los resultados analíticos	39
5.5. Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra calculadas con una longitud de ventana de fuerza de 0.0015 s, una ventana exponencial con un decaimiento del 0% y el error relativo respecto los resultados analíticos	40
5.6. Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra calculadas con una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s, una ventana exponencial con un decaimiento del 0% y el error relativo respecto los resultados analíticos	42
9.1. Coste del personal	56
9.2. Desglose horario	57
9.3. Códigos según las diferentes categorías de los materiales	57
9.4. Coste del material para elaborar el sistema de medición	57
9.5. Breve descripción del material para la implementación del sistema de medición	58
9.6. Coste del material para la implementación del sistema de medición	58
9.7. Coste del material para la validación del sistema de medición	59
9.8. Coste del material total	59
9.9. Coste de las licencias de <i>software</i>	60
10.1. Coste total del proyecto	61
B.1. Grado de relación del trabajo con los ODS	67

Nomenclatura

Símbolos latinos

$A(\omega)$	Función de respuesta en frecuencia tipo inercancia	$\text{m/s}^2/\text{N}$
a_n, b_n	Coefficientes de Fourier	—
A_t	Área de la sección transversal de la viga	m^2
b	Anchura de la viga	m
C_1, C_2, C_3, C_4	Coefficientes constantes	—
C_{xy}	Coherencia de magnitud cuadrada	—
E	Módulo de Young	Pa
\bar{F}	Amplitud de la fuerza	N
F	Fuerza	N
f	Frecuencia	Hz
f_M	Frecuencia interna del sistema de adquisición	Hz
f_s	Frecuencia de muestreo	Hz
$H(\omega)$	Función de respuesta en frecuencia tipo receptancia	m/N
h	Altura de la viga	m
I	Momento de inercia de la sección transversal	m^4
i	Número imaginario	—
k	Número de onda angular	rad/m
L	Longitud de la viga	m
N	Número de muestras	muestra
$P_{xx}(f)$	Densidad espectral de potencia de la entrada	W/Hz
$P_{xy}(f)$	Densidad espectral de potencia cruzada	W/Hz

$P_{yy}(f)$	Densidad espectral de potencia de la salida	W/Hz
T	Periodo	s
t	Tiempo	m
\bar{u}	Amplitud del desplazamiento	m
u	Desplazamiento	m
$w(x)$	Desplazamiento en dirección x	m
$X(f)$	Transformada de Fourier de una función $x(t)$	—
$x(t)$	Función en el dominio del tiempo	—
X, Y, Z	Ejes cartesianos	—
x, y, z	Componentes cartesianas de la posición	m
X_k	Transformada de Fourier discreta de una función x_n	—
x_n	Función discreta en el dominio del tiempo	—
$Y(\omega)$	Función de respuesta en frecuencia tipo movilidad	m/s/N

Símbolos griegos

Δf	Resolución en frecuencia	Hz
Δt	Intervalo de muestreo	s/muestra
ν	Coefficiente de Poisson	—
ω	Frecuencia angular	rad/s
ω_s	Frecuencia angular de muestreo	rad/s
ρ	Densidad	kg/m ³
τ	Decaimiento exponencial	s ⁻¹

Siglas y acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>

FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FRF	Función de Respuesta en Frecuencia
IEPE	<i>Integrated Electronic Piezo-Electric</i>
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PC	<i>Personal Computer</i>
TF	Transformada de Fourier
TFG	Trabajo de Fin de Grado

Parte I.
Memoria

1. Introducción general y objetivos

1.1. Introducción general

El interés por las vibraciones surgió con la invención de los primeros instrumentos musicales. Desde ese momento, tanto músicos como filósofos han estado buscando los principios que rigen la generación de sonido y han utilizado estos conocimientos para perfeccionar los instrumentos musicales y transmitirlos de generación en generación. Una de las figuras más destacadas es la de Galileo Galilei, considerado el fundador de la ciencia experimental moderna. Galileo se interesó en el comportamiento de un péndulo simple después de observar los movimientos de una lámpara en una iglesia de Pisa. Tras esto, realizó diferentes experimentos y profundizó en el estudio de objetos vibratorios. Así pues, Galileo describió el efecto de la longitud de un péndulo simple sobre su frecuencia de vibración y estudió otros fenómenos como la resonancia. Desde estos hallazgos pioneros hasta la actualidad, los conocimientos han avanzado significativamente. Hoy en día se ha alcanzado una comprensión más profunda de los fenómenos vibratorios y su aplicabilidad en diferentes campos.

La mayor parte de las actividades humanas están relacionadas de alguna manera con las vibraciones. Por ejemplo, la capacidad auditiva se basa en las vibraciones de los tímpanos, la respiración implica la vibración de los pulmones y el habla requiere oscilaciones de la laringe y lengua. Asimismo, la visión es posible gracias a las ondas de luz. Es por ello que, en los inicios los investigadores se centraban en comprender estos y otros muchos fenómenos naturales. No obstante, en estos tiempos actuales, muchos de los estudios son impulsados por las múltiples aplicaciones de las vibraciones en la ingeniería. En algunos de estos sistemas de ingeniería, la transmisión de las vibraciones puede ser incómoda para los seres humanos, estas vibraciones pueden causar ruidos molestos o incluso dañar la propia estructura [1].

En la industria aeroespacial, las vibraciones desempeñan un papel fundamental en diversos aspectos relacionados con la seguridad de vuelo, el mantenimiento, el rendimiento y eficiencia, así como la experiencia del pasajero. Así pues, es habitual realizar ensayos de impacto en materiales aeronáuticos. De esta manera se puede evaluar la resistencia y las capacidades de los materiales y replicar las condiciones a las que podrán estar expuestos en situaciones reales.

1.2. Objetivos

Este proyecto consiste en la realización de una aplicación en el entorno de MATLAB, que permita realizar adquisición y análisis de vibraciones, a partir de las mediciones de un acelerómetro y un martillo instrumentado.

Durante su realización se propone alcanzar varios objetivos fundamentales. En primer lugar, como objetivo personal se busca profundizar en el funcionamiento de una cadena de medida de vibraciones. Se pretende comprender en detalle los componentes y procesos involucrados en la adquisición, procesamiento y análisis de datos de mediciones de vibraciones. Para ello se estudiarán los efectos de la digitalización de las señales y la duración finita de las mediciones en la precisión así como la interpretación de los resultados.

En segundo lugar, se plantea el desarrollo de un *software* propio que facilite la adquisición y el análisis de vibraciones. El objetivo es diseñar una herramienta intuitiva y de fácil uso que permita configurar los parámetros de adquisición, realizar el procesamiento de los datos y visualizar los resultados de manera clara y concisa. Se tratará de diseñar una interfaz que pueda ser utilizada por distintos tipos de usuarios, incluso aquellos poco experimentados en la medición de vibraciones.

La aplicación debe permitir configurar y ejecutar ensayos de impactos controlados, así como ejecutar múltiples mediciones para realizar promediados. De esta manera se conseguirán mediciones consistentes y reproducibles. Además, es importante que el programa facilite la visualización de las señales en tiempo real. De esta forma el usuario obtendrá una visión inmediata y dinámica del comportamiento vibratorio de un sistema.

Finalmente, la aplicación debe representar gráficamente las FRFs tipo receptancia, inercia y movilidad así como la coherencia para asegurar la obtención de resultados correctos. Una vez haya terminado, el usuario debe poder guardar y almacenar los resultados, para volver a consultarlos posteriormente.

Como último objetivo, se plantea la validación de la aplicación realizando mediciones en una barra de aleación de aluminio 7075-T6 en configuración de viga libre-libre. La finalidad será comparar los picos de resonancia, es decir, las frecuencias naturales de los cinco primeros modos gráficamente a partir de las FRFs, con los resultados analíticos que se considerarán valores de referencia.

2. Fundamentos de la medida de vibraciones

La medición de vibraciones es una herramienta esencial para comprender el comportamiento dinámico de sistemas y estructuras, así como para evaluar su respuesta frente a excitaciones. Para llevar a cabo un análisis preciso de las vibraciones, es necesario utilizar herramientas matemáticas que permitan comprender y caracterizar estos fenómenos vibratorios.

Uno de los conceptos fundamentales en este campo es el análisis de Fourier, una técnica que permite descomponer señales complejas en sus componentes de frecuencia. Al estudiar los fundamentos del análisis de Fourier, se adquieren los conocimientos necesarios para comprender el tratamiento digital de señales. En este sentido, se profundizará en las implicaciones de la digitalización y los efectos de medir una longitud finita en el análisis de vibraciones. Finalmente, mediante el uso de estas técnicas de procesamiento de señales y análisis de Fourier, se obtendrán las funciones de respuesta en frecuencia (FRFs).

Estos conceptos serán explorados en detalle a continuación, para obtener una comprensión más profunda de los fundamentos y aplicaciones del análisis de vibraciones.

2.1. El análisis de Fourier

2.1.1. Transformada de Fourier

Antes de abordar el concepto de transformada de Fourier, se va a introducir el desarrollo en serie de Fourier.

En muchos problemas de análisis en ingeniería, es necesario trabajar con funciones periódicas. Las series de Fourier son una herramienta matemática fundamental para realizar el análisis de este tipo de señales. Se denomina serie de Fourier a una serie infinita que converge puntualmente a una función periódica y continua, a trozos o por partes [2].

Dada una función $x(t)$ de periodo T , con $t \in [0, T]$ la serie funcional que se pueda expresar en la forma de la Ecuación 2.1

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n}{T} t + b_n \sin \frac{2\pi n}{T} t \right) \quad (2.1)$$

se denomina serie de Fourier y a_n, b_n son los coeficientes de la misma. Así pues, se llaman coeficientes de Fourier a los siguientes números de las Ecuaciones 2.2 y 2.3.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos \frac{2\pi n}{T} t dt \quad (2.2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin \frac{2\pi n}{T} t dt \quad (2.3)$$

De esta manera, la serie de Fourier permite obtener una representación en el dominio de la frecuencia de funciones periódicas.

Sin embargo, en el caso de que la señal no sea periódica, como una señal transitoria o aleatoria, se aplica un enfoque similar a las señales periódicas considerando que el periodo T es infinito. En este caso, al realizar la transformación al dominio de la frecuencia, en lugar de representarse como un sumatorio, se utiliza una integral para realizar esta representación (Ecuación 2.4).

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2.4)$$

Esta transformación se conoce como transformada de Fourier. La TF de una señal temporal $x(t)$ se define en la Ecuación 2.5.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.5)$$

Donde $X(f)$ es la representación de $x(t)$ en el dominio de la frecuencia y f es la frecuencia en Hz. Existen otras opciones para su definición en la literatura, idénticas a la propuesta, pero realizando cambios de unidades, usando por ejemplo la relación $\omega = 2\pi f$.

Así pues, la TF es una herramienta que permite analizar el espectro de frecuencias de una función, es decir, indica las frecuencias presentes en una señal. Permite obtener una visión de las características de una señal, que no son evidentes en el dominio temporal.

2.1.2. Transformada Discreta de Fourier

Por otro lado se va a definir la herramienta transformada discreta de Fourier (DFT). La DFT es una TF diseñada específicamente para el análisis de señales de tiempo discreto y de duración finita, problema que se abordará a lo largo de este TFG. A diferencia de la transformada de Fourier, que se aplica a señales continuas en el tiempo, la DFT trabaja con secuencias de valores discretos. La DFT requiere por tanto, que la función de entrada sea una secuencia directa y tenga una duración finita [3].

Dada una señal temporal $x(t)$, al realizar la discretización de la señal durante un tiempo total T , en el que se han tomado N muestras, es posible establecer el intervalo de tiempo entre muestras Δt , la frecuencia de muestreo f_s , y la resolución en frecuencia Δf , conforme a la Ecuación 2.6:

$$\Delta t = \frac{T}{N}; \quad f_s = \frac{1}{\Delta t}; \quad \Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2.6)$$

Como una aproximación de la transformada de Fourier de la señal original $x(t)$, se puede calcular el desarrollo de Fourier al considerar una secuencia de escalones de ancho Δt . La transformada discreta de Fourier X_k (Ecuación 2.7) para un intervalo temporal discreto x_n se puede expresar como

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.7)$$

Por otro lado, la DFT de una serie real, resulta en una serie simétrica alrededor de la denominada frecuencia de Nyquist. Esta es la frecuencia más alta que debería existir teóricamente en la serie de entrada, para que la DFT reproduzca resultados correctos, siendo su valor la mitad de la frecuencia de muestreo [4].

Sin embargo, una limitación de la DFT es su complejidad computacional. El tiempo requerido para calcular la DFT, es directamente proporcional al cuadrado del número de muestras en la secuencia de entrada (N^2). Como resultado, el tiempo de cálculo puede volverse excesivamente elevado para conjuntos de datos más grandes. En este contexto, aparece el concepto de transformada rápida de Fourier (FFT), algoritmo que computa la DFT más rápidamente pues solamente requiere $N \log N$ operaciones. Existen diferentes algoritmos, siendo el más popular el algoritmo de Cooley-Tukey.

2.2. Tratamiento digital de señales

Generalmente la mayoría de las señales relevantes en el campo de la ingeniería son de naturaleza analógica. Estas señales son funciones de variable continua, como el espacio o el tiempo. Pueden ser procesadas por sistemas analógicos, sin embargo, a día de hoy el procesamiento de señales vibratorias se realiza habitualmente de manera digital. Para llevar a cabo el tratamiento digital de estas señales, se requiere de una interfaz que actúe como puente entre la señal analógica y digital.

Como consecuencia de la digitalización, la señal temporal se muestrea en unos intervalos regulares de tiempo y posteriormente se procesan los datos para extraer sus características. El estudio de vibraciones se enfoca principalmente en el dominio de la frecuencia, utilizando la FFT para descomponer la señal y obtener información sobre sus componentes espectrales. Esto ayuda a comprender mejor las características de la señal y extraer información relevante, para su análisis y aplicación en diferentes áreas.

Existen distintos aspectos del análisis de Fourier digital que deben ser considerados para no obtener resultados incorrectos. Estos aspectos suelen derivar de la aproximación de discretización y a la necesidad de limitar la duración de la muestra en el tiempo. A continuación, se va a hablar de forma más detallada de algunos conceptos relevantes, como son el *leakage*, las ventanas temporales, el *aliasing* o el *picket-fence*.

2.2.1. Efecto de la longitud finita

Como ya se ha comentado, al digitalizar una señal temporal, solamente se considera un registro de longitud finita, T . El error introducido en la FFT por considerar dicha señal periódica, se denomina error de *leakage*. De manera intuitiva, se puede entender que este error está relacionado con la falta de coincidencia entre el inicio y el final de la señal durante el tiempo de medición.

Las ventanas temporales son funciones de ponderación aplicadas a los datos registrados para reducir el *leakage*. Las ventanas se representan generalmente como una función de tiempo, que multiplica la señal analizada, $x(t)$ antes de realizar la TF. Dependiendo del tipo de señal, se utilizarán diferentes ventanas. Las ventanas más utilizadas hoy en día son las ventanas rectangulares, Hanning, Flat Top, de fuerza y exponencial [5].

La ventana rectangular, es una función de ponderación de ganancia unitaria que se aplica uniformemente a todos los puntos de la muestra registrada, cuando los datos cumplen el requisito de periodicidad.

Por otro lado, las ventanas Hanning son funciones de ponderación con forma de campana, de manera que al inicio y final del intervalo tienen un peso muy cercano a cero. Se suelen utilizar en señales que no cumplen con el requisito de periodicidad, como por ejemplo para excitaciones aleatorias. Las ventanas Flat Top se utilizan principalmente con fines de calibración en señales sinusoidales, que no cumplen tampoco con el requisito de periodicidad. En la Figura 2.1 se muestra la forma en el dominio temporal de cada una de estas ventanas.

