

TESIS DE LA UNIVERSIDAD
DE ZARAGOZA

2024

186

Fernando Arranz Martinez

Contribuciones al análisis de vibraciones y modelado 3D del telescopio JAST80

Director/es

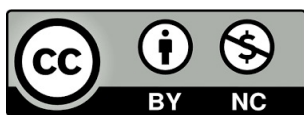
Palacios Navarro, Guillermo
Ramos Lorente, Pedro

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

ISSN 2254-7606



Premsas de la Universidad
Universidad Zaragoza



Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

CONTRIBUCIONES AL ANÁLISIS DE
VIBRACIONES Y MODELADO 3D DEL
TELESCOPIO JAST80

Autor

Fernando Arranz Martinez

Director/es

Palacios Navarro, Guillermo
Ramos Lorente, Pedro

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Ingeniería Electrónica

2024



Universidad
Zaragoza

TESIS DOCTORAL

Contribuciones al análisis de vibraciones y modelado 3D del telescopio JAST80

Autor

Fernando Arranz Martínez

Directores

Pedro Ramos Lorente

Guillermo Palacios Navarro

Programa de Doctorado de Ingeniería Electrónica
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

2023

A Álvaro y Mónica

Agradecimientos

Sergio Rueda
Héctor Artigas CEFCA
Javier Cenarro
Inmaculada Plaza OAJ
Javier Abad Miriam Royo
Antonio Marín
Axel Yanes-Díaz
Guillermo Palacios
Samuel Bielsa
Raúl Martín
Fernando Rueda
Mónica Rubira
Pedro Ramos
Jesús Acero
Guillermo López

Resumen

La presente tesis doctoral tiene como objetivo fundamental el estudio de las vibraciones en el telescopio JAST80 del Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ), así como el desarrollo de un modelo tridimensional simplificado de la montura del telescopio para caracterizar su comportamiento dinámico. Este telescopio está ubicado en el Pico del Buitre (Teruel) y se distingue por su montura ecuatorial-alemana y un espejo primario de 80 cm. Las características técnicas únicas de esta infraestructura lo hacen sobresalir a nivel mundial.

Las vibraciones en telescopios profesionales son motivo de preocupación para los ingenieros y astrónomos debido a su capacidad para degradar la calidad de imagen. Éste es un factor crítico, ya que las investigaciones astronómicas dependen de la capacidad de los telescopios para proporcionar imágenes precisas y detalladas del universo. Las vibraciones generan movimientos indeseados en la instrumentación, que pueden ser generadas por los actuadores, sistemas auxiliares y factores externos. Estas vibraciones degradan la calidad de imagen y reducen la cantidad de información útil para los astrónomos. Por lo tanto, es esencial abordar de manera efectiva y continua la mitigación de las vibraciones para maximizar el rendimiento de los telescopios y alcanzar los objetivos de investigación del proyecto del observatorio.

En este trabajo, se presenta inicialmente una revisión de la problemática de las vibraciones y sus consecuencias en la calidad de la imagen, incluyendo los fenómenos que provocan tales vibraciones. Además, se describen las técnicas más empleadas para la medida y atenuación de las vibraciones, así como los rangos frecuenciales característicos que pueden afectar significativamente a la instrumentación de los telescopios. Esta instrumentación es el equipamiento más sensible del telescopio, presentando límites máximos de aceleración que no deben excederse para un garantizar un correcto funcionamiento sin daños aparentes.

A continuación, se propone un modelo tridimensional (3D) simplificado de la montura del telescopio, ajustado con precisión al comportamiento del modelo real. Este modelo permite obtener los modos y las frecuencias naturales de la montura del telescopio en respuesta a una carga externa simulada. Para ello se genera un modelo de elementos finitos (FEM, Finite Elements Model) y se somete a un análisis de elementos finitos (FEA, Finite Elements Analysis) para su validación. La validación implica la comparación de las frecuencias de las señales captadas por un conjunto de acelerómetros instalados en la instrumentación del JAST80 y las frecuencias naturales de la montura, calculadas a partir del FEA.

El impacto de las vibraciones en la calidad de imagen se aborda mediante mediciones de aceleración realizadas en la instrumentación del telescopio JAST80. Para ello, se desarrolla un sistema para monitorizar en tiempo real el desplazamiento que se produce en el dispositivo de carga acoplada (CCD, Charge-Coupled Device) de la instrumentación debido a la vibración. Este sistema también identifica las frecuencias que son susceptibles de superar los límites establecidos. Este enfoque sienta las bases para el diseño de un sistema automatizado para la detección de imágenes no válidas y optimiza el procesamiento posterior de las mismas.

Abstract

The fundamental objective of this doctoral thesis is the study of vibrations in the JAST80 telescope at the Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ), as well as the development of a simplified three-dimensional model of the telescope mount to characterize its dynamic behavior. This telescope is located at Pico del Buitre (Teruel) and has a German-equatorial mount and an 80 cm primary mirror. The unique technical characteristics of this infrastructure make it stand out worldwide.

Vibrations in professional telescopes are of concern to engineers and astronomers due to their ability to degrade image quality. This is a critical factor, since astronomical research depends on the ability of telescopes to provide accurate and detailed images of the universe. Vibrations generate unwanted movements in the instrumentation, which can be generated by actuators, auxiliary systems and external factors. These vibrations degrade image quality and reduce the amount of information useful to astronomers. Therefore, it is essential to effectively and continuously address vibration mitigation to maximize the performance of the telescopes and achieve the research objectives of the observatory project.

In this work, a review of the problem of vibrations and their consequences on image quality is initially presented, including the phenomena that cause such vibrations. The most commonly used techniques for measuring and attenuating vibrations are also described, as well as the characteristic frequency ranges that can significantly affect the instrumentation of telescopes. This instrumentation is the most sensitive equipment of the telescope, presenting maximum acceleration limits that must not be exceeded to guarantee correct operation without apparent damage.

Next, a simplified three-dimensional (3D) model of the telescope mount is proposed, precisely adjusted to the behavior of the real model. This model allows obtaining the natural modes and frequencies of the telescope mount in response to a simulated external load. To do this, a finite element model (FEM) is generated and it is subjected to a finite element analysis (FEA) for validation. Validation involves the comparison of the frequencies of the signals captured by a set of accelerometers installed in the JAST80 instrumentation and the natural frequencies of the mount, calculated from the FEA.

The impact of vibrations on image quality is addressed through acceleration measurements performed on the JAST80 telescope instrumentation. To this end, a system is developed to monitor in real time the displacement that occurs in the charge-coupled device (CCD) of the instrumentation due to vibration. This system also identifies the frequencies that are likely to exceed the established limits. This approach lays the foundation for the design of an automated system for the detection of invalid images and optimizes their subsequent processing.

Índice

Listado de Figuras	IX
Listado de Tablas	XIII
Acrónimos	XV
Capítulo 1	1
1. <i>Introducción</i>	3
1.1 Contexto y motivación	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Listado de publicaciones	6
1.4 Estructura	6
Capítulo 2	9
2. <i>Revisión del estado del arte</i>	11
2.1 Calidad de imagen	11
2.2 Vibraciones en grandes estructuras	12
2.3 Vibración en telescopios	13
2.3.1 Fenómenos naturales	13
2.3.2 Fenómenos artificiales	14
2.3.3 Presupuesto de vibraciones	15
2.4 Mitigación de vibraciones en telescopios	16
2.5 Métodos y tecnologías de medición de vibraciones	18
2.5.1 Rango frecuencial	19
2.5.2 Métodos de medición de vibraciones	19
2.5.3 Tecnologías de medición de vibraciones	20
2.6 Entornos experimentales	20
2.7 Ubicación de telescopios	20
Capítulo 3	23
3. <i>Telescopio JAST80 y entorno de trabajo</i>	25
3.1 Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ)	25
3.2 Objetivos de explotación	26
3.3 Configuración	26
3.4 Instrumentación de observación	28
3.5 Montura del telescopio	28
3.6 Movimientos del telescopio	30
3.7 Entorno de trabajo en el telescopio JAST80	30
3.8 Transmisión vía telemática	31
Capítulo 4	33
4. <i>Materiales, métodos y experimentos iniciales</i>	35
4.1 Materiales: descripción del equipamiento	35
4.1.1 Instrumentación de medida	35
4.1.2 Entorno controlado	38
4.2 Métodos: Herramientas software	39
4.2.1 NI MAX. Configuración y visualización del equipo remoto	39
4.2.2 Adquisición y procesado de señales. Matlab	40
4.2.3 Generación modelo 3D, FEM y FEA. SolidWorks	41
4.3 Fundamentos teóricos	41
4.3.1 Herramientas de análisis frecuencial	41
4.3.2 Enventanado de la FFT	43
4.3.3 Short Time Fourier Transform	46
Capítulo 5	51
5. <i>Análisis de la vibración en los dominios temporal y frecuencial</i>	53
5.1 Movimientos y pruebas en el telescopio JAST80	53
5.2 Análisis en el dominio del tiempo	54
5.3 Análisis en el dominio frecuencial	58
5.4 Discusión	61