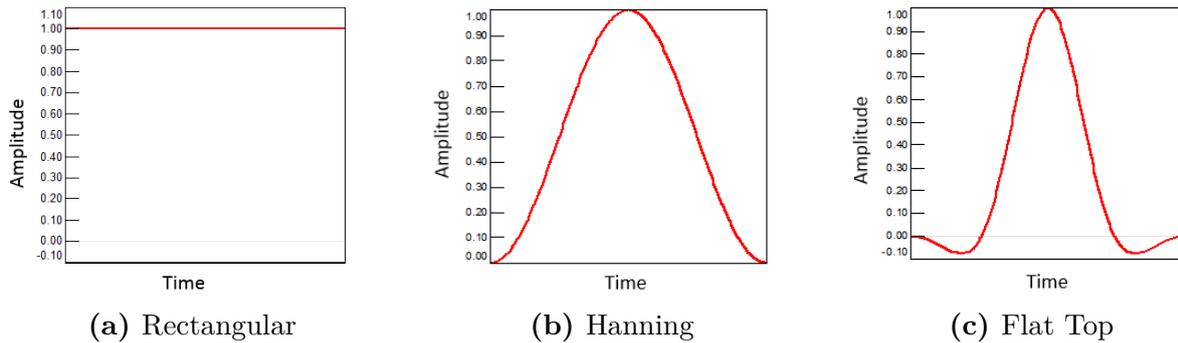


Figura 2.1: Forma en el dominio del tiempo de distintos tipos de ventanas temporales [6]

Para este trabajo, serán de particular interés la ventana de fuerza y la exponencial, pues se utilizan típicamente al realizar pruebas de impacto para adquirir FRFs.

En primer lugar, el objetivo de la ventana de fuerza, es mejorar la relación entre la señal y el ruido de la excitación. La duración del pulso de excitación, suele ser corto en comparación con la longitud total registrada. La ventana de fuerza tiene una forma específica que se muestra en la Figura 2.2, consiste en un rectángulo unitario y dos atenuaciones en forma de semicoseno en los extremos que llegan hasta cero. De esta forma, se elimina el ruido y se conserva la amplitud de la excitación. Además, la ventana se atenúa de manera gradual para evitar cambios bruscos.

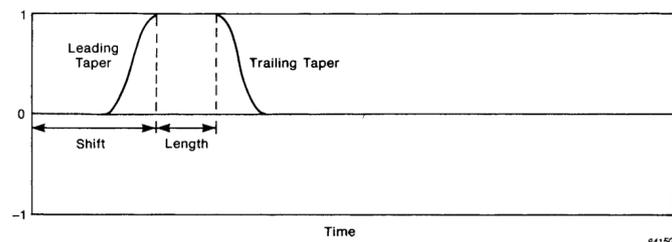


Figura 2.2: Forma general de una ventana de fuerza [7]

La forma típica de un pulso de fuerza obtenido con un martillo instrumentado, consta de un pico positivo inicial afilado, seguido de oscilaciones en decaimiento. Es un error común tratar de eliminar estas oscilaciones pensando que se deben a errores en la medición. Sin embargo, son parte del pulso de fuerza y deben estar incluidas dentro de la ventana de fuerza.

Por otro lado, se asume que la respuesta de una estructura a un impacto, es una suma de sinusoides que decaen exponencialmente. Si la respuesta no es cero al final del registro, este truncado provocará error de *leakage*. Por tanto, el objetivo de la ventana exponencial, será agregar un decaimiento adicional al existente y forzar la respuesta a cero al final del intervalo. En la Figura 2.3 aparece la forma de la ventana exponencial. Como se observa, esta ventana también se atenúa en forma de semicoseno, hasta alcanzar la unidad y a partir de este momento, decae con un factor de decaimiento τ .

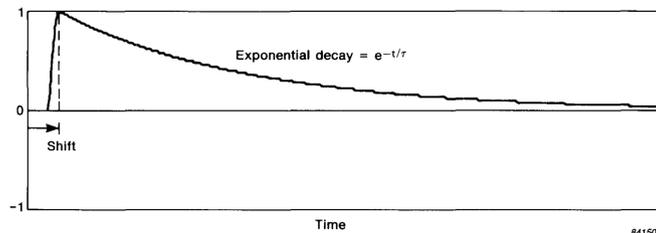


Figura 2.3: Forma general de una ventana exponencial [7]

Las ventanas temporales, disminuyen la precisión en la amplitud máxima de la función y afectan al amortiguamiento. Sin embargo, este error es más deseable que la distorsión que puede provocar el *leakage*.

2.2.2. Efecto de la digitalización de la señal

Como resultado de la aproximación a la discretización, uno de los fenómenos más perjudiciales es el *aliasing*.

Se trata de un problema en el análisis espectral digital, causado por la discretización de una señal temporal originalmente continua. Al realizar la discretización, si la tasa de muestreo es demasiado baja, las frecuencias altas de la señal original pueden ser interpretadas incorrectamente. Estas frecuencias altas, se verán como frecuencias bajas o simplemente serán indistinguibles de componentes de baja frecuencia válidos. En la Figura 2.4 se muestra cómo la digitalización de una señal de baja frecuencia, produce exactamente el mismo conjunto de valores discretos, que la digitalización de una señal con una frecuencia más alta.

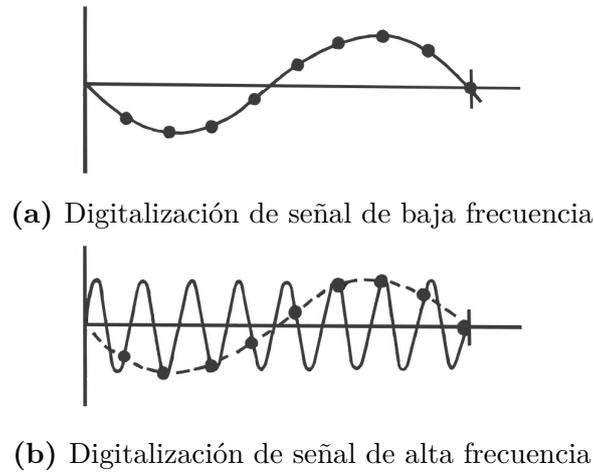


Figura 2.4: Fenómeno de *aliasing* [8]

En la Sección 2.1.2 se indica que la frecuencia más alta, que se puede incluir en la DFT es $f_s/2$, o análogamente, $\omega_s/2$. Para entender este fenómeno, en la Figura 2.5 superior aparece el espectro real de una señal, mientras debajo se muestra el espectro distorsionado. Esta distorsión, es debida a que los componentes en frecuencia de la señal que están por encima de $\omega_s/2$, se reflejan en el rango de 0 a $\omega_s/2$. Las frecuencias más altas, se confunden con frecuencias más bajas, produciendo una representación errónea de la señal en el dominio de la frecuencia.

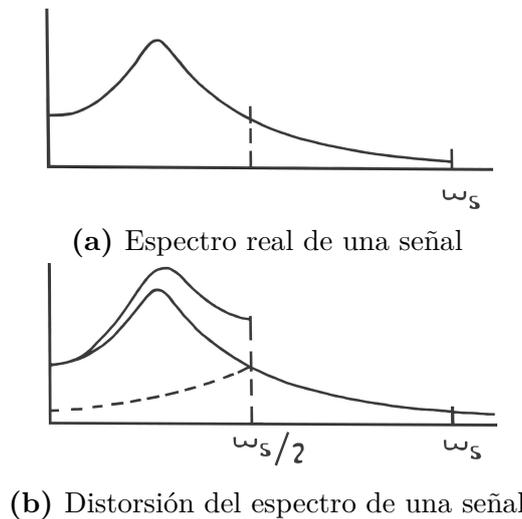


Figura 2.5: Distorsión de *aliasing* en el espectro por DFT [8]

Para solucionar este problema, se utiliza un filtro *antialiasing*, que reemplaza la señal temporal original, por una versión de paso bajo con un corte brusco. Dado que los filtros empleados son inevitablemente imperfectos, es necesario rechazar las mediciones espectrales en un rango de frecuencia cercano a la frecuencia de Nyquist, $\omega_s/2$. Los valores típicos para este rango rechazado, pueden variar según la complejidad del filtro empleado. Es fundamental tomar las precauciones adecuadas *antialiasing*, cosa que generalmente se proporciona como una característica obligatoria en los analizadores.

Por otro lado, si se escoge una frecuencia de muestreo insuficiente al procesar la señal, es posible que queden ocultos los valores pico de las frecuencias. Este fenómeno es conocido como efecto *picket-fence* o efecto palizada.

Debido a la limitación en la resolución en frecuencia, los componentes espectrales de la señal, pueden quedar ocultos entre los puntos de muestreo, lo que dificulta su detección precisa. Los valores pico están ocultos detrás de las barras de la palizada, lo que impide su visualización completa, como se muestra en la Figura 2.6. Esta analogía ilustra cómo el efecto palizada, puede afectar a la representación y la interpretación de los picos espectrales en el análisis de señales.

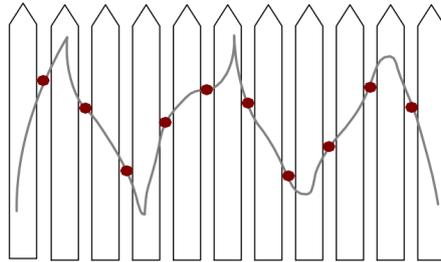


Figura 2.6: Efecto *picket-fence* [9]

2.3. Medición de FRFs

Existen diversas herramientas disponibles a la hora de realizar análisis de vibraciones. Una función de respuesta en frecuencia (FRF), es una función de transferencia expresada en el dominio de la frecuencia. Es una función en variable compleja, que relaciona la respuesta estructural del sistema con la entrada aplicada. La entrada generalmente es una fuerza de excitación. La salida normalmente es una magnitud cinemática: desplazamiento, velocidad o aceleración. Para la estimación de FRFs experimentalmente, las señales medidas deben filtrarse y digitalizarse, para posteriormente someterse a un proceso de FFT.

Se define la función receptancia que representa la relación entre la amplitud del desplazamiento u y la amplitud de la fuerza F , según la Ecuación 2.8.

$$H(\omega) = \frac{\bar{u}}{\bar{F}} \quad (2.8)$$

Otras funciones de interés son la movilidad $Y(\omega)$ y la inertancia $A(\omega)$, que relacionan velocidad y aceleración con la fuerza excitadora. La Ecuación 2.9 muestra la relación entre estas definiciones y la receptancia.

$$Y(\omega) = i\omega H(\omega); \quad A(\omega) = -\omega^2 H(\omega) \quad (2.9)$$

Aunque son las formas más comunes de representación, existen más posibilidades si se definen las mismas funciones de manera inversa. Todas estas formas están relacionadas entre sí por ecuaciones algebraicas, y cualquiera puede obtenerse a partir de otra.

Por otro lado, a la hora de realizar gráficos para mostrar las FRFs, habitualmente se encuentran tres tipos. En primer lugar, el clásico gráfico Bode, representando la magnitud frente a la frecuencia y la fase frente a la frecuencia. Otra forma de representación es mostrar en 2 gráficos la parte real y la imaginaria frente a la frecuencia o finalmente, representar también la parte real e imaginaria en un único gráfico de Nyquist.

Uno de los objetivos principales a la hora de obtener FRFs es obtener las frecuencias naturales. Una frecuencia natural, es aquella en la que la estructura oscilaría si se perturba desde su posición de reposo y se le permite vibrar libremente. Las frecuencias naturales, pueden calcularse por métodos analíticos en la etapa de diseño o se pueden medir experimentalmente, observando los picos de resonancia.

2.3.1. Introducción a los ensayos de impacto

Los ensayos de impacto, son una técnica utilizada en el análisis experimental de estructuras, para obtener información sobre la respuesta dinámica. Estos ensayos consisten en aplicar un impulso de fuerza a la estructura con un martillo instrumentado y medir la respuesta utilizando sensores, como son los acelerómetros.

Su objetivo principal es calcular las FRFs. Estas pruebas de impacto, son una metodología de prueba muy importante, que ha evolucionado en los últimos años. Aunque parecen ser un método muy simple, obtener buenas mediciones de FRF en comparación con otros ensayos, no es tan sencillo. Se deben tener en cuenta muchos aspectos debido a la naturaleza transitoria de las señales.

La coherencia es un indicador que permite evaluar la calidad de la FRF y permite identificar posibles problemas en las mediciones. El valor de la función coherencia oscila entre 0 y 1, donde el valor de 1 significa que la relación entre la entrada y la salida en la FRF, es altamente consistente y repetible. En cambio, si la coherencia indica valores cercanos a 0, entonces las mediciones no son consistentes y puede haber errores o fuentes de variabilidad, en la configuración de la medición. Sin embargo, cabe tener en cuenta, que el valor de la coherencia disminuye en las regiones antirresonantes, pues la estructura no tiene respuesta en esas frecuencias, y esto no significa que se haya producido ningún error durante la medición.

En la Ecuación 2.10 se define la coherencia de magnitud cuadrada C_{xy} , función de las densidades espectrales de potencia, $P_{xx}(f)$ y $P_{yy}(f)$ y de la densidad espectral de potencia cruzada $P_{xy}(f)$ [10].

$$C_{xy} = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f) P_{yy}(f)} \quad (2.10)$$

Por otro lado es importante destacar, que la coherencia por sí sola, no proporciona información sobre la calidad de una única medición. Para evaluar la confiabilidad de los datos, es necesario realizar múltiples mediciones en cada ubicación para promediarlas, ya que la coherencia es una medida estadística.

A la hora de realizar mediciones con ensayos de impacto, se deben tener en cuenta distintos aspectos, que pueden conllevar valores de coherencia no deseados. En primer lugar, la ubicación del impacto, tiene un efecto muy relevante en la obtención de la FRF. Es crucial garantizar que cada impacto, se realice de manera precisa y controlada en el mismo punto y en la misma dirección para cada promedio. Por otro lado, también es importante evitar impactos dobles producidos por rebotes, pues introducen variaciones no deseadas en la respuesta de la estructura. Si no se cumplen estas condiciones, la coherencia de los resultados, se verá afectada negativamente [11].

3. Configuración de *hardware*

La adquisición de datos (DAQ), es el proceso de medir un fenómeno eléctrico o físico como temperatura, presión, sonido o aceleración. Para llevar a cabo este proceso, serán necesarios principalmente 3 elementos: sensores, *hardware* de medida DAQ y un PC con *software* programable.

A continuación, se especificarán los sensores para la excitación y la respuesta, así como el *hardware* de medida utilizado para realizar los ensayos de impacto. Además, se discutirán distintas consideraciones a tener en cuenta, a la hora de seleccionar correctamente los dispositivos, para asegurar mediciones precisas y confiables. Finalmente, se incluirá una imagen con el montaje completo.

3.1. Sensores

3.1.1. Acelerómetro

Los acelerómetros son dispositivos que permiten medir los cambios de velocidad en un punto. Son transductores capaces de convertir una aceleración, en una señal eléctrica proporcional. Se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios. Según las direcciones de medida, existen acelerómetros uniaxiales, capaces de medir en una sola dirección, y triaxiales, capaces de medir simultáneamente en 3 direcciones perpendiculares entre sí. Por otro lado, se pueden clasificar los acelerómetros según su funcionamiento. Principalmente destacan los acelerómetros piezoeléctricos, piezorresistivos y capacitivos.

En este caso, para la medición de la respuesta, se va a trabajar con el acelerómetro Brüel & Kjær 4533-B-001, uniaxial, de carga piezoeléctrica, que implementa la tecnología IEPE (*Integrated Electronic Piezo-Electric*). Este modelo (Figura 3.1) incorpora un preamplificador de baja señal/ruido integrado, cuenta con una baja susceptibilidad a los factores ambientales y puede medir un amplio rango de frecuencia.

Uno de los parámetros básicos de los acelerómetros, es la sensibilidad. Se define sensibilidad, como la relación entre la salida y la aceleración aplicada. Se puede expresar en términos de: tensión por unidad de aceleración o de carga por unidad de aceleración.

El modelo seleccionado tiene una sensibilidad de 98 mV/g. En cuanto al rango mecánico, el modelo permite medir desde 0.2 a 12 800 Hz [12].

El método de fijación del acelerómetro en el punto de medida, es uno de los factores más decisivos para obtener resultados precisos. Existen distintas configuraciones posibles, como el uso de cera de montaje, o el uso de un perno roscado que se mantiene fijo. Se deberá escoger el método, según la pieza sobre la que se vaya a utilizar el acelerómetro y el tipo de ensayo que se quiera realizar.



Figura 3.1: Acelerómetro Brüel & Kjær 4533-B-001

3.1.2. Martillo instrumentado

Los dispositivos de excitación disponibles para excitar una estructura, se pueden dividir básicamente en dos tipos: dispositivos de contacto y de no contacto. El primer tipo, implica una unión a la estructura permanente durante toda la sesión de ensayo. Dentro de este tipo se encuentran los excitadores mecánicos, con masas giratorias fuera de equilibrio, electrohidráulicos y electromagnéticos [8].

El excitador electromagnético, también conocido como electrodinámico, es el tipo más comúnmente utilizado, en el cuál la señal de entrada se convierte en un campo magnético alternante donde se coloca una bobina. Su ventaja principal es la capacidad de controlar la frecuencia y amplitud de excitación de forma independiente. Sin embargo, es importante tener en cuenta, que la fuerza real aplicada a la estructura no se obtiene directamente, pues es la diferencia entre la fuerza generada y la fuerza inercial necesaria para mover el mecanismo de excitación.

Por otro lado, cuando el dispositivo de excitación no está permanentemente unido a la estructura se denomina de no contacto. El tipo más común es el martillo instrumentado gracias a su relativa sencillez de uso. La estructura básica del martillo está formada por: una punta, el transductor de fuerza y la cabeza. Al utilizarse de forma manual se combina con un mango y así obtiene la forma de martillo. El transductor de fuerza es el encargado de medir la magnitud de la fuerza generada. Por un lado, la magnitud del impacto depende de la masa de la cabeza y de la velocidad en la que se golpea la estructura.

La rigidez de la punta en cambio determina la forma de la excitación: una punta más rígida disminuirá la duración de la excitación y aumentará el contenido en frecuencia de la excitación. Asimismo, una punta menos rígida aumentará el tiempo de excitación y disminuirá el contenido en frecuencia. El uso de este instrumento requiere cierta habilidad del usuario, pues es conveniente evitar rebotes y asegurar que los impactos sean similares entre sí, tanto en magnitud como en posición. Además, comparado con otros métodos de excitación más complejos y costosos, el martillo es una buena alternativa, al ser más económica y accesible.

Para la medición de la excitación se va a emplear el martillo instrumentado PCB 086D05. En la Figura 3.2, aparece el martillo con una extensión de masa y una punta de plástico blanco y dureza mediana.

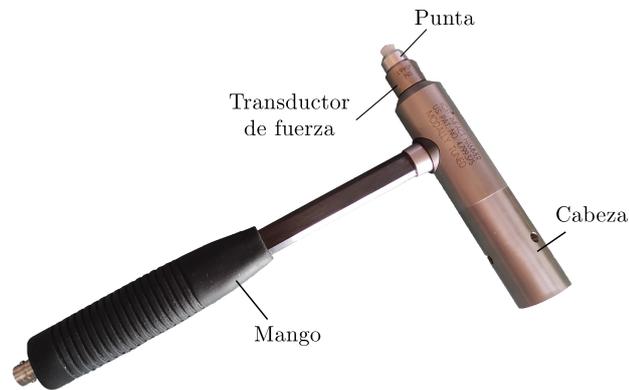


Figura 3.2: Martillo instrumentado PCB 086D05

En cuanto a las características técnicas principales, se destacan a continuación las más relevantes. La sensibilidad del instrumento teórica de $0.23 \text{ mV/N} (\pm 15\%)$. Tras unir la punta al martillo experimentalmente se establece el valor de la sensibilidad en 0.2397 mV/N . El rango de medidas va desde 0 hasta $22\,240 \text{ N pk}$ y la frecuencia de resonancia es mayor o igual a 22 kHz . Por otro lado, el martillo tiene una masa de 0.32 kg y al añadir la extensión de masa, se suman 0.2 kg más [13].

3.2. Hardware de medida

3.2.1. Sistema de adquisición de datos

Existen diversos tipos de sistemas de adquisición de datos. En primer lugar, los registradores de datos o *data loggers*, son sistemas autónomos que operan de forma independiente, sin requerir la intervención de un ordenador, y su función principal es almacenar los datos adquiridos. Son dispositivos autónomos, diseñados para medir señales a largo plazo durante períodos prolongados, como días, semanas o meses. Por otro lado existen los sistemas DAQ, que necesitan un ordenador para ser controlados y operables. Estos sistemas permiten capturar señales rápidas con una precisión temporal más alta y obtener mediciones en tiempo real. Además, los sistemas DAQ ofrecen una amplia variedad de tipos de entradas, cosa que limita a los *data loggers* [14].

Para este TFG se va a utilizar el módulo de entrada de sonido y vibración de National Instruments, NI-9230 con conectores BNC que se muestra en la Figura 3.3. Este dispositivo es capaz de recibir señales desde 3 canales diferentes simultáneamente y convertir la señal de analógico a digital para su posterior procesamiento. Puede medir señales de sensores tipo IEPE y no-IEPE y puede operar en un rango de voltaje de entrada analógica desde 977 hasta 12 800 S/s por canal utilizando la sincronización interna. Además, incorpora filtros *anti-aliasing* integrados [15].



Figura 3.3: Sistema de adquisición DAQ NI 9230 [16]

Tiene una resolución ADC (Convertidor Analógico-Digital) de 24 bits, lo que significa que el ADC puede dividir el rango de entrada analógica en 2^{24} pasos o niveles discretos, es decir, puede capturar señales con alta precisión y detalle.

A la hora de seleccionar la frecuencia de muestreo, se debe tener en cuenta que esta tarjeta de adquisición utiliza una frecuencia interna de $f_M = 13.1072 \cdot 10^6$ Hz para sincronizar las operaciones de adquisición. De esta forma, las posibles combinaciones para la f_s son se exponen en la Ecuación 3.1.

$$f_s = \frac{f_M}{2 \cdot m \cdot n} \quad (3.1)$$

Donde

$m = 64$, $n = 9$ hasta 25

$m = 128$, $n = 5$ hasta 25

$m = 256$, $n = 2$ hasta 26

3.2.2. Chasis

El chasis proporciona la interfaz de comunicación y energía necesaria para el módulo. Entre sus funciones, el chasis proporciona un alojamiento seguro y protección física a las tarjetas DAQ compatibles. Al estar instaladas dentro del chasis, las tarjetas están protegidas contra daños mecánicos y pueden operar de manera confiable.

Para este proyecto se dispone del chasis NI CompactDAQ cDAQ-9174. Los sistemas CompactDAQ de la compañía National Instruments son dispositivos portátiles y personalizables, que permiten digitalizar los datos cerca de los sensores, cosa que favorece la reducción del ruido. Este modelo en concreto, dispone de cuatro ranuras y es capaz de medir una amplia gama de señales de entrada/salida analógicas y digitales mediante una interfaz USB 2.0 [17].

En este caso, se instalará el sistema DAQ NI 9230 a la primera ranura. Para completar la conexión, se necesita conectar el cable de alimentación y finalmente unir el chasis al PC mediante un puerto USB. En la Figura 3.4 se muestra la tarjeta de adquisición ya instalada en el chasis.



Figura 3.4: Sistema de adquisición DAQ NI 9230 instalado en el chasis NI CompactDAQ cDAQ-9174

3.3. Montaje

Una vez presentados todos los elementos que forman parte de esta cadena de montaje, en la Figura 3.5 se muestran todos los dispositivos mencionados.

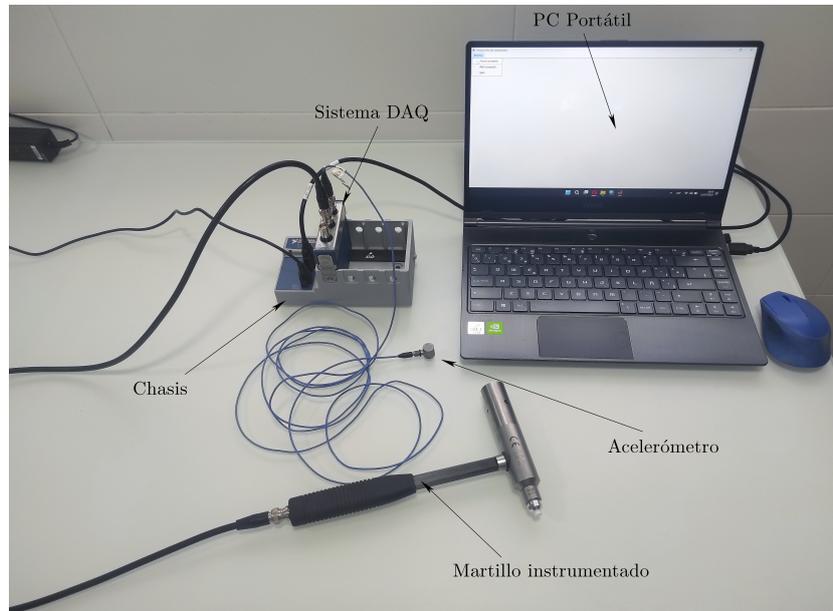


Figura 3.5: Montaje con todos los elementos importantes indicados

En la imagen se muestran las conexiones de todos los elementos. En primer lugar, se ha conectado el acelerómetro al canal ai0 y el martillo instrumentado se ha conectado al canal ai1. En el Anexo A se explica con mayor profundidad cómo conectar todos los componentes.

4. Desarrollo del sistema de medida de vibraciones

4.1. Introducción

Tanto la adquisición de vibraciones como el análisis de datos se van a realizar en un mismo programa de MATLAB. Para ello, se propone en este trabajo la creación de una interfaz en App Designer, herramienta que permite diseñar aplicaciones interactivas dentro del propio entorno de MATLAB. Fue introducida en la versión R2016a y es el entorno recomendado para construir aplicaciones, sustituyendo el antiguo entorno de diseño GUIDE, que será próximamente eliminado en versiones futuras del programa.

Al disponer de un acelerómetro y un martillo instrumentado, el objetivo del programa será preparar un sistema que permita configurar distintos ensayos de impacto y que posteriormente procese la información para el cálculo de FRFs. Para poder realizar la adquisición, es necesario instalar la Data Acquisition Toolbox. Esta Toolbox proporciona las funciones necesarias para registrar información de *hardware* proveniente de diversos proveedores. Por otro lado, para trabajar con el chasis NI cDAQ-9174, es necesario descargar el programa NI Package Manager del mismo fabricante. Una vez instalado, se debe instalar el controlador NI-DAQmx que brinda soporte para los clientes que utilizan dispositivos de adquisición de datos de National Instruments.

A continuación, se explicará qué funciones es capaz de realizar la aplicación creada y se mostrará a su vez la interfaz de usuario.

4.2. Funcionamiento del programa e interfaz de usuario

En primer lugar, para abrir el programa bastará con hacer doble clic sobre el archivo .mlapp llamado *VibrationAcquisition*, esto abrirá automáticamente MATLAB y se cargará la aplicación correspondiente para su uso. Para poder comprender mejor el comportamiento de la aplicación, se muestra en la Figura 4.1 un diagrama de flujo que permite visualizar rápidamente la estructura del programa.

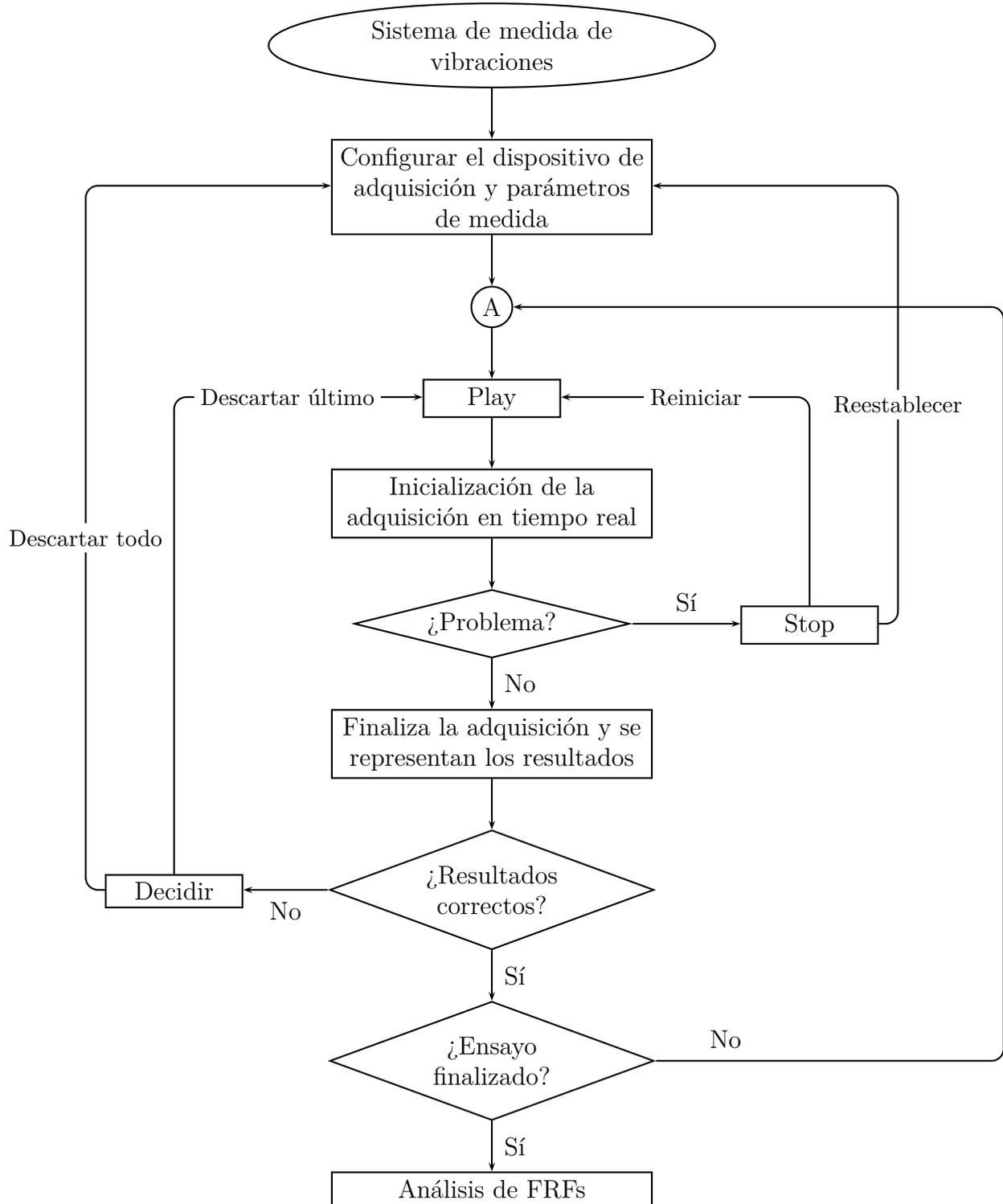


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la aplicación

4.2.1. Menú principal

Al inicializar el programa aparece una ventana vacía con un menú desplegable que permite realizar solamente tres acciones, como se muestra en la Figura 4.2.

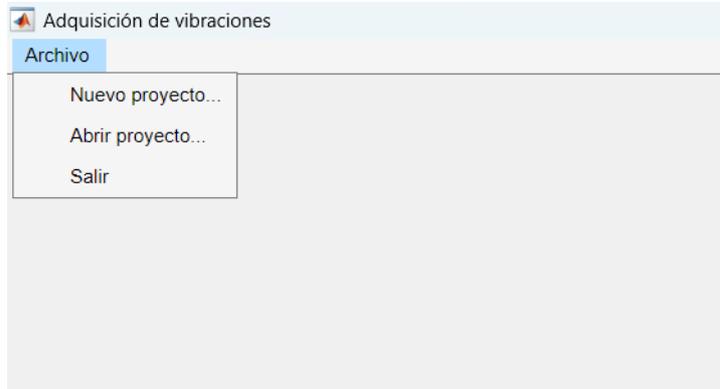


Figura 4.2: Menú principal de la aplicación

Nuevo proyecto: Al seleccionar esta opción, se abre el explorador de archivos que pedirá al usuario el nombre para el archivo MAT, formato de archivo propio de MATLAB utilizado para almacenar datos en variables. Una vez seleccionado se abrirá la pestaña principal de trabajo.

Abrir proyecto: Si se ha utilizado la aplicación en anterioridad, es posible cargar un archivo de datos MAT para visualizar los resultados obtenidos, aunque esto se explicará más adelante.

Salir: Esta opción cerrará la aplicación.

4.2.2. Configuración adquisición de vibraciones

En primer lugar, el programa es capaz de detectar los dispositivos conectados al ordenador que son compatibles con la Toolbox anteriormente mencionada. El programa reconocerá sistemas de adquisición DAQ que permitan entradas analógicas de tipo voltaje y aceleración.