Capítulo 6	63
6. <i>Modelado 3D y frecuencias naturales de la montura</i>	65
6.1 Modelado 3D del telescopio JAST80 del OAJ.....	65
6.2 Discusión.....	71
Capítulo 7	73
7. <i>Análisis espectral de las señales y validación del modelo 3D</i>	75
7.1 Frecuencias naturales en telescopios.....	75
7.2 Estrategia de medida de vibración en modo libre y validación del modelo 3D.....	76
7.3 Discusión.....	82
7.3.1 Análisis espectral.....	82
7.3.2 Resultados del FEA frente al análisis espectral. Validación del modelo 3D simplificado.....	82
7.3.3 Análisis de movimientos en operación normal.....	83
Capítulo 8	85
8. <i>Estudio de la firma de vibración en la instrumentación</i>	87
8.1 Determinación de límites de aceleración y sus correspondientes desplazamientos	87
8.2 Desviación de las aceleraciones medidas en la instrumentación del telescopio JAST80	91
8.3 Experimentos para la eliminación de la CC.....	91
8.4 Resultados de experimentos	94
8.4.1 Filtrado de la CC.....	94
8.4.2 Enventanado de la señal en diferentes intervalos de tiempo.....	95
8.5 Discusión.....	96
Capítulo 9	97
9. <i>Conclusiones y líneas futuras de investigación</i>	99
9.1. Conclusiones.....	99
9.2. Líneas de investigación futuras.....	100
Bibliografía	103
Anexo I. Banco de pruebas	113

Listado de Figuras

Figura 3.1. Mapa ubicación OAJ. Fuente [83]. Vista desde el espacio del OAJ. Fuente [83].	25
Figura 3.2. Vista general del OAJ. Fuente [84].	25
Figura 3.3. Telescopio JAST80. Fuente: [84].	26
Figura 3.4. Configuración óptica Ritchey-Chrétien del telescopio JAST80, plano focal Cassegrain y corrector de campo. Fuente: Fuente propia.	27
Figura 3.5. Fotografía del espejo primario M1. Fuente: [84].	27
Figura 3.6. Óptica adaptativa mediante hexápodo para el espejo M2 del telescopio JAST80. Izquierda, imagen del espejo secundario del telescopio JAST80 [84]. Derecha, hexápodo. Fuente: [84].	27
Figura 3.7. a) Imagen de la instrumentación T80Cam. b) Ópticas de corrección de campo. c) Imagen de una rueda de filtros del FSU. Fuente: [84].	28
Figura 3.8. Telescopio JAST80, cúpula y pilar. Descripción de la estructura y movimientos.	29
Figura 3.9. Detalle del telescopio JAST80 y los tres acelerómetros.	30
Figura 3.10. Detalle del telescopio JAST80, la cámara T80Cam, filtros, acelerómetros y equipo de adquisición de datos.	31
Figura 3.11. Esquema de comunicación entre OAJ - CECA y un laboratorio remoto.	31
Figura 4.1. Imagen del acelerómetro Wilcoxon 731A y esquema de cotas.	36
Figura 4.2. Imagen de la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ.	37
Figura 4.3. Imagen del chasis NI-cDAQ9184.	37
Figura 4.4. Imagen del generador de ondas y amplificador e imagen del sistema del equipamiento de producción de vibraciones controladas.	38
Figura 4.5. Sistema de ensayos en laboratorio CAR.	39
Figura 4.6. Imagen de la aplicación NI MAX. Pantalla de configuración de equipamiento.	40
Figura 4.7. Imagen del software NI MAX con la representación de las señales adquiridas en tiempo real.	40
Figura 4.8. Parte superior (dominio del tiempo): Representación de la Ecuación 4. Parte inferior (dominio de la frecuencia): Representación de la Ecuación 5 en azul y representación de la ecuación 3 en rojo.	42
Figura 4.9. Efecto de la longitud de una ventana rectangular.	44
Figura 4.10. Representación en el dominio del tiempo de las ventanas rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman.	45
Figura 4.11. Representación en el dominio de la frecuencia de las ventanas rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman.	45
Figura 4.12. STFT de la señal $x(t) = 1 + \cos(2\pi 3.5t) + \cos(2\pi 5t) + \cos(2\pi 10t) + \cos(2\pi 12.5t)$.	47
Figura 4.13. STFT de la señal $x(t) = 1 + 2 \cos(2\pi 3.5t) + 4 \cos(2\pi 5t) + 8 \cos(2\pi 10t) + 16 \cos(2\pi 12.5t)$.	47
Figura 4.14. STFT de la señal $x(t) = k t (1 + \cos(2\pi 7t) + 2 \cos(2\pi 10t) + 3 \cos(2\pi 20t) + 4 \cos(2\pi 25t))$.	48
Figura 4.15. STFT de la señal $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con ventana rectangular.	48
Figura 4.16. STFT de la señal $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con ventana Hanning.	49
Figura 4.17. STFT de la señal $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con ventana Blackman.	49
Figura 5.1. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en DEC de 0° a 40° y AR en 0°. Correspondiente a Prueba 2 del Anexo I.	54
Figura 5.2. Fases del movimiento en DEC de 0° a 40° y AR en 0°. Correspondiente a Prueba 2 del Anexo I.	55
Figura 5.3. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a -40° y DEC en 40°. Correspondiente a Prueba 5 del Anexo I.	55
Figura 5.4. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40° con parada inesperada por emergencia. Correspondiente a Prueba 3 del Anexo I.	56
Figura 5.5. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a 40° y DEC en 40° con parada inesperada por emergencia. Correspondiente a Prueba 3 del Anexo I.	57
Figura 5.6. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40° con parada inesperada por emergencia. Correspondiente a Prueba 12 del Anexo I.	57
Figura 5.7. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR en 0° y DEC 0° a 40°. Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 2 del Anexo I.	58