Al crear un nuevo proyecto se abre la ventana de configuración. En este momento, la única opción habilitada es la selección del dispositivo. Una vez escogida la tarjeta DAQ que se utilizará para la realización de las mediciones (en este caso, el sistema DAQ NI 9230), el programa automáticamente detectará el número de canales existentes y permitirá seleccionar al usuario el resto de opciones, como se muestra en la Figura 4.3.

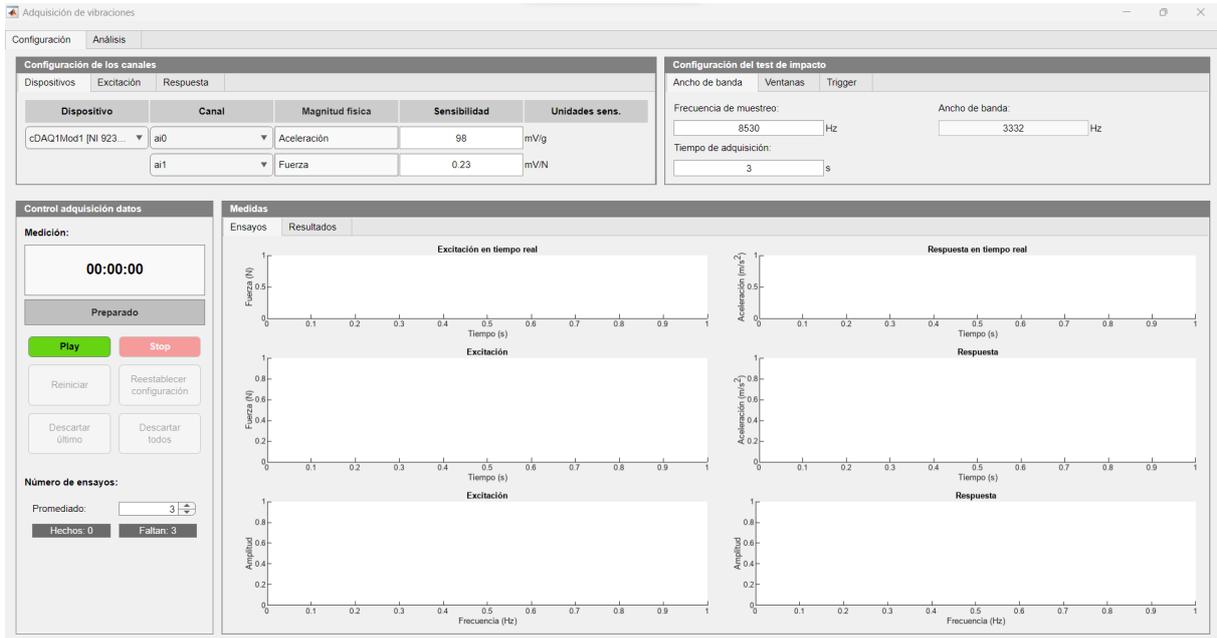


Figura 4.3: Ventana de configuración de la aplicación

Esta pestaña contiene 4 paneles cuyas funciones se explicarán a continuación.

4.2.2.1. Configuración de los canales

En el panel de la Figura 4.4 el usuario será capaz de ajustar los canales de medición, así como la ubicación de la excitación y la respuesta.

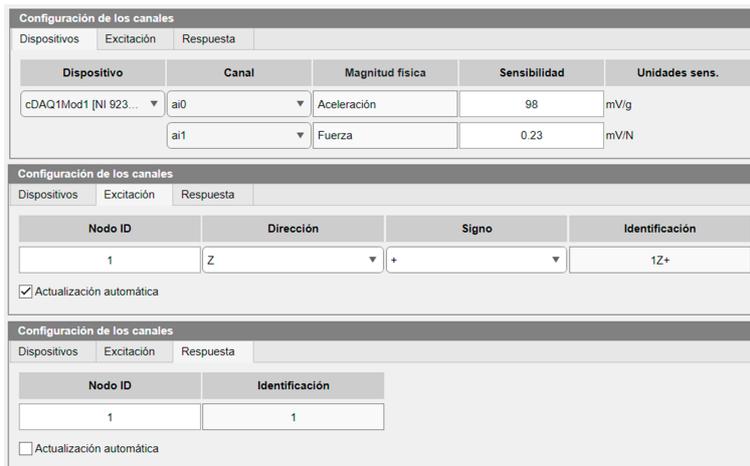


Figura 4.4: Panel de configuración de los canales de la aplicación

Dispositivos:

Como ya se ha comentado, tras seleccionar el dispositivo a través del cual se van a realizar las medidas, la aplicación es capaz de detectar el número de canales disponibles, que para este caso serán tres. De este modo, se debe escoger el canal en el que se medirá la excitación y en el que se medirá la respuesta. Por otro lado, el usuario debe indicar la sensibilidad del aparato de excitación y respuesta en mV/g y mV/N, respectivamente.

Si se selecciona un mismo canal 2 veces aparecerá un mensaje de error “Ese canal ya está seleccionado. Escoge otro para continuar”.

Excitación:

Durante la realización de un ensayo de impactos es habitual medir en diversos puntos de la geometría. En la pestaña de excitación se especifica la ubicación donde golpeará el martillo. La identificación estará formada por 3 caracteres, el primero de ellos “Nodo ID” es un número, “Dirección” puede tomar los valores X , Y o Z , y finalmente “Signo”, que puede ser positivo o negativo. Es decir, una posible identificación de la posición de excitación podría ser $1Z+$.

Respuesta:

Finalmente, en esta pestaña se podrá identificar la ubicación del acelerómetro con un número. De esta forma, se consigue distinguir la localización de la excitación y la de la respuesta.

Tanto para la excitación como la respuesta, se podrá marcar la opción de “Actualización automática” para que el valor de “Nodo ID” correspondiente aumente su valor en 1 unidad tras realizar una medición para agilizar el ensayo. Además, el programa no permite realizar nuevas mediciones en una misma localización, por lo que si se han obtenido resultados incorrectos, se deberá eliminar esta medición para continuar.

4.2.2.2. Configuración del test de impacto

Por otro lado, antes de comenzar la obtención de los datos, es necesario preparar algunas propiedades adicionales en el panel de configuración del test de impacto (Figura 4.5). Este panel está formado por tres pestañas, llamadas ancho de banda, ventanas y *trigger*. Es importante seleccionar correctamente las características deseadas, porque se mantendrán durante todo el ensayo. A continuación, se brindará una explicación detallada sobre el funcionamiento y las capacidades de cada pestaña.

The figure shows three stacked configuration panels for an impact test. Each panel has tabs for 'Ancho de banda', 'Ventanas', and 'Trigger'.
 - The top panel is titled 'Configuración del test de impacto' and shows 'Frecuencia de muestreo' set to 8530 Hz and 'Ancho de banda' set to 3332 Hz. 'Tiempo de adquisición' is set to 3 s.
 - The middle panel is also titled 'Configuración del test de impacto'. Under 'Excitación:', 'Ventana de fuerza' is checked. Under 'Respuesta:', 'Ventana exponencial' is unchecked. 'Longitud' is set to 0.0176 s and 'Atenuación' is set to 50%.
 - The bottom panel is titled 'Configuración del test de impacto'. 'Pretrigger' is set to 15% and 'Nivel de trigger' is set to 10 N.

Figura 4.5: Panel de configuración del test de impacto de la aplicación

Ancho de banda:

En esta ventana el usuario deberá insertar la frecuencia de muestreo en Hz. Es importante revisar el manual del sistema de adquisición para insertar un valor permitido. No obstante, el programa avisará al usuario si introduce una frecuencia de muestreo menor o mayor de la permitida. Por otro lado, el ancho de banda no podrá ser editado, y será $1/2.56$ veces la frecuencia de muestro para evitar errores de *aliasing*. Finalmente, queda por definir la duración total del test. Es importante ajustar adecuadamente este parámetro de forma que se asegure una captura completa de la respuesta.

Ventanas:

Para la señal de excitación es posible implementar una ventana de fuerza y personalizarla modificando la longitud en segundos. Para entender el funcionamiento, la ventana de fuerza toma un valor de cero hasta que se detecta un golpe. En ese momento, pasa a tomar valor unitario de manera brusca, para eliminar el ruido lo máximo posible. A partir de aquí, según la longitud introducida en la aplicación (*taper*) se puede modificar su duración. Finalmente la ventana decae rápidamente con forma de semicoseno hasta 0.

En la Figura 4.6, se muestra la forma de diversas ventanas de fuerza, con un *pretrigger* del 20% y distintas longitudes de entrada, durante 1 segundo.

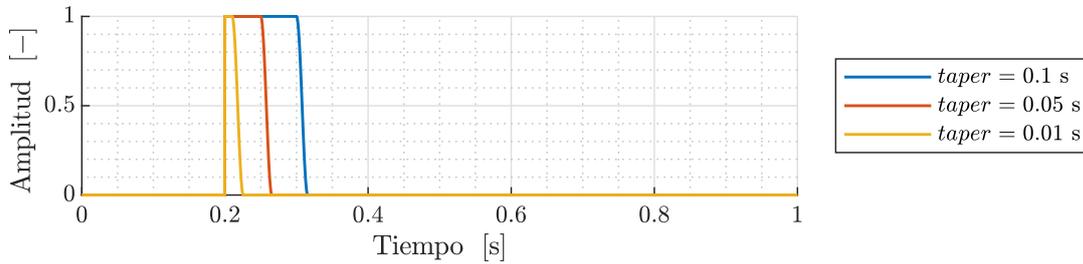


Figura 4.6: Ventana de fuerza para distintas longitudes

Por otro lado, es posible atenuar la respuesta incluyendo una ventana exponencial. Justo antes de detectar el golpe, la ventana exponencial crece con forma de semicoseno rápidamente hasta alcanzar el valor unitario. A partir de este momento, es posible mitigar la intensidad de la señal.

Para comprender el funcionamiento, en la Figura 4.7 se muestra la forma de diversas ventanas exponenciales con un *pretrigger* del 20% y distintos porcentajes de atenuación, durante 1 segundo. El valor del 0% reduce la amplitud de la señal a 0 al final de la medición, mientras que un valor del 50% reduce la amplitud de la señal a la mitad al final de la medición.

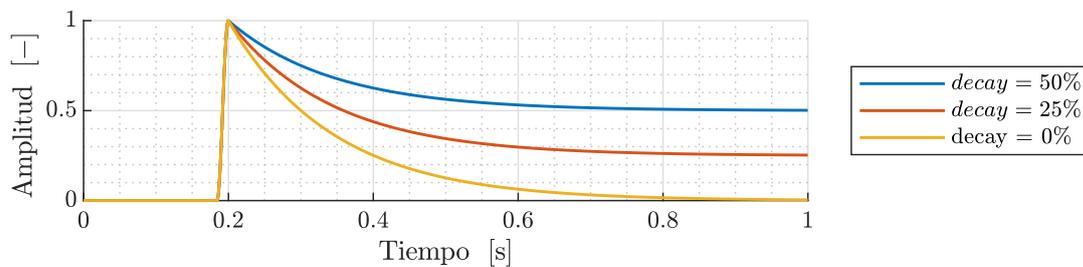


Figura 4.7: Ventana exponencial para distintos porcentajes de decaimiento

Trigger:

Finalmente, antes de empezar a medir queda por definir el *pretrigger* estableciendo la posición del impacto en % respecto a la duración total de la medición. La prueba de impacto requiere un criterio de inicialización.

En este caso se trata de indicar el nivel de *trigger* en N que deberá alcanzar la señal de excitación.

4.2.2.3. Control de adquisición

Una vez se ha completado la configuración del dispositivo y los parámetros, es hora de inicializar la medición. Para ello se dispone del panel de la Figura 4.8.



Figura 4.8: Panel de control de adquisición de la aplicación

Realizar múltiples promedios en cada medición de un ensayo es importante, ya que permite reducir el ruido y aumenta la precisión y la confiabilidad de la medida. El número de promedios es modificable.

Una vez se presiona el botón “Play”, se inicia la adquisición de datos, lo que a su vez activa el cronómetro ubicado en la parte superior del panel. Al comenzar, en el panel de medidas se mostrarán en tiempo real tanto la señal de excitación como la respuesta. Durante la medición, el programa permanecerá en espera constante para detectar el *trigger*. En ese momento, el estado del panel informativo cambiará de “Preparado”, en color gris, a “Midiendo...”, en color naranja. Esta retroalimentación visual proporciona al usuario información sobre el estado actual de la medición.

Es posible que surjan inconvenientes durante el proceso de adquisición. En tal caso, se recomienda presionar el botón “Stop” para interrumpir la medición y habilitar dos opciones adicionales. Primero, si la configuración previa es correcta pero se ha cometido un

error, como un golpe de martillo incorrecto, se debe seleccionar “Reiniciar” para continuar sin problemas. Sin embargo, si el problema radica en la configuración inicial, se debe optar por “Restablecer configuración”.

Por otro lado, en la parte inferior del panel se muestra el número de golpes que se han realizado y los que quedan, de forma que se pueda llevar un seguimiento del proceso.

4.2.2.4. Representación de las medidas

En el panel de medidas hay dos ventanas que muestran exclusivamente información gráfica: ensayos y resultados.

Ensayos:

Esta ventana contiene 6 gráficos, 3 correspondientes a la excitación y 3 a la respuesta. Como ya se ha comentado, durante toda la adquisición se mostrarán en tiempo real las señales de la excitación y de la respuesta. Por otro lado, cada vez que se produzca una medición (un golpe), se representarán las magnitudes en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

Para implementar la FFT, MATLAB proporciona la función *fft*, optimizada para escoger entre distintos algoritmos según el tamaño de los datos de entrada. Además, para hallar la coherencia, la función *mscohere* estima la función de coherencia de magnitud cuadrada.

Resultados:

Tras realizar todos los golpes requeridos termina la adquisición. En ese momento se realiza el promediado y se representa la excitación y la respuesta promediada en función del tiempo. En esta ventana, además de estos dos gráficos también se visualizará la magnitud de la FRF tipo inercia y la coherencia, para poder analizar los resultados y tomar una decisión.

Al finalizar la adquisición, se activan dos botones adicionales en el panel de control de adquisición (Figura 4.8). Si los resultados de la coherencia no cumplen con las expectativas o si se ha cometido algún error, se debe seleccionar “Descartar último” para reiniciar esa medición específica. Sin embargo, si el problema parece repetirse en cada medición, es probable que se deba realizar algún cambio en la configuración, como la duración o los parámetros de las ventanas temporales. En ese caso, se debe presionar “Descartar todos” para empezar de nuevo. Si los resultados son satisfactorios, es posible cambiar la ubicación de la excitación y/o de la respuesta y medir más datos o dar por finalizado el ensayo.

Para una comprensión más clara de las decisiones a tomar, es recomendable consultar el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 4.1. Esto evitará confusiones y ayudará a entender los conceptos involucrados en el proceso.

4.2.3. Análisis de FRFs

La segunda ventana principal de la aplicación se visualiza en la Figura 4.9. Esta ventana consta de tres pestañas que muestran las FRF tipo receptancia, movilidad e inercia. Para cada tipo de FRF, se representan tanto la magnitud en una escala logarítmica como la fase en función de la frecuencia en Hz, dentro del ancho de banda establecido. Además, en la parte inferior se muestra la coherencia, lo que permite identificar las antiresonancias y su correspondiente disminución en la función coherencia.

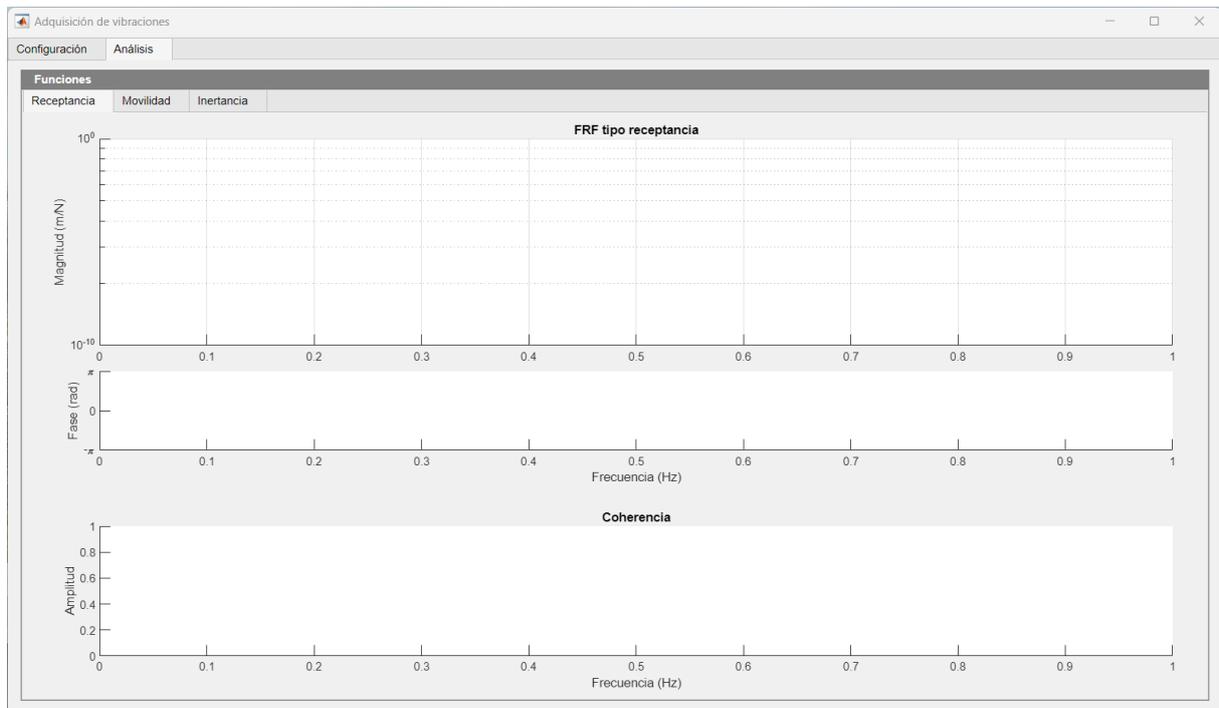


Figura 4.9: Ventana de análisis de la aplicación vacía

En cada gráfico, la información se incrementará a medida que se agreguen más mediciones. Para evitar confusiones, se mostrará una leyenda que identificará la ubicación de la excitación y de la respuesta en los gráficos. Esto permitirá distinguir claramente la información y facilitará la interpretación de los resultados. Un ejemplo de la leyenda puede ser “1Z+/2”.

Por otro lado, anteriormente se ha mencionado que es posible abrir un proyecto creado. En ese caso, el usuario seleccionará el archivo MAT correspondiente y solamente se abrirá esta ventana, estando inhabilitada la adquisición de datos.

En el archivo MAT se almacenará la información necesaria para reproducir la representación de las FRFs. Este contendrá siempre al menos dos variables: el número de muestras y la frecuencia de muestreo de la medición. Además, por cada medición realizada, se añadirá una variable con el formato “test_IDExcitación_IDRespuesta”. Es decir, en el nombre de la variable se incluirá la identificación correspondiente al lugar de la excitación y la medición. Esta variable será una matriz de tres columnas, que contendrá el tiempo en segundos en la primera columna, la respuesta en m/s^2 en la segunda y la excitación en newtons en la tercera.

De esta forma al seleccionar el archivo, se podrá leer la información contenida y realizar las representaciones de las funciones de respuesta en frecuencia.

5. Validación del programa

5.1. Introducción

Este estudio tiene como objetivo validar el funcionamiento del programa diseñado para la medición y análisis de vibraciones. Para ello, se realizarán mediciones sobre una viga libre-libre, elemento que dispone de solución analítica ya resuelta para las vibraciones a flexión. Se utilizará esta solución como referencia. La barra es una aleación de aluminio 7075-T6. El principal elemento de esta aleación es el zinc, con una composición del aproximadamente 5.1 – 6.1%, seguido del cobre y magnesio, principalmente. Es un material ampliamente utilizado para la fabricación de armas, industria del automóvil o aeronáutica, entre otros.



Figura 5.1: Barra de aleación de aluminio 7075-T6

A continuación, se describen las dimensiones y características principales de la viga de la Figura 5.1 en la Tabla 5.1.

Parámetro	Valor	Unidad
L	0.90	m
b	$7.10 \cdot 10^{-2}$	m
h	$2.52 \cdot 10^{-2}$	m
A_t	$1.78 \cdot 10^{-3}$	m ²
I	$9.25 \cdot 10^{-8}$	m ⁴

Tabla 5.1: Geometría y propiedades de la viga

Donde L es la longitud de la viga, b es el ancho y h la altura.

Además también se han obtenido el área de la sección transversal, A_t y el momento de inercia de la sección trasversal, I . Se establece el sistema de coordenadas con su origen en el punto O , como aparece en el esquema de la Figura 5.2.

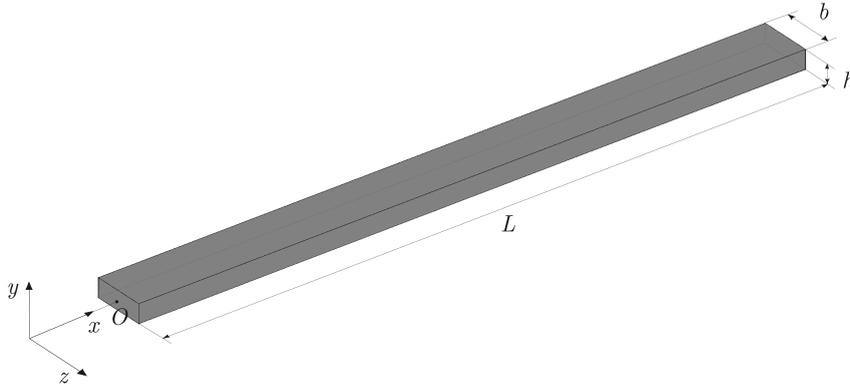


Figura 5.2: Representación esquemática de la viga, con sus dimensiones acotadas y sistema de coordenadas

Para hallar la solución analítica es necesario conocer algunas propiedades mecánicas del material. En la Tabla 5.2 se puede encontrar el módulo de Young, E , el coeficiente de Poisson, ν , y finalmente la densidad del material, ρ [18].

Propiedad	Valor	Unidad
E	72	GPa
ν	0.33	—
ρ	2 800	kg/m ³

Tabla 5.2: Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T6

Para preparar el montaje, se colocará la barra sobre dos esponjas de poliuretano para simular las condiciones de una viga libre-libre. Las esponjas son materiales porosos, flexibles y elásticos que pueden deformarse y recuperar su forma original con facilidad. En comparación con la barra, su rigidez es insignificante. Estas esponjas son una opción económica y fácilmente accesible para simular las condiciones deseadas en el ensayo.

5.2. Solución analítica

El objetivo es obtener las frecuencias naturales de los 5 primeros modos de flexión de la viga de forma analítica. Se va a realizar una breve introducción al desarrollo matemático. Para ello se parte de la Ecuación 5.1, que describe las vibraciones de flexión según la teoría de vigas de Euler-Bernoulli.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho A_t \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (5.1)$$

La solución a la ecuación se puede escribir como una onda estacionaria separando una componente espacial y otra temporal. Así pues, a partir de la componente espacial se halla el desplazamiento de la viga en el eje x , $w(x)$ que se define en la Ecuación 5.2.

$$w(x) = C_1 \sinh(kx) + C_2 \cos(kx) + C_3 \sinh(kx) + C_4 \cosh(kx) \quad (5.2)$$

Donde k representa el número de onda angular. En la Ecuación 5.3 se define la denominada ecuación característica que relaciona la frecuencia angular y el número de onda.

$$\omega = \frac{EI}{\rho A_t} k^4 \quad (5.3)$$

Conocidas estas definiciones, se denomina viga libre-libre a aquella que carece de soportes. Para resolver la ecuación se aplican las condiciones de contorno correspondientes, esto es, fuerza y momento nulos en los extremos. Con estas cuatro condiciones de contorno se establece un sistema matricial que ha de resolverse para encontrar las constantes C_1 , C_2 , C_3 y C_4 .

La solución trivial es aquella en la que la viga no se mueve. Para obtener el resto de soluciones no triviales y hallar el número de onda característico de cada frecuencia natural se ha de resolver la siguiente ecuación trascendental [19].

$$\cosh(kL) \cos(kL) = 1 \quad (5.4)$$

La Ecuación 5.4 tiene infinitas soluciones y se puede resolver numéricamente. Así pues, se obtiene el número de onda para los 5 primeros modos y se sustituye en la Ecuación 5.3 para hallar las frecuencias naturales en la Tabla 5.3.

Modo	f_n [Hz]
1	162.17
2	447.02
3	876.34
4	1 448.60
5	2 164.00

Tabla 5.3: Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra de aleación de aluminio 7076-T6 calculadas de forma analítica

Con las constantes resueltas y conociendo el número de onda de los 5 primeros modos es posible representar la forma de estos en la Figura 5.3. Para ello, se sustituye en la Ecuación 5.5 el valor del número de onda correspondiente a cada modo.

$$w(x) = [\sinh(kx) + \sin(kx)] + \frac{\sin(kL) - \sinh(kL)}{\cosh(kL) - \cos(kL)} [\cosh(kx) + \cos(kx)] \quad (5.5)$$

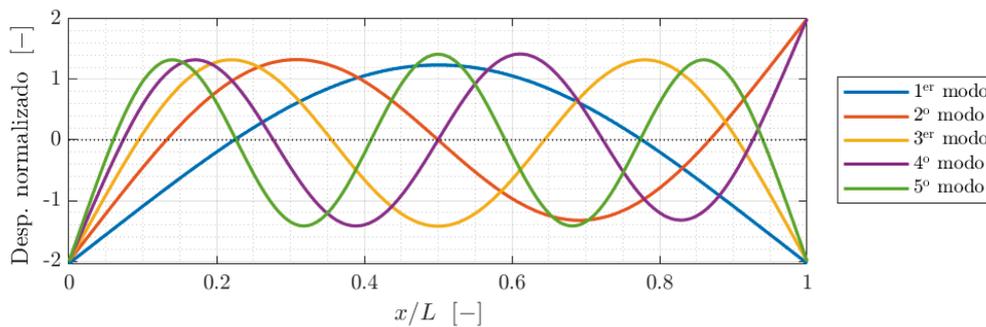


Figura 5.3: Primeros 5 modos de flexión de una viga libre-libre

5.3. Configuración de los ensayos

Para validar el programa se van a realizar diferentes ensayos sobre la viga utilizando la aplicación *VibrationAcquisition*. Las pruebas que se llevarán a cabo serán del tipo excitación itinerante con referencia fija. Es decir, en estas pruebas el sensor de aceleración estará montado en una posición fija en la estructura y el martillo se moverá en diferentes posiciones. Se escoge este tipo de prueba porque simplifica la configuración y reduce el tiempo requerido de montaje.

Para tratar de excitar los modos de flexión se golpeará la barra en el eje de simetría de la dirección longitudinal, tratando de evitar los modos de torsión. Se escogen 4 puntos ubicados en la primera mitad de la barra, es decir, hasta $L/2$ aprovechando de esta forma la simetría y antisimetría de los modos de vibración a analizar.

En cada punto de excitación se realizarán 10 golpes que serán promediados. Como ya se ha comentado anteriormente, es importante que todos los golpes sean muy similares entre sí y estén orientados en la misma dirección, en este caso, en sentido negativo al eje y .

En la Figura 5.4 se muestra un esquema con las diferentes posiciones de las excitaciones y la ubicación del acelerómetro. Los nodos de excitación se ubican a 0.02, 0.16, 0.31 y 0.45 m respecto del origen de coordenadas, mientras que la posición del acelerómetro se ubica a 0.88 m.

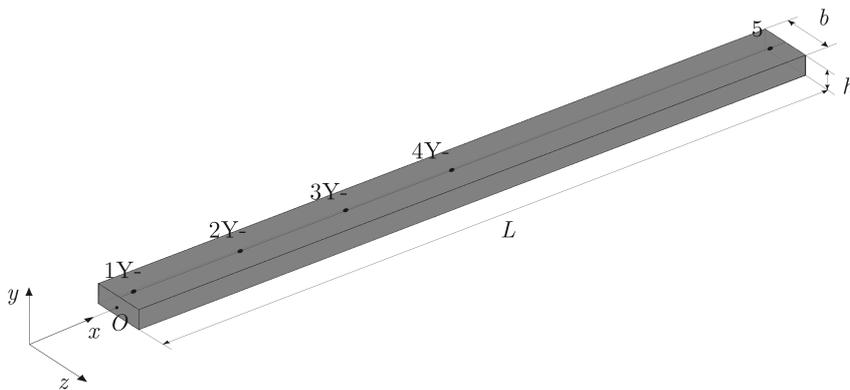


Figura 5.4: Representación esquemática de la viga, con la posición de la excitación y respuesta

En cuanto al montaje, para todos los ensayos se conectará el acelerómetro B&K 4533-B-001 al canal ai0 del módulo de adquisición NI 9230. Por otro lado, el martillo PCB 086D05 se conectará al canal ai1. Después de seleccionar la posición de los canales, se indica la sensibilidad de 98 mV/g y 0.2397 mV/N para el acelerómetro y el martillo, respectivamente. El martillo instrumentado estará montado con una punta de plástico blanco de dureza mediana y la extensión de masa como se ha explicado en la Sección 3.

Para establecer la frecuencia de muestreo, se consulta el manual del sistema de adquisición y se decide seleccionar una tasa de 6 400 muestras por segundo. De esta forma, el programa automáticamente establecerá un ancho de banda de 2 500 Hz, suficiente para poder identificar los cinco primeros modos de flexión.

Se decide registrar cada golpe durante 2 segundos, de forma que quede completamente incluida la respuesta. Además, se selecciona un *pretrigger* del 15% y un nivel de *trigger* de 7 N, suficiente para identificar el momento exacto del golpe.

En la serie de ensayos que se llevarán a cabo, se explorarán diferentes combinaciones de ventanas de fuerza y ventanas exponenciales. El objetivo de estas pruebas es evaluar y comparar la precisión de los resultados obtenidos utilizando diferentes configuraciones de ventanas.

Finalmente se muestra en la Figura 5.5 el resultado del montaje final con todos los elementos que forman parte de la cadena de medidas. Como ya se ha comentado, en el Anexo A se explica con mayor detalle cómo conectar cada uno de los dispositivos.

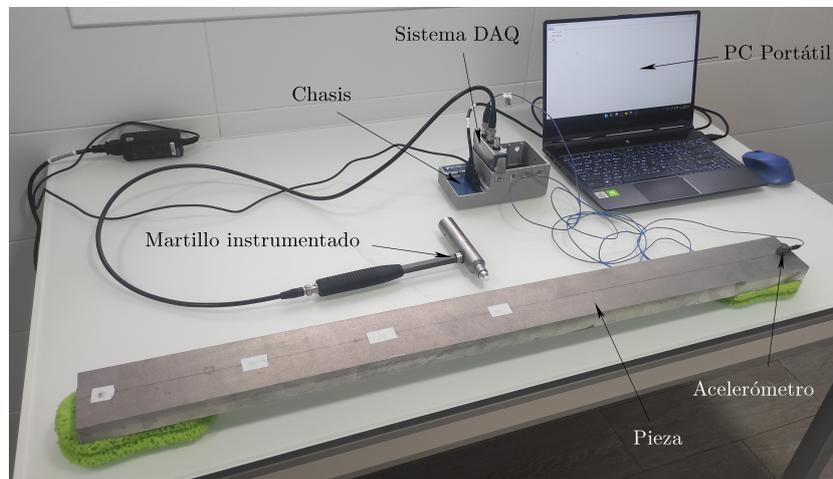


Figura 5.5: Montaje general para la validación

5.3.1. Ensayo 0

En primer lugar, esto no será un ensayo propiamente dicho, sino que antes de poder seleccionar una configuración adecuada para las ventanas se va a dar un golpe en la ubicación 1Y- sin marcar las casillas de ventana de fuerza y exponencial.

Como se observa en la Figura 5.6 en la señal de excitación hay ruido excesivo, lo que dificultará un buen análisis. Es por ello que en los siguientes ensayos se tratará de incluir una ventana de fuerza con la longitud adecuada.