Figura 5.8. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a -40° y DEC en 40°. Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 5 del Anexo I.	59
Figura 5.9. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40°. Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 3 acelerómetro 1 del Anexo I.	59
Figura 5.10. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a 40° y DEC en 40°. Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 4 del Anexo I.	60
Figura 5.11. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40°. Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 12 del Anexo I.	60
Figura 6.1. Telescopio JAST80. A la izquierda modelo 3D, a la derecha fotografía.	65
Figura 6.2. Telescopio JAST80. Montura, telescopio y contrapesos.	66
Figura 6.3. Telescopio JAST80. Montura, ópticas y contrapesos.	66
Figura 6.4. Detalle de la brida 2B. A la izquierda el modelo 3D y a la derecha modelo simplificado.	67
Figura 6.5. Detalle de la brida 3B, contrapesos y barra de contrapesos. A la izquierda el modelo 3D y a la derecha modelo simplificado.	67
Figura 6.6. Telescopio JAST80. Materiales modelo 3D.	67
Figura 6.7. Telescopio JAST80. Mallado 2 con 14868 elementos y 7554 nodos.	70
Figura 6.8. Gráficos de deformación de la montura del telescopio JAST80 según el modo de frecuencia con un módulo elástico similar al del acero.	71
Figura 7.1. Señal 1. Parte superior, dominio temporal; $Lw = 5$ s. Parte inferior, dominio frecuencial: espectro del segmento de señal. Ventana rectangular; ancho de banda visualizado Bw de 0 a 60 Hz.	77
Figura 7.2. Señal 1. Parte superior, dominio temporal; $Lw = 1$ s. Parte inferior, dominio frecuencial: espectro del segmento de señal. Ventana rectangular; ancho de banda visualizado Bw de 0 a 60 Hz.	77
Figura 7.3. Señal 1. Parte superior, dominio temporal; $Lw = 1$ s. Parte inferior, dominio frecuencial: espectro del segmento de señal. Ventanas rectangulares, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman; ancho de banda mostrado Bw de 0 a 60 Hz.	78
Figura 7.4. Señal 1. Parte superior: dominio temporal. Parte inferior: STFT de un segmento de señal de vibración. Ventana Blackman.	79
Figura 7.5. Señal 1. Parte superior, dominio temporal. Parte inferior, dominio de la frecuencia: Espectro de un segmento de señal utilizando detector de picos. Ventana Blackman; $Lw = 3$ s; Bw 0 a 60 Hz.	79
Figura 7.6. Señal 2. Parte superior: dominio temporal. Parte inferior: STFT de un segmento de señal de vibración. Ventana Blackman.	80
Figura 7.7. Señal 2. Parte superior, dominio temporal. Parte inferior, dominio de la frecuencia: Espectro de un segmento de señal utilizando detector de picos. Ventana Blackman; $Lw = 3$ s; Bw 0 a 60 Hz.	80
Figura 7.8. Prueba 5. Parte superior: dominio temporal. Parte inferior: STFT de un segmento de señal de vibración. Ventana Blackman.	81
Figura 7.9. Prueba 5. Parte superior, dominio temporal. Parte inferior, dominio de la frecuencia: Espectro de un segmento de señal utilizando detector de picos. Ventana Blackman; $Lw = 11$ s; Bw 0 a 60 Hz.	81
Figura 8.1. Detalle del tamaño del píxel y subpíxel.	87
Figura 8.2. Comparaciones de umbrales dadas por la Ecuación 24 y la Ecuación 25 para una señal $a_1(t) = A \cos(2\pi F_0 t)$, con $A = 0.04$ g y $F_0 = 39$ Hz. Las líneas rojas establecen el valor máximo de la aceleración (arriba) o su correspondiente desplazamiento (abajo).	90
Figura 8.3. Comparaciones de umbrales dadas por la Ecuación 24 y la Ecuación 25 para una señal multitono $a_2(t) = \sum_{k=1}^5 A_k \cos(2\pi F_k t)$. Las líneas rojas establecen el valor máximo de la aceleración (arriba) o su correspondiente desplazamiento (abajo).	90
Figura 8.4. Prueba 1. Efecto de eliminación de la CC.	91
Figura 8.5. Experimento A. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.	92
Figura 8.6. Experimento B. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.	93

Figura 8.7. Experimento C. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.....	93
Figura 8.8. Experimento D. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.	94
Figura 8.9. Efecto de eliminación de CC en una señal real DEC de 0° a 40° y AR 40°. La línea roja del gráfico establece el valor máximo del desplazamiento.	95
Figura 8.10. Seguimiento de un movimiento de tracking. Influencia de las ventanas en el análisis espectral. La línea roja indica el valor máximo de la aceleración y el desplazamiento, respectivamente.	96
Figura 10.1. Instalación para la adquisición de datos vía telemática hasta el laboratorio remoto.....	101
Figura 10.2. Conexión del circuito de fibra óptica desde los sensores hasta el interrogador y la salida de datos vía Ethernet.	101
Figura 10.3. A la izquierda representación de los ejes triaxiales bajo la JPCam. A la derecha montaje mecánico.	102

Listado de Tablas

Tabla 4.1. Características de los acelerómetros cedidos por el OAJ-CEFCA.....	35
Tabla 4.2. Características de la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ cedida por el OAJ-CEFCA.	36
Tabla 4.3. Características NI-cDAQ9184.....	37
Tabla 4.4. Parámetros configuración NI-cDAQ9184.....	39
Tabla 4.5. Características de las ventanas de longitud L	45
Tabla 5.1. Movimientos del Telescopio JAST80.....	53
Tabla 5.2. Resumen pruebas realizadas.	54
Tabla 6.1. Asignación de materiales a los elementos simplificados.....	68
Tabla 6.2. Masas de los elementos y origen.....	68
Tabla 6.3. Distancias de los elementos al CDG de la brida 3B.....	69
Tabla 6.4. Estudio de sensibilidad del mallado.....	69
Tabla 6.5. Valores de frecuencias naturales obtenidos de los 6 primeros modos con tres valores diferentes para el módulo de elasticidad de la brida 2B.	70
Tabla 6.6. Distribución de masas con módulo elástico $2 \cdot 10^{11}$ Pa.....	71
Tabla 7.1. Comparación de frecuencias naturales del análisis espectral y FEA.....	82
Tabla 8.1. Conjunto de experimentos destinados a eliminar la componente CC.....	92

Acrónimos

AO	<i>Adaptative Optics</i>
AOA	<i>Angle Optics of Arrival</i>
API	<i>Application Programming Interfaces</i>
AVC	<i>Adaptative Vibration Cancellation</i>
BTA	<i>Large Altazimuth Telescope</i>
CAR	<i>Control Activo del Ruido</i>
CC	<i>Corriente Continua</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CDG	<i>Centro de Gravedad</i>
CEFCA	<i>Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón</i>
CFHT	<i>Canadá-Francia-Hawaii Telescope</i>
CTIO	<i>Cerro Tololo Inter-American Observatory</i>
DEC	<i>Declinación</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DOB	<i>Disturbance Observer Based</i>
DTFT	<i>Discrete-Time Fourier Transform</i>
E-ELT	<i>European Extreme Large Telescope</i>
ELT	<i>Extreme Large Telescope</i>
ESA	<i>European Spacial Astronomy</i>
ESO	<i>European Southern Observatory</i>
EUPT	<i>Escuela Universitaria Politécnica de Teruel</i>
FEA	<i>Finite Elements Analysis</i>
FEM	<i>Finite Elements Model</i>
FE-BE	<i>Finite Element–Boundary Element</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSU	<i>Filter and Shutter Unit</i>
GDL	<i>Grados de libertad</i>
GMI	<i>Gemini Planet Imager</i>
GMT	<i>Giant Magellan Telescope</i>
GSMT	<i>Giant Segmented Mirror Telescope</i>
GST	<i>Gemini South Telescope</i>
ICTS	<i>Instalación Científico Técnico Singular</i>
ISS	<i>International Space Station</i>
J-PAS	<i>Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey</i>
J-PLUS	<i>Javalambre Photometric Local Universe Survey</i>
LBT	<i>Large Binocular Telescope</i>
LQG	<i>Linear-Quadratic-Gaussian</i>
NRT	<i>New Robotic Telescope</i>
OAJ	<i>Observatorio Astrofísico de Javalambre</i>
OPD	<i>Optical Pathway Difference</i>
PI	<i>Proportional-Integral</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
SCEXAO	<i>Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics</i>
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
S-PLUS	<i>South Photometric Local Universe Survey</i>

TC	<i>Tiempo de Cálculo</i>
TMT	<i>Thirty Meter Telescope</i>
UPAD	<i>Unidad de Procesado y Archivo de Datos</i>
VLST	<i>Very Large Space Telescope</i>
WFE	<i>Wavefront Error</i>
WHT	<i>William Herschel Telescope</i>

Introducción

1

1. Introducción

La exploración del universo a través de telescopios es el pilar fundamental de la astronomía desde hace siglos. Los avances en tecnología y óptica han permitido a los astrónomos observar el cosmos con una claridad y precisión cada vez mayores. Sin embargo, a pesar de estos avances, los telescopios profesionales aún enfrentan desafíos significativos que afectan su capacidad para proporcionar imágenes de alta calidad. Uno de estos desafíos cruciales es el control y la mitigación de las vibraciones, que pueden tener un impacto profundo en la calidad de las imágenes astronómicas.

La calidad de la imagen es crítica en la tarea de observación y análisis de objetos celestes a través de telescopios, ya que determina la capacidad de los astrónomos para estudiar y comprender el universo. Una imagen astronómica de alta calidad permite a los científicos observar detalles tenues y obtener datos precisos sobre la posición y la composición de objetos en el espacio. Esta calidad de la imagen es especialmente relevante en la observación de objetos astronómicos del universo profundo, como galaxias lejanas o agujeros negros. Por lo tanto, es esencial comprender cómo las vibraciones pueden afectar la calidad de la imagen en telescopios profesionales y cómo se pueden mitigar estos efectos.

Las vibraciones que llegan a la instrumentación pueden ser inducidas por fenómenos naturales, como el viento, o por causas artificiales, debidas a elementos que forman el telescopio. Los fenómenos naturales son impredecibles e incontrolables. Para reducir sus efectos, los ingenieros deben utilizar técnicas de mitigación basadas en algoritmos de control de óptica adaptativa. En cambio, las vibraciones producidas por fenómenos artificiales son predecibles. Ejemplos de estas últimas los encontramos en las vibraciones originadas por sistemas auxiliares como la refrigeración o los actuadores encargados del movimiento de posicionamiento y seguimiento del telescopio durante la observación.