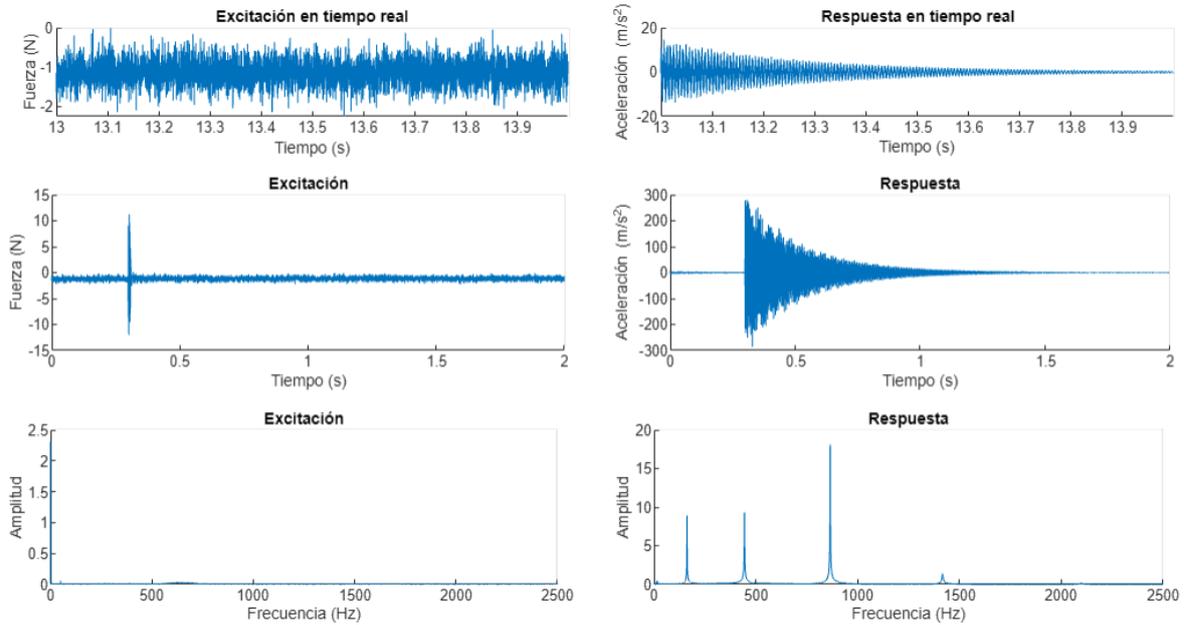


Figura 5.6: Excitación y respuesta en el dominio del tiempo y la frecuencia en un ensayo sin ventanas temporales en la ubicación 1Y-/5

En cuanto a la respuesta, a pesar de que está contenida perfectamente en el intervalo de 2 segundos, si se incluye una ventana exponencial del 0% se exigirá que sea completamente cero al final de la medición.

5.3.2. Ensayo 1

En primer lugar, se va a plantear la inclusión de una ventana de fuerza de 0.001 s y una atenuación del decaimiento de la ventana exponencial del 0%.

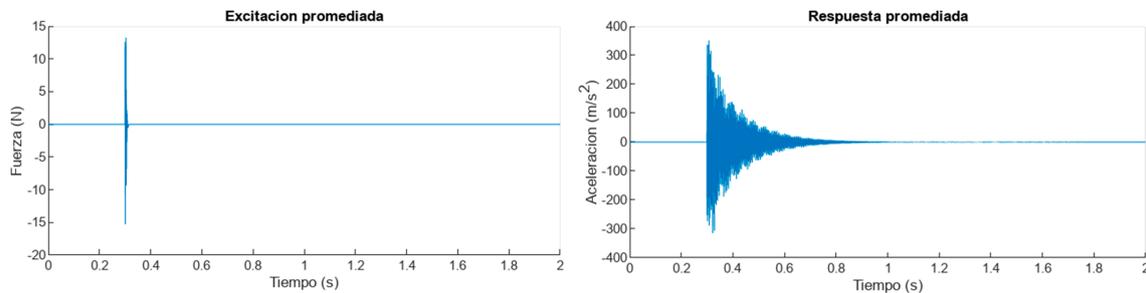


Figura 5.7: Excitación y respuesta promediadas en la ubicación 1Y-/5 para una longitud de ventana de fuerza de 0.001 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%

En la Figura 5.7 aparece el resultado del promediado de la excitación en la ubicación 1Y-/5 para esta configuración. Se observa que, a diferencia de la Figura 5.6, la excitación es completamente nula excepto en el momento del pulso.

Así pues, finalmente, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.8.

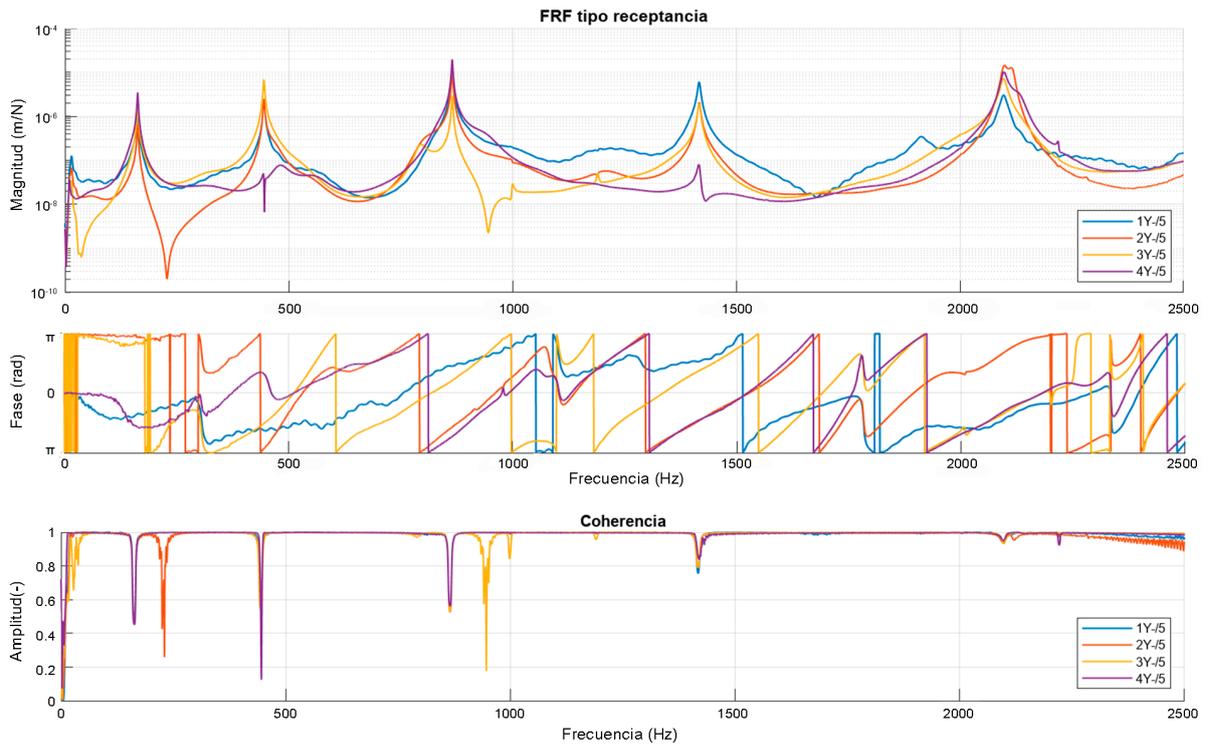


Figura 5.8: Magnitud y fase de la FRF tipo receptancia y coherencia para una longitud de ventana de fuerza de 0.001 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%

Se observan claramente los 5 modos de vibración que se deseaban encontrar en los picos de resonancia. También es posible identificar que, en la ubicación 4Y-/5, el tercer y cuarto modo no son claramente visibles. Esto es debido a que justo en la mitad de la viga existe un nodo donde la amplitud es mínima para estos modos, cosa que se puede observar en la Figura 5.3.

Para obtener las frecuencias naturales se hace un promedio observando el gráfico obtenido. En el caso de la ubicación 4Y-/5 solo se tendrán en cuenta los modos 1, 3 y 5. Los resultados se muestran en la Tabla 5.4. Además, se ha calculado el error relativo respecto a los resultados analíticos.

Modo	f_n [Hz]	Error relativo [%]
1	162.50	0.21
2	444.50	-0.56
3	865.50	-1.24
4	1 418.50	-2.08
5	2 098.38	-3.03

Tabla 5.4: Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra calculadas con una longitud de ventana de fuerza de 0.001 s, una ventana exponencial con un decaimiento del 0% y el error relativo respecto los resultados analíticos

5.3.3. Ensayo 2

Para no realizar solo un ensayo de comprobación, se decide aumentar la longitud de la ventana de fuerza ligeramente hasta los 0.0015 s. Los resultados que se observan en la interfaz se muestran en la Figura 5.9.

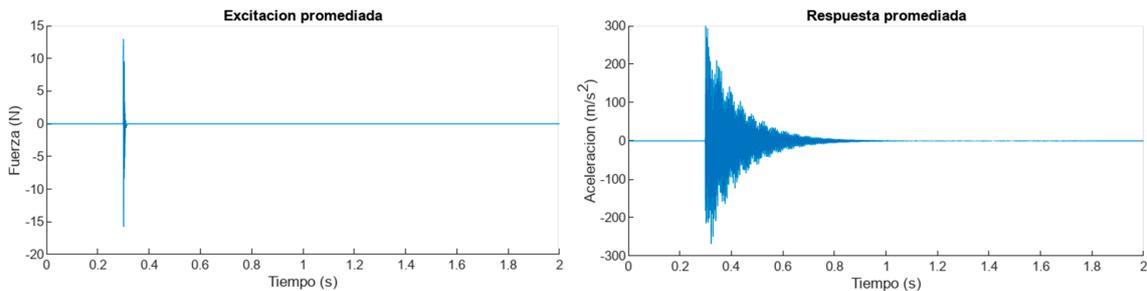


Figura 5.9: Excitación y respuesta promediadas en la ubicación 1Y-/5 para una longitud de ventana de fuerza de 0.0015 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%

De manera análoga para esta configuración es posible obtener las FRFs gráficamente, como se muestra en la Figura 5.10.

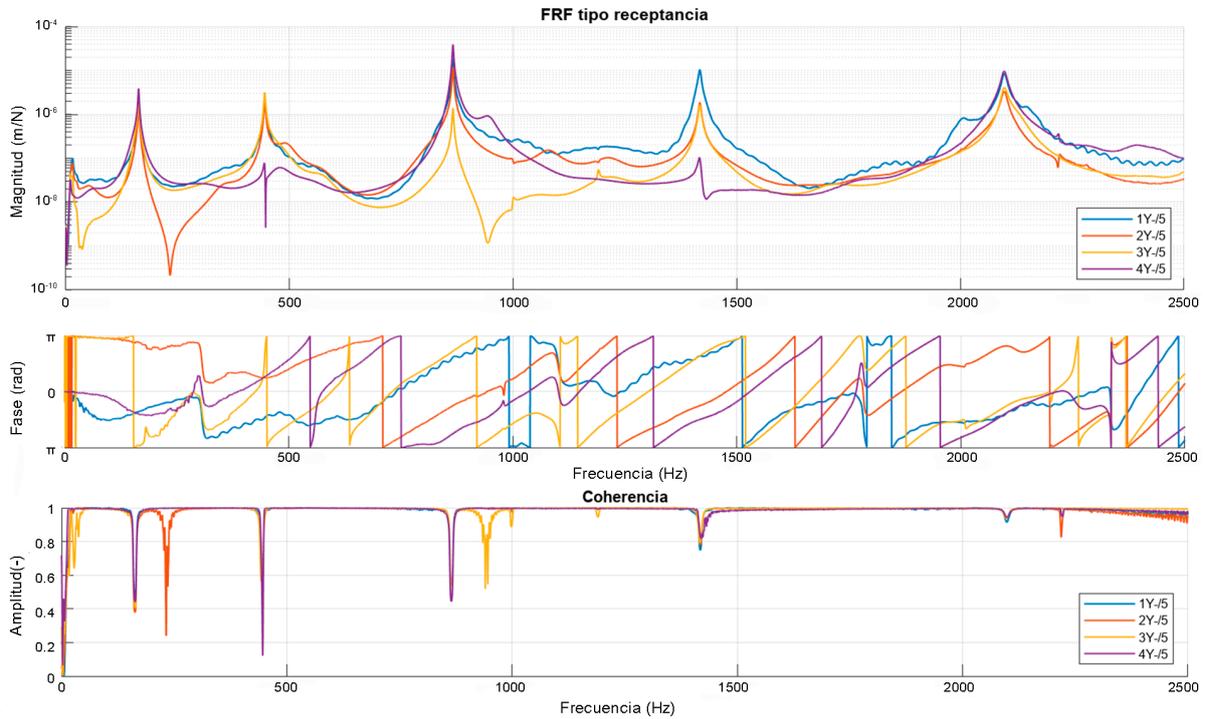


Figura 5.10: Magnitud y fase de la FRF tipo receptancia y coherencia para una longitud de ventana de fuerza de 0.0015 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%

Así pues, en la Tabla 5.5 aparecen las frecuencias naturales obtenidas con esta configuración, así como el error respecto al cálculo analítico.

Modo	f_n [Hz]	Error relativo [%]
1	162.50	0.21
2	444.50	-0.56
3	865.50	-1.24
4	1417.50	-2.15
5	2098.13	-3.04

Tabla 5.5: Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra calculadas con una longitud de ventana de fuerza de 0.0015 s, una ventana exponencial con un decaimiento del 0% y el error relativo respecto los resultados analíticos

5.3.4. Ensayo 3

Por último, se repite el mismo procedimiento con una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s. Se procede conforme los apartados anteriores, y se obtienen los resultados proporcionados por la aplicación en las Figuras 5.11 y 5.12 y la Tabla 5.6.

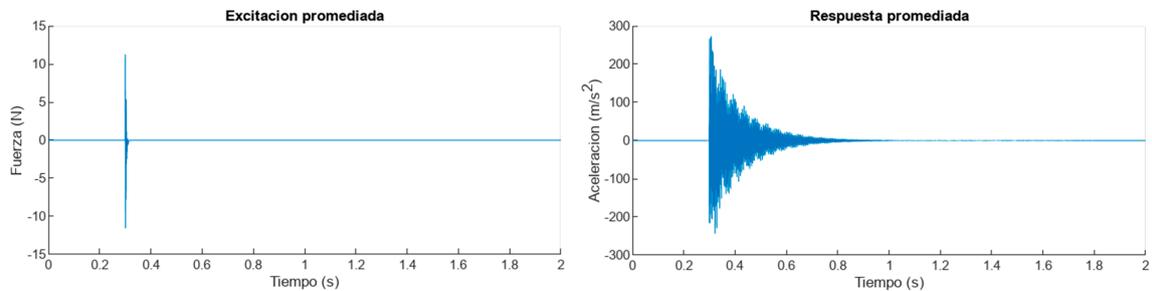


Figura 5.11: Excitación y respuesta promediadas en la ubicación 1Y-/5 para una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%

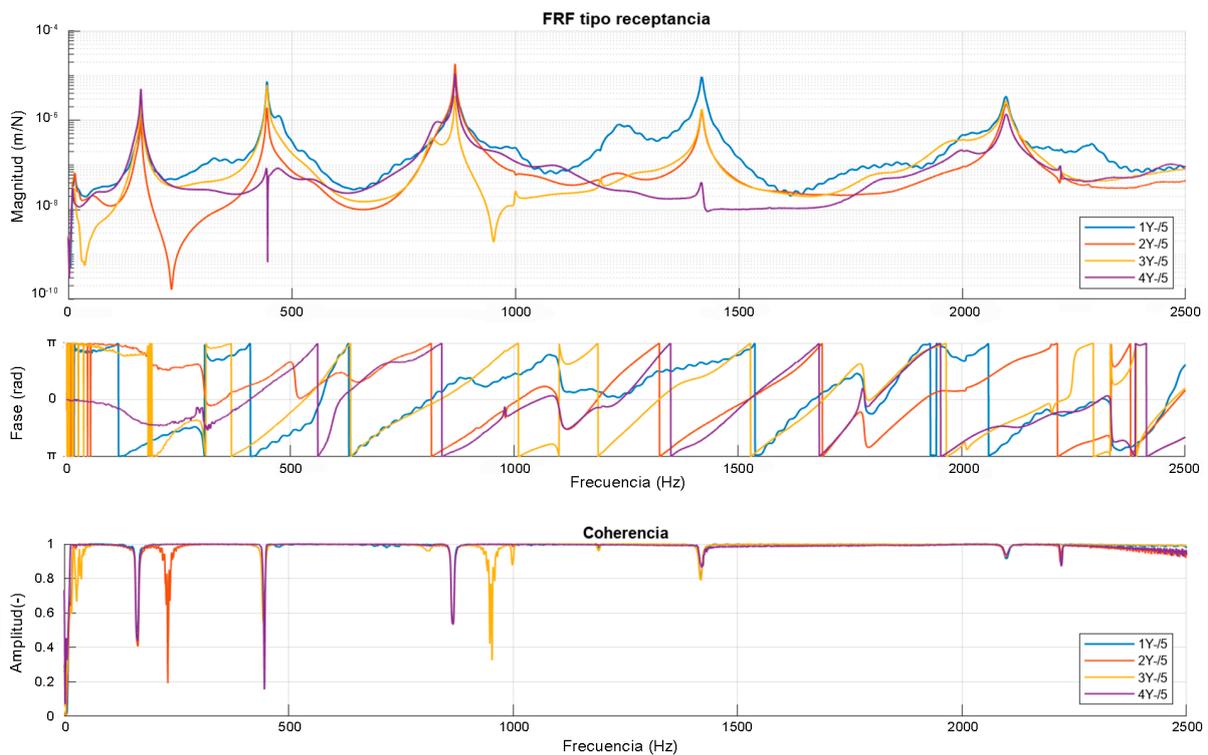


Figura 5.12: Magnitud y fase de la FRF tipo receptancia y coherencia para una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s y una ventana exponencial con un decaimiento del 0%

Modo	f_n [Hz]	Error relativo [%]
1	162.50	0.21
2	444.67	-0.52
3	865.50	-1.24
4	1 417.50	-2.15
5	2 098.25	-3.04

Tabla 5.6: Frecuencias naturales para los 5 primeros modos de flexión de la barra calculadas con una longitud de ventana de fuerza de 0.002 s, una ventana exponencial con un decaimiento del 0% y el error relativo respecto los resultados analíticos

5.4. Conclusiones de los ensayos

Tras realizar los ensayos, se han obtenido valores para las frecuencias naturales prácticamente idénticos entre sí, que muestran ciertas diferencias respecto los valores analíticos.