Las vibraciones pueden ejercer un impacto negativo en la calidad de la imagen astronómica de diversas maneras. Uno de los efectos más notorios es el desenfoque. Cuando un telescopio está sometido a vibraciones, la imagen resultante puede aparecer borrosa o distorsionada, lo que dificulta la identificación y el estudio de objetos celestes. Este fenómeno se debe a que las vibraciones alteran la posición relativa de los componentes ópticos, como espejos y lentes, y provocan un desplazamiento que afecta la formación de la imagen.

La mitigación de las vibraciones en telescopios profesionales son áreas de investigación activas que involucran a astrónomos, ingenieros y físicos. Se han desarrollado diversas estrategias y tecnologías para abordar este desafío y preservar la calidad de la imagen. Uno de los enfoques clave es el aislamiento y la amortiguación de las vibraciones. Los telescopios se montan en plataformas aisladas de las estructuras que reducen la transferencia de vibraciones desde el suelo al instrumento junto con sistemas de absorción de vibración en puntos estratégicos. Por otro lado, se utilizan sistemas de control activo que pueden detectar las vibraciones en tiempo real y aplicar contramedidas, como ajustes en los espejos deformables o la reorientación del telescopio, para mantener la estabilidad. Por ejemplo, existen sensores de alta sensibilidad para la medida de vibraciones que pueden detectar incluso las vibraciones más pequeñas y activar sistemas de corrección en tiempo real para contrarrestarlas. Estos sistemas pueden incluir espejos deformables que se ajustan constantemente para mantener la forma correcta, sistemas de control activo de la cúpula y sistemas de amortiguación avanzados.

Las frecuencias naturales de la montura pueden ser determinadas utilizando diferentes técnicas como ensayos en la estructura o técnicas de simulación mediante modelos 3D. Cuando se ensaya directamente sobre la estructura, se instalan acelerómetros que miden las señales de vibración causadas por un martillo de impacto de laboratorio. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta técnica puede generar daños en telescopios ya instalados y en funcionamiento. Por el contrario, las técnicas de simulación utilizan modelos 3D debidamente tratados que permiten simular mediante FEA la respuesta de una estructura a una excitación externa. Esto es muy útil cuando los telescopios están a pleno funcionamiento o cuando llevan instalada la instrumentación. La técnica parte de un modelo 3D de la estructura que se reduce a un modelo simplificado del cual se obtiene el FEM y mediante una excitación simulada se obtienen mediante un FEA las frecuencias

naturales y los modos asociados. Estos modelos son muy útiles, ya que, una vez validados se pueden generar múltiples simulaciones con excitaciones externas para estudiar su comportamiento.

En resumen, las vibraciones representan un desafío significativo en la astronomía profesional, ya que pueden comprometer la calidad de las imágenes capturadas por telescopios profesionales. Es por eso que se hace necesario el desarrollo de tecnologías innovadoras y estrategias de mitigación cada vez más sofisticadas. Esta tesis pretende contribuir con herramientas de análisis de vibraciones que redunden en una mejor operativa del telescopio JAST80.

1.1 Contexto y motivación

El trabajo realizado en esta tesis se centra en la Instalación Científico Técnica Singular (ICTS) del Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ) y sus dependencias en Teruel en el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA). De la relación estrecha con el equipo de ingeniería surgió el realizar una investigación en alguno de los campos que más les preocupa. Debido a la alta tecnificación de sus instalaciones y la pionera instrumentación a nivel mundial se estudiaron diversos campos de trabajo relacionados con la calidad de imagen y la vibración.

Inicialmente, se planteó como una línea de investigación el estudio de las vibraciones producidas en el ascensor que transporta el espejo primario del telescopio JST250 hasta la campana de aluminizado en el sótano del edificio. El espejo primario, con un diámetro de 2.5 m, se deteriora por la deposición de partículas sobre su superficie al estar en contacto con el ambiente. Esto impide que los fotones se reflejen correctamente al espejo secundario, provocando desviaciones en su trayectoria. El aluminizado del espejo primario implica retirar la capa actual de aluminio y aplicar una nueva capa. Para ello, es necesario desmontar el espejo del telescopio y descenderlo hasta una sala en la base de la cúpula a través de un ascensor construido para tal fin. La tarea es crítica debido a la fragilidad del espejo ante cualquier impacto o aceleración, ya que movimientos bruscos en el ascensor pueden deformarlo o incluso romperlo, lo que conllevaría la pérdida de varios años de investigación científica. Un estudio preliminar concluyó que los accidentes eran poco probables debido a la supervisión de los movimientos durante el transporte.

En otra línea de investigación se planteó estudiar las vibraciones que se transmiten por el pilar del JST250 desde la cimentación hasta la montura del telescopio, aunque esta idea ya se trabajó en la investigación de S. François et al. [1], en cuyo estudio expusieron que la vibración del terreno afectó al comportamiento del pilar en las uniones con el terreno y el telescopio, observándose un desplazamiento en su primera frecuencia con respecto a los datos iniciales de su construcción.

Posteriormente, se realizó un experimento en la instrumentación JPCam del telescopio JST250 del OAJ para estudiar las señales de vibración. Para ello se invirtió en tecnología puntera basada en acelerómetros con tecnología de fibra óptica. Se realizó un análisis espectral de las señales y los datos mostraron que las amplitudes de la vibración estaban muy por debajo de los valores límite de la instrumentación. Además, el espectro frecuencial no mostraba frecuencias dominantes. Ante la no evidencia de resultados relevantes, se decidió plantear esta idea como línea futura de esta investigación.

Finalmente, se observó que eran escasas las investigaciones sobre vibración en la montura del telescopio JAST80. Este telescopio se utiliza de apoyo al cartografiado del universo del telescopio JST250 del OAJ. Tiene una montura ecuatorial-alemana, a diferencia de los grandes telescopios profesionales que suelen emplear monturas altazimutales. El JAST80 dispone de un telescopio gemelo instalado en el observatorio Inter-Americano de Cerro Tololo (CTIO, *Cerro Tololo Inter-American Observatory*) en Chile, lo que permite replicar experimentos en un entorno singular.

Durante una revisión bibliográfica sobre vibraciones en telescopios profesionales [2], se determinó que la elección del telescopio JAST80 era adecuada por su montura y singularidad. Sin embargo, en la bibliografía no se encontraron estudios relevantes acerca de la montura ecuatorial-alemana. Esta montura generalmente se asocia con espejos primarios pequeños, en contraste con el JAST80, que monta un espejo primario de 80 centímetros de diámetro, lo que lo convierte en un telescopio único en su clase.

En la literatura se encontraron estudios que relacionaban las frecuencias que excitaban al telescopio con las frecuencias naturales de la montura [3]. Experimentos realizados por diferentes investigadores mostraron que las vibraciones eran susceptibles de realizar desplazamientos en la CCD de la instrumentación. Se observó, de igual forma, que las componentes frecuenciales bajas eran las que más desplazamientos generaban en la instrumentación. Por este motivo se propuso un FEM a partir de un modelo 3D simplificado de la montura. El objetivo fue determinar las frecuencias naturales de la montura y si la montura era excitada en sus frecuencias de resonancia por la vibración [4]. La bibliografía avaló la propuesta con investigaciones de estructuras modeladas 3D para simulación a respuestas a fuerzas exteriores.

Por otro lado, se encontró que la cuantificación de las desviaciones en telescopios profesionales no estaba unificada. A pesar de que existen muchos estudios acerca de las desviaciones por vibración producidas en la imagen, cada equipo de investigadores expone sus resultados en unidades difícilmente equiparables. Por esta razón se planteó una cuantificación del desplazamiento [5] por unidades de medida en el Sistema Internacional (SI).

En este contexto, la presente investigación busca contribuir al desarrollo tecnológico y ofrecer soluciones al problema de la vibración en el telescopio JAST80. Las áreas de estudio propuestas incluyen la medición de vibraciones y desplazamientos en la instrumentación, así como la identificación de las frecuencias resonantes que afectan la estabilidad del telescopio. Para lograr esto se utilizará un FEM junto con el FEA, los cuales serán herramientas fundamentales en futuros experimentos.

1.2 Objetivos

Las metas de este trabajo de investigación se centran en el estudio de las vibraciones en el telescopio JAST80 del OAJ. Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

- Realizar una revisión exhaustiva de la bibliografía existente sobre las vibraciones en telescopios profesionales incluyendo las causas de pérdida de calidad de imagen, los métodos de mitigación y las frecuencias naturales de la montura. Se describirán las técnicas más empleadas para la medida de las vibraciones, así como los rangos frecuenciales característicos que más afectan a la instrumentación.
- Obtener los modos frecuenciales y las frecuencias naturales de la montura del telescopio a una respuesta externa simulada. Para ello, se diseñará un modelo 3D simplificado de la montura del telescopio generando un FEM y un FEA con diferentes materiales para obtener el modelo 3D simplificado que se ajuste más al modelo real.
- Validar el modelo 3D simplificado mediante una comparativa entre las señales captadas por los acelerómetros instalados en la instrumentación del JAST80 con las frecuencias naturales de la montura (calculadas a partir del FEA).
- Cuantificar el desplazamiento de la instrumentación producido por la vibración, estableciendo un valor máximo de desplazamiento a nivel de subpíxel e identificando las frecuencias que son susceptibles de superar los límites establecidos.

De las actividades realizadas para la consecución de los objetivos principales se desprenden los siguientes objetivos secundarios:

- Capturar y almacenar señales en puntos críticos de la instrumentación con la calidad suficiente para validar resultados experimentales. Las señales capturadas se someterán a un proceso de filtrado y análisis espectral que permita obtener resultados repetibles y fiables.
- Solventar las dificultades de acceso a las instalaciones mediante sistemas remotos de comunicación que permitan el acceso a los datos desde cualquier ubicación. Esto permitirá salvar las inclemencias meteorológicas y logísticas que requiere la investigación.
- Identificar las frecuencias de las señales de los acelerómetros más sobresalientes que permitan validar los resultados del FEA del modelo 3D simplificado en un movimiento con parada brusca por emergencia.

- Realizar un estudio de la firma de vibración del telescopio y determinar el rango frecuencial en el que las frecuencias tienen mayor influencia sobre la instrumentación.

1.3 Listado de publicaciones

Los resultados derivados de la tesis dieron lugar a las siguientes publicaciones:

F. Arranz, R. Martín, G. Palacios-Navarro, y P. Ramos, «*Study on the Vibration Characteristics of the Telescope T80 in the Javalambre Astrophysical Observatory (JAO) Aimed at Detecting Invalid Images*», *Sensors*, vol. 20, n.o 22, p. 6523, ene. 2020, doi: 10.3390/s20226523.

G. Palacios-Navarro, F. Arranz, R. Martín, y P. Ramos, «*Compensation Techniques Aimed at Mitigating Vibrations in Optical Ground-Based Telescopes: A Systematic Review*», *Sensors*, vol. 21, n.o 11, p. 3613, ene. 2021, doi: 10.3390/s21113613.

F. Arranz, J. Abad, P. Ramos, S. Bielsa, A. Yanes-Díaz, y G. Palacios-Navarro, «*On Identifying Natural Frequencies in the JAST80 Telescope and Validation With a Simplified 3-D Model*», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3246530.

1.4 Estructura

De acuerdo con los objetivos planteados, el contenido de este trabajo se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo 2. Este capítulo contextualiza la línea de investigación. Se presenta una revisión de las investigaciones realizadas en telescopios profesionales, incluyendo los fenómenos que originan vibraciones y sus consecuencias en la calidad de imagen. Se realiza una clasificación de su origen, técnicas de medición y métodos de mitigación de las mismas. Además, se muestran técnicas de ensayos en laboratorio y su extrapolación a telescopios reales en producción.

Capítulo 3. Este capítulo describe el telescopio JAST80 y su entorno de trabajo. Se detallan los elementos y características que lo forman, los movimientos de los actuadores de posicionamiento y seguimiento de cuerpos celestes y la ubicación de los acelerómetros utilizada en este trabajo para la medida de vibraciones. Por último, se expone el sistema de comunicación inalámbrica para una conexión remota con el equipo de adquisición de señales.

Capítulo 4. Este capítulo presenta la instrumentación utilizada para capturar las señales de vibración. Se describe también el entorno controlado de entrenamiento para optimizar el tiempo en el telescopio JAST80. Además, se presentan los fundamentos de las herramientas de procesamiento de señal que se utilizarán para el análisis de señales a lo largo de toda la tesis.

Capítulo 5. En este capítulo se identificarán las vibraciones producidas cuando los actuadores se activan en el movimiento de posicionamiento del telescopio, prestando especial atención a los movimientos más críticos de su operativa. Se parte de una serie de movimientos característicos para caracterizar las señales de vibración en los dominios temporal y frecuencial.

Capítulo 6. Este capítulo presenta un modelo tridimensional simplificado de la estructura de soporte (montura) del telescopio JAST80. A partir del modelo 3D, se genera un FEM y se simula mediante FEA una excitación en el actuador más crítico de generar vibraciones, con el fin de obtener los modos y frecuencias naturales que definen el comportamiento dinámico de la estructura. Las simulaciones realizadas con diferentes materiales permiten obtener un resultado que se aproxima al comportamiento real. Finalmente, el modelo se ajusta mediante un compromiso entre precisión de los resultados y coste computacional.

Capítulo 7. En este capítulo se valida el modelo 3D simplificado a partir de un movimiento libre por parada inesperada. Para ello, se comparan las señales captadas por los acelerómetros instalados en la instrumentación del JAST80 con las frecuencias naturales de la montura (calculadas a partir del FEA). Se analiza también la influencia de las vibraciones sobre la montura en modo de funcionamiento normal.

Capítulo 8. Este capítulo introduce el estudio de la firma de vibración en la instrumentación del telescopio JAST80, identificando el rango frecuencial más crítico en términos de desplazamiento de la CCD. Los resultados obtenidos sientan las bases para el desarrollo de un sistema automatizado de detección de imágenes afectadas por desplazamientos excesivos debido a la vibración, lo que las hace no válidas o de baja calidad.

Capítulo 9. Este capítulo resume las conclusiones del trabajo realizado junto con las líneas de investigación abiertas.

Revisión del estado del arte

2

2. Revisión del estado del arte

En esta revisión del estado del arte se expone el problema de las vibraciones en los telescopios profesionales. Se explican los fenómenos que las provocan, las consideraciones en el diseño y construcción de telescopios en cuanto a límites de vibraciones permitidas, así como los métodos y tecnologías tanto para la medida como para la atenuación de las mismas.

2.1 Calidad de imagen

La calidad de imagen en astronomía se refiere a la precisión y nivel de detalle que muestran las imágenes utilizadas para estudiar los objetos celestes. Un telescopio profesional está compuesto por una montura, espejos y un sistema de captación de fotones que permite representar la imagen del área seleccionada de observación del universo. Para obtener una alta calidad de imagen, es fundamental que tanto la montura como los actuadores estén al mismo nivel tecnológico que la instrumentación utilizada garantizando así la máxima precisión y resultados que el telescopio puede ofrecer en su conjunto.

Existen múltiples factores que influyen en la calidad de imagen en astronomía. Algunos de ellos son consecuencia de los ajustes entre las ópticas y la instrumentación, mientras que otros son causados por factores internos del propio telescopio, como las vibraciones y otros fenómenos naturales que pueden influir. Todos estos factores deben ser identificados, cuantificados y, a ser posible, tratar de mitigarlos durante la observación. A continuación, se presentan algunos de estos factores.

Aberraciones ópticas [6]. Son aquellas producidas por curvaturas en las ópticas que provocan la dispersión del haz de luz. Estas aberraciones pueden manifestarse de diferentes formas, como la distorsión de la forma de los objetos, la falta de nitidez, el desenfoque, la aparición de halos alrededor de los objetos o la aparición de colores no deseados en la imagen. Se distinguen diferentes tipos, como la aberración esférica, que ocurre cuando el haz de luz que pasa por diferentes lentes no está debidamente enfocado convergiendo en diferentes puntos. El resultado es una imagen borrosa o distorsionada. Por otro lado, la aberración cromática se debe a la dispersión de la luz en diferentes longitudes de onda al pasar a través de una lente, lo que resulta la aparición de colores no deseados alrededor de los objetos ya que los colores no se enfocan debidamente. La distorsión coma se caracteriza por la aparición de una forma de coma en la imagen, especialmente en los bordes, lo que da lugar a una distorsión en forma de su nombre. El astigmatismo provoca una falta de nitidez en las imágenes, debido a que el haz de luz no se enfoca correctamente en un solo punto, sino que se dispersa en diferentes direcciones.