En primer lugar, cabe destacar que para esta configuración la resolución en frecuencia es de 0.5 Hz según la Ecuación 2.6. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo se ha establecido en 6 400 muestras por segundo, y la duración del ensayo es de 2 s, dando lugar a un total de 12 800 muestras. Para aumentar este valor es posible aumentar la frecuencia de muestreo o el tiempo de medición. Sin embargo, la resolución establecida se considera más que suficiente para el propósito de este análisis.

Por tanto, otra posible causa de las diferencias obtenidas puede deberse al modelo utilizado para describir el comportamiento de la viga. Se observa que los resultados analíticos usando el modelo de Euler-Bernoulli subestiman las frecuencias obtenidas experimentalmente. Esto puede deberse a las suposiciones simplificadas y las limitaciones de este modelo teórico. En concreto, la mayor discrepancia se encuentra en el quinto modo. Otros modelos como el de Rayleigh tiene en cuenta la inercia a la rotación de la sección recta de la viga. Por otro lado, el de Timoshenko tiene en cuenta, además, la deformación debida al cortante. La deformación debida al cortante es más importante cuanto más pequeña es la longitud de la onda asociada al modo de vibración, lo cual ocurre para los modos con mayor frecuencia.

Por otro lado, se debe considerar que el módulo de Young proporcionado por el fabricante, puede presentar ciertas tolerancias y variaciones inherentes en las propiedades del material.

En definitiva, los ensayos realizados han proporcionado resultados que difieren ligeramente de los de referencia, siendo el máximo error obtenido del -3.04% en el quinto modo. Es importante configurar adecuadamente los ensayos para minimizar discrepancias y obtener buenos resultados.

Se concluye que los ensayos realizados han permitido una validación satisfactoria de la aplicación. Los resultados obtenidos se consideran fiables y suficientes para garantizar el buen funcionamiento de la aplicación. Así pues, se confirma que el programa desarrollado puede ser usado para medir y analizar vibraciones en cualquier otra pieza o material.

6. Conclusiones

A partir de objetivos marcados al inicio del proyecto y una vez terminado, se pueden extraer distintas conclusiones. Se ha conseguido desarrollar con éxito la aplicación en MATLAB, que permite adquirir y analizar vibraciones a partir de la medición de un acelerómetro y un martillo instrumentado.

En primer lugar, se ha logrado implementar las funcionalidades deseadas inicialmente en el programa, como la capacidad de realizar ensayos de impacto y promediar las mediciones. La interfaz de usuario creada, permite modificar múltiples parámetros para que el programa pueda ser utilizado con dispositivos distintos a los utilizados en este trabajo. Finalmente, se ha logrado también representar las tres FRFs deseadas: inertancia, movilidad y receptancia. Además, se ha tratado de mejorar el diseño propuesto inicialmente implementando una interfaz que habilita y deshabilita selectivamente los distintos botones y campos editables de acuerdo al estado. De esta forma se evitan fallos al acceder o ingresar datos en momentos inadecuados. Esto, junto a los mensajes de error incorporados, mejoran la experiencia y brindan una retroalimentación al usuario.

Asimismo, al realizar la validación experimental del programa creado, se ha logrado un construir un proyecto más versátil y completo. Esto ha permitido poner a prueba y verificar la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas a través de la aplicación.

Por otro lado, la creación del programa propio ha demostrado ser altamente beneficioso y de gran utilidad, pese a existir en el mercado otras herramientas disponibles con el mismo objetivo. Los programas comerciales pueden requerir licencias costosas y exigir conocimiento avanzado en la materia. Sin embargo, este *software* es sencillo y completamente específico para los requisitos planteados. Además, la principal ventaja es la flexibilidad que permite el poder incorporar mejoras a largo plazo.

Por tanto, de cara al futuro es posible hacer actualizaciones para perfeccionar el sistema de adquisición de vibraciones. Por un lado, sería viable aumentar el número de acelerómetros permitidos por el programa. De esta forma, si se utilizara el programa sobre una estructura más compleja, se podrían detectar los modos estructurales deseados utilizando 2 o más sensores simultáneamente.

Otra posible adaptación sería incluir la detección de dobles golpes del martillo, para así advertir al usuario de lo ocurrido y que sea capaz de volver a repetir la medición. En esta misma línea, también podría existir una advertencia que apareciese cuando la excitación sobrepasara cierto nivel de sobrecarga.

En cuanto a la representación gráfica, se podría ampliar el programa para mostrar las FRFs en otros de sus formatos, Nyquist y parte real e imaginaria o incorporar una herramienta para detectar fácilmente las frecuencias naturales y su amortiguación.

Bibliografía

- [1] S. S. Rao, *Mechanical vibrations fifth edition*, 2011.
- [2] R. L. Herman, “An Introduction to Fourier and complex analysis with applications to the spectral analysis of signals”, *University of North Carolina Wilmington, Wilmington, NC*, 2013.
- [3] T. Irvine, “An Introduction to Shock and Vibration Response Spectra”, *Partnership with enDAQ. com*, 2018.
- [4] P. Bourke, “Fast Fourier Transform”, *Western Australian Supercomputer Program, University of Western Australia*, 1993.
- [5] P. Avitabile, “Modal space-in our own little world”, *Experimental Techniques*, 2012.
- [6] P. Schaldenbrand, “Window Types: Hanning, Flattop, Uniform, Tukey, and Exponential”, *pp. Dec*, vol. 27, 2019.
- [7] R. C. S. y J. M. Nieters, “Proper use of weighting functions for impact testing”, Spanish, en *Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference, Orlando, FL*, 1985.
- [8] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application* (Engineering dynamics series). Wiley, 2000.
- [9] G. White, “Introducción al análisis de vibraciones”, *USA, Azima DLI*, 2010.
- [10] The MathWorks Inc., *Coherencia de magnitud cuadrada*, Disponible en <https://es.mathworks.com/help/signal/ref/mscohere.html> (10/06/2023).
- [11] T. Irvine, “An introduction to frequency response functions”, *Rapport, College of Engineering and Computer Science*, 2000.

- [12] Brüel & Kjær, *Type 4533-B CCLD Accelerometer*, Disponible en <https://www.bksv.com/es/transducers/vibration/accelerometers/ccl-d-ieve/4533-b> (05/04/2023).
- [13] PCB Group, Inc., *Model 086D05*, Disponible en <https://www.pcb.com/products?m=086d05> (20/06/2023).
- [14] J. R. L. V. y J. Pelegrí Sebastiá, *LabView: entorno gráfico de programación*. Marcombo, 2011.
- [15] National Instruments Corporation, *NI-9230 Specifications*, Disponible en <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9230-specs/page/specs.html> (03/04/2023).
- [16] National Instruments Corporation, *NI 9230 and NI 9232 Show Up as Unsupported in MAX*, Disponible en <https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000P7KiSAK&l=es-ES> (17/04/2023).
- [17] National Instruments Corporation, *cDAQ-9174*, Disponible en <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/cdaq-9174-specs/page/specs.html> (15/03/2023).
- [18] Broncesval SL., *Aluminio Aleación Zinc EN AW 7075*, Disponible en <https://www.broncesval.com/aluminio/aluminio-aleacion-zinc-en-aw-7075/> (25/06/2023).
- [19] M. Caresta, *Vibrations of a free-free beam*, 2016.
- [20] España, Jefatura del Estado, “Ley 37/1992, de 28 de diciembre, del Impuesto sobre el Valor Añadido”, 2021.

Parte II.
Pliego de condiciones

7. Objeto del pliego

En esta sección se abordará la descripción técnica de los materiales utilizados y el proceso empleado para lograr los resultados deseados. Por otro lado, se definirán los derechos y obligaciones del proyectista.

8. Condiciones particulares

8.1. Condiciones técnicas

8.1.1. Condiciones de los materiales

A continuación se exponen tanto el *hardware* como el *software* utilizados para este proyecto.

- **Hardware**

1. PC Portátil

El ordenador que se utilizará para la creación y uso de la aplicación programada ha de ser el modelo MSI Modern 14 A10RAS o tener características similares. A continuación se enumeran algunos de sus aspectos técnicos con mayor detalle:

- Sistema Operativo: Microsoft Windows 11 Home
- Procesador: Intel Core i7-10510U @ 1.80GHz 2.30GHz
- RAM: 32 GB

2. Ratón

El ratón inalámbrico utilizado en este proyecto será el Logitech M280, o similar.

3. Acelerómetro

El acelerómetro utilizado para la medición de la respuesta vibratoria será el modelo B&K 4533-B-001.

4. Chasis

El chasis utilizado para el ensamblaje de los componentes será el NI Compact cDAQ-9174, compatible con el resto de los dispositivos.

5. Cable BNC-coaxial

El cable utilizado para ensamblar el acelerómetro con el sistema DAQ debe ser PCB 003C10 o similar.

6. Cable BNC-BNC

El cable utilizado para ensamblar el martillo de impacto con el sistema DAQ será el PCB 012A03 o similar.

7. Martillo instrumentado

El martillo de impacto utilizado para la medición de la excitación es el modelo PCB 086D05.

8. Punta del martillo

La punta utilizada será una PCB 084B04 de plástico blanco y dureza mediana, compatible con el modelo de martillo.

9. Extensión de masa del martillo

La cabeza o extensión de masa utilizada será una PCB 084A09, compatible con el martillo.

10. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación de escritorio necesaria para proporcionar energía al chasis es la NI 190415B-01, compatible con el modelo NI cDAQ-9174.

11. Cable de alimentación IEC

Para conectar la fuente de alimentación al chasis se utilizará el cable HP 100614-009.

12. Cable USB

Para la conexión del portátil se utilizará el cable USB 2.0 NI 780534-01 con una salida tipo tornillo, compatible con el chasis NI cDAQ-9174.

13. Barra de aleación aluminio

Para la validación de la aplicación creada se utilizará una barra de aleación de aluminio 7075-T6 Broncesval, de dimensiones $0.9 \times 0.071 \times 0.0252$ m.

14. Esponjas

Para simular las condiciones de viga libre-libre, se utilizarán dos esponjas de poliuretano, o similar.

15. Cera de montaje

Para adherir el acelerómetro a la barra en la validación de la aplicación de utilizará cera de montaje.

16. Destornillador

Para fijar los cables USB 2.0 y el cable de alimentación al chasis se utilizará un destornillador Bernstein Werkzeugfabrik 4-301, de punta plana y 1.8 mm, o similar.

- **Software**

1. Entorno de programación

El *software* utilizado tanto para la creación como para la ejecución de la aplicación de medición de vibraciones será MATLAB en su versión R2022b, o posterior, a través de la interfaz AppDesigner.

2. Administración de dispositivos

Para poder manejar el chasis cDAQ-9174 desde un PC, será necesario instalar el controlador NI-DAQmx, a través del programa NI Package Manager, en su versión 2023 Q2.

8.1.2. Control de calidad de los materiales

Los materiales que serán utilizados para la cadena de medidas, se han seleccionado conforme las especificaciones y recomendaciones de los fabricantes. Cada uno de los materiales dispone de su certificación de calidad, avalando el cumplimiento de los estándares establecidos. Para asegurar la calidad de estos materiales se han llevado a cabo los siguientes pasos:

1. Verificación de certificaciones. Se han leído y revisado detenidamente los documentos proporcionados por los fabricantes, para verificar las especificaciones técnicas y comprobar que los estándares son adecuados para el propósito de este sistema de medición de vibraciones.

2. Inspección visual. Se ha realizado una inspección visual de los materiales para detectar daños o alguna anomalía que pudiera afectar a su rendimiento.
3. Compatibilidad. Se ha verificado la compatibilidad entre los distintos componentes del sistema. Se ha comprobado que los materiales pueden trabajar conjuntamente sin problema alguno.

8.1.3. Condiciones de la validación de la aplicación

Se considerará que la aplicación cumple con su función si puede realizar las siguientes acciones:

1. Configuración de los dispositivos y ensayos. Se comprobará que los dispositivos sean reconocidos adecuadamente por el programa y que se puedan configurar los parámetros de adquisición de cada canal. Además, se evaluará que los editables de la aplicación funcionen correctamente, permitiendo a los usuarios ingresar los valores adecuados para cada configuración de ensayos.
2. Retroalimentación en tiempo real. La aplicación deberá mostrar en tiempo real las señales proporcionadas por la excitación y la respuesta.
3. Promediar mediciones. Se asegurará que el programa permita realizar distintas mediciones para poder promediar los datos.
4. Representación de FRFs y coherencia. La aplicación mostrará gráficamente las funciones receptancia, inercia y movilidad, así como la coherencia de cada medición.
5. Guardar datos. Se podrán almacenar los resultados obtenidos para ser utilizados por la aplicación en cualquier momento.

8.1.4. Control de calidad de la aplicación

Para considerar el funcionamiento de la aplicación como válido se seguirán los pasos siguientes:

1. El programa quedará parcialmente validado si, tras ser utilizado sobre una viga de aleación de aluminio 7075-T6, es posible identificar las frecuencias naturales de los 5 primeros modos de vibración a flexión con un error menor al 5% respecto a los resultados analíticos.

2. El programa quedará completamente validado tras repetir el paso anterior en al menos en tres ensayos distintos.

8.1.5. Condiciones de entrega

La aplicación de MATLAB y el manual de usuario del montaje en formato pdf se comprimirán en un archivo ZIP, que será entregado en una memoria USB. Para descomprimir el archivo y acceder a la información será necesario introducir una contraseña pactada con el cliente.

8.1.6. Pruebas y ajustes finales

Para utilizar el *software* por primera vez, se deberán tener instalados los programas necesarios en las versiones indicadas. Además, se deberá realizar el montaje del *hardware* según lo indicado en el manual de usuario. Para corroborar si la implementación se ha realizado correctamente, se podrá replicar la validación de la aplicación según lo especificado en el control de calidad.

8.2. Condiciones facultativas

En esta sección se estipulan los derechos y obligaciones del proyectista.