Resolución [7]. La resolución se refiere a la cantidad de detalles que se pueden distinguir en una imagen. En astronomía se busca una alta resolución para captar los detalles más finos de los objetos celestes y distinguir objetos cercanos. La resolución de un telescopio se determina por varios factores, como, por ejemplo, el diámetro del telescopio. Cuanto mayor sea el diámetro del espejo del telescopio, mejor será su resolución, ya que captará más luz y podrá distinguir detalles más pequeños. Otro factor que influye es la calidad de la óptica. Ésta depende de la precisión de fabricación, el recubrimiento de los espejos y las correcciones de las aberraciones. La longitud de onda de la luz observada es otro factor. Además, la técnica de descomponer la imagen captada en diferentes longitudes de onda proporciona una imagen más completa y detallada. Por último, las condiciones atmosféricas, establecidas por la ubicación geográfica y la altitud en la que se construye el telescopio, pueden afectar la claridad de las observaciones causada por la turbulencia atmosférica.

Sensibilidad [8]. La sensibilidad se refiere a la capacidad de un telescopio para captar luz débil proveniente de objetos celestes. Para ello, se utiliza instrumentación altamente sensible que depende de varios factores. Uno de ellos es la eficiencia de detección, que se refiere a la capacidad del detector para convertir la luz en una señal eléctrica detectable. La sensibilidad también está relacionada con el ruido de fondo, o señales no deseadas y/o interferencias que pueden afectar la detección de las señales astronómicas. Un instrumento más sensible será capaz de distinguir mejor la señal del ruido de fondo, lo que permitirá detectar objetos más débiles o distantes. El ruido se debe a factores como la temperatura, la electrónica de la cámara y las condiciones atmosféricas [9], [10]. Para reducir el ruido, se utilizan técnicas como la refrigeración de la cámara

y el apilamiento de imágenes. La sensibilidad también está influenciada por la duración de la exposición. En muchos casos, los astrónomos realizan exposiciones más largas para aumentar la sensibilidad y captar señales muy débiles. Sin embargo, esto está limitado por otros factores, como el movimiento de los objetos celestes durante la exposición.

Calibración [11]. La calibración consiste en corregir imperfecciones de la imagen, como el viñeteo, el ruido de lectura y el desplazamiento del sensor para garantizar la precisión y la fiabilidad de los datos obtenidos por los instrumentos. Para ello se establece una relación entre las mediciones realizadas por la instrumentación y las magnitudes físicas reales de los objetos observados. Esto se logra utilizando objetos de referencia cuyas propiedades se conocen con precisión, como estrellas o fuentes de luz artificial con características bien definidas. Algunos de los aspectos de la calibración son:

Calibración de la respuesta instrumental: se realiza utilizando fuentes de luz conocidas para determinar cómo el instrumento responde a diferentes niveles de intensidad y longitudes de onda. Esto permite corregir cualquier distorsión o variación en la respuesta del instrumento.

Calibración fotométrica: se refiere a la determinación de la relación entre la intensidad de la luz recibida por el instrumento y la magnitud aparente de los objetos observados. Esto implica comparar las mediciones con estrellas de referencia cuyas magnitudes se conocen con precisión.

Calibración espectroscópica: se utiliza para determinar las longitudes de onda de las líneas espectrales del haz de luz y para corregir cualquier desplazamiento o distorsión en el espectro obtenido por el instrumento.

Vibración [12]. La vibración es la principal causa que genera desplazamientos no deseados en la instrumentación. Esto se debe a que las vibraciones se trasladan por toda la estructura llegando a elementos críticos del telescopio. Este fenómeno es más evidente en el grupo de los denominados grandes telescopios (ELT, *Extreme Large Telescope*) formado por el Telescopio de Treinta Metros (TMT, *Thirty Meter Telescope*), el Telescopio Gigante de Magallanes (GMT, *Giant Magellan Telescope*) y el Extremadamente Gran Telescopio Europeo (E-ELT, *European Extreme Large Telescope*). Las vibraciones se transmiten por todo el telescopio provocando desplazamientos en la instrumentación y en el conjunto de ópticas lo que hace que los fotones del haz de luz no lleguen siempre a los mismos píxeles. El resultado es una imagen borrosa con falta de nitidez.

2.2 Vibraciones en grandes estructuras

Las vibraciones son un fenómeno común en cualquier estructura de construcción, ya sea debido a su entorno o a la propia estructura. Estas vibraciones se transmiten a través de los materiales de construcción y pueden extenderse hasta donde su energía alcance. Todas las estructuras tienen frecuencias naturales que, si se excitan convenientemente, pueden amplificarse y llevar a un colapso la estructura. Por esta razón, es esencial detectar la vibración en grandes estructuras civiles como puentes [13], edificios [14] y vías ferroviarias subterráneas [15].

El control, supervisión y predicción del comportamiento de los puentes comienza con estudios en entornos controlados [16], en los que se realizan ensayos para verificar el comportamiento de la futura estructura en función de las condiciones ambientales medidas en la ubicación. En otras ocasiones, las estructuras llevan años construidas y son supervisadas continuamente. Un ejemplo es el estudio de A. M. Abdel-Ghaffar et al. [17], en el que supervisaron la estructura del puente Golden Gate. Determinaron las frecuencias de las perturbaciones generadas en el entorno que pudieran entrar en resonancia con la estructura. Algunas de las perturbaciones estudiadas fueron el viento y el terreno.

Los edificios también requieren monitorización a causa de las condiciones del entorno, como la fuerza del viento, el tráfico o infraestructuras subterráneas. Éstas pueden inducir vibraciones en el edificio y llevarlo a colapsar si entra en resonancia. En edificios antiguos, como el *Empire State Building* [18] se realiza una supervisión con ayuda de acelerómetros.

Otros ejemplos de supervisión de vibraciones son las vías ferroviarias subterráneas. Los autores J. Yang et al. [15] utilizaron las señales de los acelerómetros para estudiar y mitigar las vibraciones originadas por el paso del tren. Para absorber la vibración se implementó un sistema mediante muelles que disminuyen el nivel de vibración transmitido a través del terreno. Los resultados estuvieron por debajo de los límites permitidos

en el diseño. En esta línea, X. Tian et al. [19] midieron la vibración en diferentes puntos a lo largo de un túnel. Observaron que la vibración, al paso del tren, disminuía desde el punto origen a lo largo del eje de medición, Determinaron hasta que distancia alcanzaba la vibración a lo largo del túnel. Además, estudiaron la interacción de las frecuencias de la vibración con las frecuencias de resonancia de la infraestructura.

2.3 Vibración en telescopios

Los telescopios profesionales requieren una alta precisión en su instrumentación, por lo que es necesario supervisar las vibraciones durante su funcionamiento [20]–[24]. Es fundamental que el diseño y la puesta en servicio de los telescopios aseguren que los actuadores y el entorno no transmitan sus perturbaciones en forma de vibraciones a la instrumentación. Sin embargo, la instrumentación por sí sola no es capaz de mitigar las perturbaciones que afectan a la calidad de imagen, por lo que se requieren técnicas de mitigación implementadas en el telescopio y sus controladores. Para ello, se requiere conocer los fenómenos más sobresalientes que generan perturbación, entre los que se encuentran los fenómenos naturales y artificiales.

2.3.1 Fenómenos naturales

Los fenómenos naturales son eventos originados por las fuerzas de la naturaleza, los cuales no pueden ser controlados y a veces resultan impredecibles. Esto plantea un desafío para los ingenieros, ya que resulta difícil prever cuándo ocurrirán estas perturbaciones y cuál será su magnitud. Por lo tanto, es necesario realizar una caracterización exhaustiva del entorno antes de ejecutar la construcción del telescopio. Además, es requisito imprescindible llevar a cabo una supervisión y predicción constante. A continuación, se detallan algunos de los factores involucrados.

Un factor importante es la caracterización de la velocidad del viento en las diferentes capas atmosféricas (distribución vertical). Éste representa un parámetro a tener en cuenta en la elección de un emplazamiento de observación astronómica. Una atmósfera turbulenta e inestable introduce mayores aberraciones que una atmósfera estable y laminar. Este fenómeno se conoce como turbulencia óptica atmosférica y tiene su origen en las variaciones aleatorias del índice de refracción asociadas a la temperatura [25], [26]. Estas heterogeneidades se rigen por la teoría de A. N. Kolmogorov et al. [27], que establece que el fenómeno de las turbulencias afecta al frente de onda que deja de ser plano cuando llega al observador en tierra, limitando las capacidades de los telescopios terrestres [28]–[30].

La carga del viento es otro factor destacado que causa vibración en el telescopio cuando la cúpula está abierta. En el telescopio E-ELT, A. Tomas et al. [31] estudiaron las vibraciones en los espejos secundarios que dirigen los fotones capturados por el espejo primario hacia la instrumentación. Los autores estimaron que la desviación de los fotones producida por la vibración del viento sobre el telescopio alcanzaba aproximadamente 300 mili-arcosegundos con respecto al punto de observación. A ello se le suma el golpeteo inducido por el viento sobre la estructura. D. G. MacMynowski et al. [32] estudiaron el efecto del viento sobre el gran telescopio de espejos segmentados (GSMT, *Giant Segmented Mirror Telescope*). Observaron que el conjunto de espejos que forman el espejo primario vibraba a causa de la carga del viento. La frecuencia de la caracterización del viento influía en las frecuencias naturales de la estructura. En el diseño del telescopio se planifican sistemas de óptica adaptativa (AO, *Adaptive Optics*) [33] para mitigar las perturbaciones causadas por el viento. S. Tichkule et al. [34] estudiaron los efectos que producían las vibraciones del viento en telescopios. Observaron que en los espectros de turbulencia existían frecuencias dominantes que afectaban al ángulo de óptica de llegada (AOA, *Angle Optics of Arrival*) y al algoritmo de control que gestiona los movimientos del telescopio durante las observaciones.

Otro fenómeno natural es la actividad sísmica causada por el movimiento de las placas tectónicas o la actividad volcánica. Esto puede inducir una inclinación del suelo causando una desalineación de los componentes mecánicos y ópticos [35]. Además, los gases y las cenizas o el polvo asociado a la actividad volcánica pueden afectar a los sistemas de los telescopios de muchas maneras, como, por ejemplo, produciendo corrosión en los espejos, daños en los sistemas de control, dispositivos de transmisión de datos y en las monturas de los telescopios, entre otros.

En ocasiones, la interacción entre el pilar de sustentación del telescopio con el terreno puede alterar el comportamiento de la estructura. El pilar tiene asociadas frecuencias de naturales que pueden verse influidas

por la dinámica entre el suelo y el propio pilar [36]. S. François et al. [1] realizaron un análisis de esta interacción en el telescopio JST250 del OAJ. En su análisis encontraron que la primera frecuencia propia del pilar, sin tener en cuenta el tipo de anclaje al terreno, era de 14,3 Hz (alejada de la frecuencia de 10 Hz impuesta por el fabricante del telescopio). En un estudio mediante un modelo de elementos finitos-elementos límite (FE-BE, *Finite Element–Boundary Element*) calcularon, una vez optimizado el modelo, que la frecuencia de resonancia en la interacción entre suelo-estructura bajaba el primer modo frecuencial hasta los 11,7 Hz. Concluyeron que el tipo de anclaje del pilar al terreno tiene un efecto menor sobre las frecuencias de resonancia que la propia flexibilidad del pilar. En esta línea, D. Adams et al. [12] utilizaron el pilar de sustentación y la estructura de cimentación del TMT como elemento pasivo para la mitigación de vibraciones provenientes del terreno.

2.3.2 Fenómenos artificiales

Las vibraciones que se producen en el telescopio son la perturbación que más preocupa a los ingenieros por encima de la turbulencia atmosférica [37]. Los fenómenos artificiales son perturbaciones que se originan por elementos utilizados para la operativa del telescopio [12]. Estas perturbaciones son predecibles, ya que ocurren cuando los sistemas auxiliares están en funcionamiento. Esto permite caracterizar las vibraciones de forma individual para ajustarse a los límites de vibración por sectores establecidos en el presupuesto de vibraciones. Además, se pueden emplear técnicas de mitigación individuales que se suman a las técnicas de mitigación globales del telescopio.

Algunos ejemplos de fuentes de perturbación por fenómenos artificiales los encontramos en el trabajo de D. Adams et al. [12] en su estudio de los tres grandes ELT. En el telescopio GMT se observó que el enfriador criogénico empleado para la instrumentación transmitía vibración desde una sala independiente al telescopio. Las tuberías sirvieron de medio transmisor aportando, además, vibración por la turbulencia generada por el refrigerante que circulaba por ellas. Los ingenieros ensayaron con diferentes crioenfriadores para determinar cuál era el más idóneo según su respuesta en frecuencia de la vibración. Utilizaron una instrumentación compuesta por 12 acelerómetros sismológicos distribuidos por el equipo. Para realizar los ensayos emplearon una mesa óptica con aislamiento de vibración. Observaron que las frecuencias de la vibración determinadas mediante el análisis de la densidad espectral de potencia (PSD, *Power Spectral Density*) estaban en el rango alto de frecuencias que afectan al telescopio, considerado el rango alto en el entorno de los 100 Hz. Como solución a la mitigación de vibración, se propuso aplicar técnicas pasivas aplicadas sobre el crioenfriador que fueron ensayadas en laboratorio. Con respecto al telescopio GMT, se identificó la necesidad de ventilar el mosaico de espejos que conforman el espejo principal M1, para rebajar la temperatura. Durante las mediciones se observó que según a la velocidad a la que el ventilador giraba se transmitía vibración al conjunto de espejos generando perturbaciones sobre su superficie. Para abordar este problema, se llevaron a cabo ensayos con los ventiladores variando su velocidad de funcionamiento. El objetivo fue alejar las frecuencias de vibración generadas por el aire y los motores de los rangos críticos de frecuencias del telescopio, al mismo tiempo que se garantizaba una ventilación adecuada en los sistemas de posicionamiento de los espejos.

En relación a las perturbaciones conducidas a través de las tuberías de refrigeración, los mismos investigadores encontraron que el TMT también presentaba perturbaciones significativas, al igual que el GMT. Los investigadores, identificaron dos causas principales de vibración. Por un lado, atribuyeron el problema a la vibración generada por la bomba de impulsión y, por otro lado, al estrechamiento de la sección de la tubería en las electroválvulas. También observaron perturbaciones producidas por los cambios de sentido de la tubería en su trazado desde la enfriadora hasta la instrumentación. Estos factores provocaron que el flujo laminar del refrigerante se convirtiera en flujo turbulento, golpeando las paredes internas de la conducción generando vibración. Para abordar este problema, se llevaron a cabo simulaciones en ambas instalaciones, lo que permitió mejorar el diseño y recorrido de la conducción, además de planificar una sección de las tuberías mayor.

J. Lozi et al. [37] estudiaron las vibraciones en el telescopio *Subaru* mediante acelerómetros instalados en el instrumento de óptica adaptativa extrema coronográfica *Subaru* (SCEXAO, *Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics*). Detectaron que las vibraciones eran introducidas por el propio telescopio y no por la

instrumentación, estando relacionadas con los actuadores de accionamiento tanto en altitud como en azimut. Para ello, utilizaron un eje triaxial de acelerómetros instalados en la corona de sustentación del espejo secundario M2. Para estimar el error producido en la instrumentación a causa de la vibración se correlacionaron los datos de los acelerómetros con los datos del sensor de frente de onda (WFS, *WaveFront Sensor*). Los resultados mostraron que existían simetrías entre 4 y 6 Hz y que las vibraciones medidas eran las mismas con ambos métodos de medición. El origen de la vibración provenía de los actuadores de los movimientos del telescopio en altitud y azimut.