8.2.1. Obligaciones y derechos del proyectista

Las obligaciones y derechos que el proyectista asume en este proyecto son los siguientes:

1. El proyectista debe entregar el sistema de medición de vibraciones dentro del plazo acordado en el contrato.
2. El proyectista asume la responsabilidad de garantizar la funcionalidad y calidad de la aplicación.
3. El proyectista tiene derecho a ser reconocido como el autor y creador de la aplicación.
4. El proyectista debe recibir la compensación económica acordada en el contrato.

Parte III.
Presupuesto

9. Desglose del presupuesto

El presupuesto es un elemento fundamental en la planificación de un TFG. En el contexto de este proyecto enfocado en la elaboración e implementación de un sistema de adquisición de vibraciones, el presupuesto abarca diversos componentes de costes que deben tenerse en cuenta. Se desglosarán los costes en diferentes grupos:

- Personal
- Material
- Licencias de *software*

9.1. Coste de personal

En la elaboración de este trabajo se han involucrado dos personas. En la Tabla 9.1 se detalla el nombre de cada una con su correspondiente categoría y salario asociado, así como la cantidad de horas trabajadas acorde a su participación.

En primer lugar aparece Alba Jiménez Balbastre como autora del TFG y por último Luis Baeza González, responsable de la supervisión del proyecto.

Nombre	Descripción	€/h	Horas	Subtotal
Alba Jiménez Balbastre	Ing. Técnico Aeroespacial	22	330	7 260 €
Luis Miguel Baeza González	Ingeniero Sénior	45	15	675 €
TOTAL:				7 935 €

Tabla 9.1: Coste del personal

A continuación se va a exponer con detalle el tiempo invertido en cada una de las actividades de la autora. En cuanto al tutor, todas sus horas corresponden con reuniones que se han llevado a cabo durante toda la realización del trabajo.

Actividad	Horas
Investigación bibliográfica	60
Reuniones	15
Diseño de la interfaz de la aplicación	30
Programación de la aplicación	90
Consulta de la documentación de MATLAB	10
Realización de ensayos con la aplicación	35
Redacción del proyecto	80
Revisión del proyecto	10
TOTAL:	330

Tabla 9.2: Desglose horario

9.2. Coste de material

Para llevar a cabo el proyecto han sido necesarios distintos materiales. Estos componentes a su vez se pueden subdividir en tres categorías: materiales utilizados para llevar a cabo la elaboración del sistema de adquisición, los utilizados para su implementación y finalmente materiales utilizados para su validación.

Código	Descripción del código
ME	Material utilizado para la elaboración del sistema de medición
MI	Material utilizado para la implementación del sistema de medición
MV	Material utilizado para la validación del sistema de medición

Tabla 9.3: Códigos según las diferentes categorías de los materiales

En la Tabla 9.4 se indican los costes relacionados con el uso de equipos informáticos. Para estos costes se va a tener en cuenta el periodo de amortización y el tiempo de uso, ambos indicados en meses.

ME	Precio	Periodo de amort.	Tiempo de uso	Subtotal
Portátil MSI	1 124.72 €	72	6	93.73 €
Ratón Logitech	24.25 €	72	6	2.02 €
TOTAL:				95.75 €

Tabla 9.4: Coste del material para elaborar el sistema de medición

En cuanto al ordenador portátil, cabe destacar que el precio del PC incluye también el coste de la licencia de Windows instalada.

Por otro lado, tras desarrollar el programa se construye la Tabla 9.5 donde aparecen todos los elementos que forman parte del montaje del sistema de medida.

MI	Descripción
4533-B-001	Acelerómetro
PCB 086D05	Martillo instrumentado
NI cDAQ-9174	Chasis NI CompactDAQ
PCB 003C10	Cable BNC-coaxial (acelerómetro)
PCB 012A03	Cable BNC-BNC (martillo)
HP 100614-009	Cable de alimentación IEC
NI 780534-01	Cable USB 2.0 (tipo tornillo)

Tabla 9.5: Breve descripción del material para la implementación del sistema de medición

El coste asociado a estos elementos se muestra en la Tabla 9.6. Tanto el periodo de amortización como el tiempo de uso vienen indicado en meses.

MI	Precio	Periodo de amort.	Tiempo de uso	Subtotal
4533-B-001	540.75 €	120	6	27.04 €
PCB 086D05	789.17 €	120	6	39.46 €
NI cDAQ-9174	1 514.00 €	120	6	75.70 €
PCB 003C10	52.92 €	72	6	4.41 €
PCB 012A03	34.62 €	72	6	2.89 €
HP 100614-009	23.50 €	72	6	1.96 €
NI 780534-01	49.00 €	72	6	4.08 €
TOTAL:				155.54 €

Tabla 9.6: Coste del material para la implementación del sistema de medición

Conviene resaltar que, con la compra del chasis ya viene incluida la fuente de alimentación, por lo que solamente es necesario añadir como accesorios los cables de alimentación y USB. Además, también con la compra del martillo instrumentado se proporcionan el resto de accesorios utilizados: extensión de masa y distintas puntas.

Finalmente, para comprobar el funcionamiento del programa se realizaron ensayos, cuyos materiales se detallan en la Tabla 9.7. Estos materiales se consideran fungibles y no se tendrá en consideración su amortización.

MV	Descripción	Cantidad	Coste/u	Subtotal
Viga	Aluminio aleación zinc 7075 T6	1	4.50 €	4.50 €
Esponja	Esponja de poliuretano	2	0.65 €	1.30 €
Cera	Cera de montaje	1	15.95 €	15.95 €
Destornillador	Punta plana y 1.8 mm	1	1.09 €	1.09 €
TOTAL:				22.84 €

Tabla 9.7: Coste del material para la validación del sistema de medición

Por último en la Tabla 9.8 se suma la contribución de cada una de las partes para hallar el coste del material total.

Descripción	Subtotal
ME	95.75 €
MI	155.54 €
MV	22.84 €
TOTAL:	274.13 €

Tabla 9.8: Coste del material total

9.3. Coste de licencias de *software*

Para la realización de este TFG se ha empleado el programa MATLAB (versión R2022b) para la programación del *software* desarrollado en el entorno interactivo App Designer. El precio de la licencia incluye el acceso a todas las Toolboxes, por lo que no se incluye en la Tabla 9.9 un precio adicional por el uso del paquete Data Acquisition Toolbox.

Para poder instalar los controladores necesarios para trabajar con el chasis, es necesario instalar el programa gratuito NI Package Manager (versión 2023 Q2), encargado de administrar y organizar todo el *software* de National Instruments.

Finalmente, la redacción del texto se ha utilizado Overleaf, una plataforma en línea basada en LaTeX. En un principio el plan gratuito ofertado por Overleaf era suficiente, pero terminando la redacción fue necesario añadir una licencia de estudiante mensual para poder compilar el trabajo.

Licencias de <i>software</i>	Precio anual	Tiempo de uso	Subtotal
MATLAB	250 €	6	125 €
NI Package Manager	0 €	6	0 €
Overleaf	96 €	1	8 €
TOTAL:			133 €

Tabla 9.9: Coste de las licencias de *software*

10. Coste total del proyecto

Finalmente se muestra el coste total del proyecto sumando la contribución de cada una de las partes en la Tabla 10.1. Se ha añadido un aumento del 21% de IVA según indica la ley 37/1992, de 28 de diciembre del Impuesto sobre el Valor Añadido [20].

Descripción	Total bruto	IVA 21%	Total
Personal	7 935 €	1 666.35 €	9 601.35 €
Material	274.13 €	57.57 €	331.70 €
Licencias de <i>software</i>	133 €	27.93 €	160.93 €
TOTAL:			10 093.98 €

Tabla 10.1: Coste total del proyecto

El presupuesto final del proyecto es de **diez mil noventa y tres euros con noventa y ocho céntimos**.

Parte IV.

Anexos a la memoria

A. Manual del usuario

En la Figura A.1 se muestra la cadena de medidas completa utilizada para la validación del programa. A continuación se explicará paso por paso cómo conectar todos los elementos.

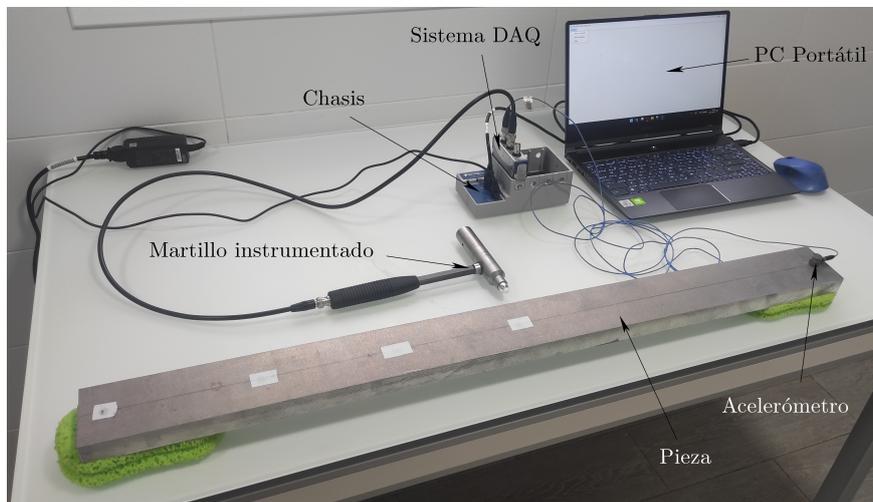


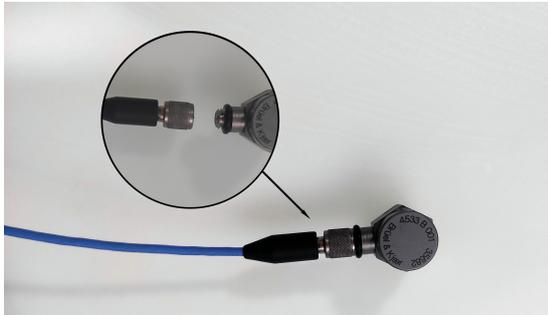
Figura A.1: Montaje general para la validación

A.1. Respuesta

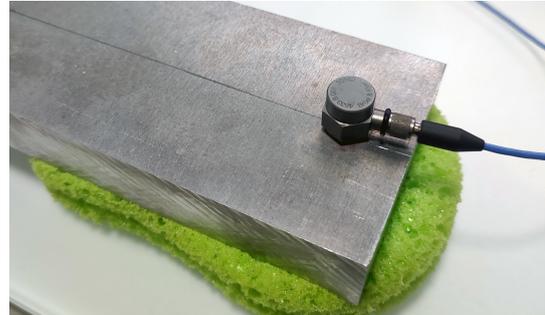
Para obtener la señal de respuesta son necesarios dos pasos. En primer lugar, el acelerómetro debe estar conectado a la tarjeta o sistema de adquisición. En este caso, para ello es necesario un cable con una conexión BNC que se unirá al sistema DAQ, y una salida con conexión coaxial, que se enrosca en el acelerómetro, según la Figura A.2.

En este caso, para la validación del programa, se ha optado por una capa de cera de montaje para fijar el acelerómetro en su posición, evitando la necesidad de utilizar un perno roscado y agujerear la superficie de montaje.

Por tanto, la utilización de cera resulta más que suficiente y ofrece mayor comodidad al tener que cambiar de posición el instrumento. Hay que colocar la cera con cuidado evitando que se despegue y poner solamente la cantidad necesaria.



(a) Conexión del acelerómetro



(b) Fijación del acelerómetro

Figura A.2: Montaje y fijación del acelerómetro en la pieza de validación

A.2. Excitación

Para preparar el martillo instrumentado que proporcionará la señal de excitación son necesarios distintos pasos. Por una parte, se necesita un cable con dos conexiones BNC. Una de ellas se unirá al martillo como muestra la Figura A.3. Para ello, primero se inserta y posteriormente se enrosca de forma que no se pueda desconectar fácilmente.



Figura A.3: Montaje del martillo instrumentado

Además, en este caso se ha utilizado una extensión de masa y una punta de plástico blanco. Ambos elementos se conectan enroscándose conforme se muestra detallado en la imagen. En los puntos de excitación donde se va a medir se ha optado por colocar cinta aislante. Esto mejora el acoplamiento y permite obtener una superficie más suave y uniforme en el caso de existir pequeñas irregularidades en la pieza.

A.3. Sistema DAQ

Una vez conectados los cables a los sensores, se deben unir a la tarjeta de adquisición. Según la Figura A.4, se une el acelerómetro al canal ai0 y el martillo instrumentado al canal ai1, ambos mediante una conexión tipo BNC. No obstante, se debe tener en cuenta que esta posición puede variar, se fija por el usuario y no debe ser estrictamente así. En este caso se deberá indicar en la aplicación para que las medidas se tomen correctamente.

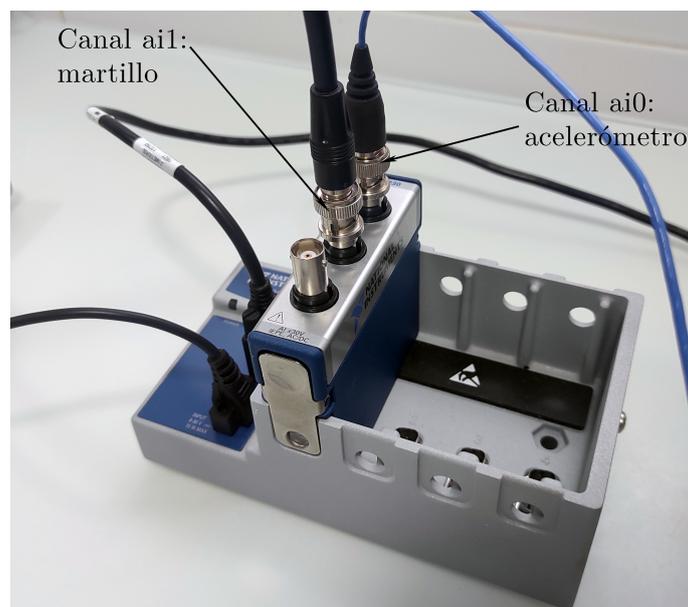


Figura A.4: Conexión de los canales del sistema DAQ

A.4. Chasis

Para terminar por completo de configurar el sistema de medida es necesario son necesarias dos conexiones adicionales. Por un lado, como se observa en la Figura A.5, un cable USB 2.0 se une al chasis mediante una conexión tipo tornillo, que permite enroscarse para quedar completamente fijo y evitar una desconexión indeseada. Finalmente, se conecta el

cable de alimentación, que va unido a la fuente de alimentación, a la toma de corriente.

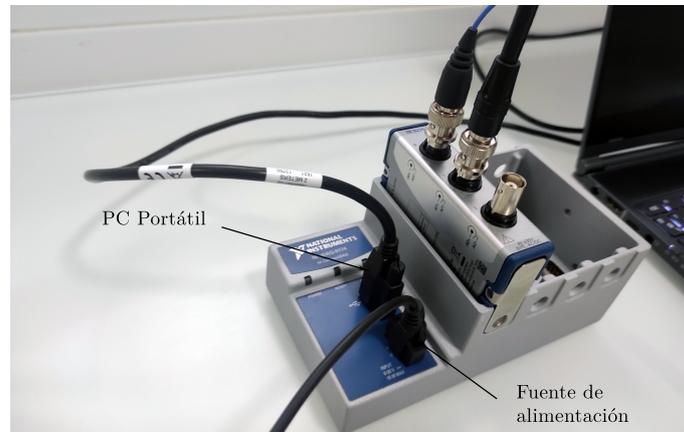


Figura A.5: Conexión del PC portátil y la fuente de alimentación con el sistema DAQ

Finalmente, para completar la conexión con el PC portátil, es necesario instalar el programa NI Package Manager, centro de acceso de National Instruments donde se organiza, descarga e instala todo el *software* proveniente de la misma compañía. Una vez descargado, se deben instalar el controlador llamado NI-DAQmx, que permite manejar todos los aspectos relacionados con el sistema DAQ instalado. En este caso se ha trabajado con la versión 2023 Q2.

B. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

En la Tabla B.1 se muestra el grado de relación de este TFG con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

ODS	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				X
ODS 3. Salud y bienestar		X		
ODS 4. Educación de calidad		X		
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante		X		
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico			X	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades			X	
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				X
ODS 12. Producción y consumo responsables			X	
ODS 13. Acción por el clima			X	
ODS 14. Vida submarina				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				X

Tabla B.1: Grado de relación del trabajo con los ODS