Otro ejemplo lo encontramos en el estudio realizado por M. Hartung et al. [38], [39] sobre el generador de imágenes de planetas Géminis (GMI, *Gemini Planet Imager*) del Telescopio Géminis Sur (GST, *Gemini South Telescope*), dedicado a la detección de exoplanetas. El telescopio está equipado con un sistema de *Extreme Adaptive Optics* (XAO) muy sensible a las vibraciones que llegan al GMI. Tras varios años caracterizando una vibración presente a unos 60 Hz, se determinó que la fuente más significativa procedía de los refrigeradores criogénicos de la instrumentación. Esto supuso implementar un controlador lineal-cuadrático-gaussiano (LQG, *Linear-Quadratic-Gaussian*) para apuntar y enfocar el GPI, lo que mitigó en gran medida la vibración. Al ser una única frecuencia de vibración se optó por utilizar, además, métodos mecánicos. Para ello se empleó un amortiguador de vibración ajustable (TVA, *Tunable Vibration Absorbers*). En laboratorio se ajustaron para la frecuencia de 60 Hz pero en su instalación final se comprobó que habían perdido su eficacia, por lo que fueron desinstalados. Se propuso un amortiguador de masa sintonizado (TMD, *Tuned Mass Damper*) apropiado para reducir las frecuencias modales de excitación por cualquier causa. Se estudió el sistema y se calcularon los TMD necesarios, pero no fueron instalados al no ser necesarios por los resultados obtenidos en las mediciones del GPI en su ubicación final.

Los ejemplos anteriores demuestran que las perturbaciones provocadas por los sistemas auxiliares del telescopio son las fuentes de vibración más importantes, por encima de las atmosféricas.

2.3.3 Presupuesto de vibraciones

En el diseño, desarrollo y construcción de telescopios, es primordial considerar las vibraciones que llegan a los elementos más sensibles. El telescopio en su conjunto puede verse fácilmente afectado por cualquier tipo de vibración, pero son los elementos relacionados directamente con la captación de fotones los que tienen más sensibilidad. Las vibraciones generan desplazamientos en los elementos que están sometidos a aceleraciones, lo que tiene un impacto significativo en la calidad de las observaciones. Uno de los elementos más sensibles son los espejos encargados de captar los fotones. Los espejos primarios, que reciben directamente los fotones del universo, deben ser lo más grandes posible para abarcar la mayor cantidad de fotones. Sin embargo, su tamaño está limitado por consideraciones de construcción.

Por ejemplo, el telescopio JST250 cuenta con un espejo primario de 2,50 m de diámetro fabricado en una sola pieza, mientras que otros, como los ELT, tienen espejos primarios segmentados en paneles independientes que forman un único espejo. Un ejemplo de esto es el caso del TMT, que cuenta con un espejo primario de 30 metros de diámetro. Otros telescopios buscan ampliar la superficie de observación mediante el uso de dos grandes espejos segmentados, como el Gran Telescopio Binocular (LBT, *Large Binocular Telescope*).

En el caso de los espejos formados por una única pieza óptica, las deformaciones se compensan de forma mecánica, mientras que los sistemas de control de los actuadores actúan de manera activa. Por otro lado, en los espejos segmentados, cada segmento cuenta con su propio actuador, lo que permite que toda la superficie sea deformable formando una AO. En este caso último, los segmentos de los espejos se controlan de forma independiente, como ocurre en telescopios como el LBT, TMT o GMT.

Además de los espejos primarios, también están los espejos secundarios, que dirigen los fotones hacia los instrumentos de observación. En telescopios de tipo *Cassegrain* se utilizan al menos dos espejos: el espejo primario refleja los fotones del universo hacia el espejo secundario, que a su vez los dirige hacia los instrumentos, como se hace en el JST250. A partir de esta configuración, es posible encontrar configuraciones más sofisticadas con espejos secundarios que guían los fotones hacia los instrumentos, como en el caso del

LBT. En este último telescopio, los fotones de los espejos primarios se concentran en un único punto para conducirlos hasta la instrumentación.

En ocasiones, cuando las instrumentaciones utilizadas son grandes y pesadas, no es factible instalarlas debajo del espejo primario, por lo que se instalan en un lateral. Para ello, se redirigen los fotones hacia los instrumentos, como ocurre en el caso del GMT, que cuenta con un mayor número de espejos para conducir los fotones al disponer de dos espejos primarios y la instrumentación fuera de la estructura del telescopio.

Otro elemento influenciado por la vibración son las ópticas de corrección de campo. Éstas se instalan antes de la instrumentación y se encargan de corregir los defectos de calidad de imagen. Al igual que los espejos, las vibraciones pueden afectar el recorrido de los fotones y desviarlos de su trayectoria.

Por último, la instrumentación es el elemento más crítico de todo el telescopio, ya que se encarga de recibir los fotones y convertirlos en impulsos eléctricos para su estudio. Cualquier perturbación externa que afecte a la carcasa o las vibraciones generadas internamente se reflejarán de inmediato en la imagen.

Es importante cuantificar y controlar las vibraciones para no exceder los límites establecidos por la instrumentación. Para ello, se establecen límites de vibración del telescopio mediante la planificación de los límites de vibración que los diferentes elementos pueden soportar sin perjudicar la calidad de imagen. Estos límites se definen en un documento llamado presupuesto de vibraciones [40], [41]. En este documento se determina, en términos de WFE y unidades de nanómetro, el error máximo que cada conjunto de elementos puede aportar debido a las vibraciones. Cada uno de los conjuntos se pormenoriza en elementos más básicos, estableciendo valores de vibración individuales. De esta manera, se garantiza que la vibración del conjunto no supere los límites establecidos abordando de manera independiente cada uno de los elementos.

2.4 Mitigación de vibraciones en telescopios

La mitigación de vibraciones en telescopios profesionales es uno de los principales objetivos de los ingenieros encargados de mejorar su rendimiento y cumplir con el presupuesto en vibración planificado. Para lograrlo, se comienza por identificar el origen de la vibración mediante instrumentación de medición en puntos sensibles de la estructura. A continuación, se cuantifica la aceleración y se determina si sus valores están por debajo del límite máximo establecido. Además, se realiza un análisis espectral de la firma de vibración que identifique aquellas frecuencias sobresalientes. Las frecuencias de la vibración pueden entrar en resonancia con las frecuencias naturales de la estructura, lo que aumenta la energía de las vibraciones en la estructura pudiendo causar daños en el telescopio. Para evitar esta situación, los ingenieros implementan sistemas de mitigación que disminuyan la influencia de la vibración sobre el telescopio. A continuación, se presentan algunos ejemplos de sistemas para la mitigación de vibraciones encontrados en la literatura.

Mitigación mediante técnicas activas. Estas técnicas utilizan sistemas de control y retroalimentación en tiempo real para contrarrestar las vibraciones y mantener la estabilidad del telescopio. Se aplican activamente durante la observación para minimizar los efectos negativos de las vibraciones en la calidad de la imagen astronómica. Algunas de las técnicas incluyen espejos deformables, suspensión activa, control de cúpula, sensores de vibración y acelerómetros, así como control activo de la montura, entre otras.

Por ejemplo, K. Stalcup et al. [42] instalaron acelerómetros en el espejo secundario en el Observatorio MMT. Las medidas tomadas se utilizaron para proporcionar información de realimentación al lazo de control de la instrumentación de posicionamiento, logrando así una mayor estabilidad.

En el caso del telescopio E-ELT/MICADO [43], se tuvieron en cuenta las perturbaciones causadas por la atmósfera y la estructura, las cuales afectaban a la calidad de imagen. Para abordar este problema, se implementaron lazos de control en un sistema regulador único de los actuadores que compensaba dichas perturbaciones. Sin embargo, en el laboratorio, los filtros utilizados resultaron ser efectivos para altas frecuencias, pero afectaban la reconstrucción de las señales de los acelerómetros debido a la deriva de bajas frecuencias y al ruido de altas frecuencias. Por lo tanto, se propuso una solución alternativa mediante el uso de resonadores adaptativos.

Otras técnicas activas se basan en la utilización de óptica adaptativa, y se utilizan sobre todo en telescopios con espejos segmentados y ópticas deformables. Estas técnicas ajustan la posición tip/tilt/piston

de cada uno de los espejos para compensar las variaciones causadas por deformaciones del telescopio debido a factores como el posicionamiento, la temperatura y la vibración, entre otros. Esto se logra mediante la implementación de lazos de control que controlan los actuadores de cada espejo. De esta manera, se obtiene que todas las superficies formadas por los segmentos del telescopio se comporten como una única superficie sin deformaciones. La mayoría de los trabajos de investigación en telescopios profesionales se centran en esta línea. Estos sistemas de mitigación mediante óptica adaptativa han demostrado ser robustos para compensar el error del frente de onda óptico (WFE, *Wavefront Error*) debido a la turbulencia atmosférica mediante el uso de espejos deformables [44]–[47]. También se ha comprobado su eficacia para mitigar la vibración causada por la estructura del telescopio en diferentes estudios [48]–[50]. Aun así, existe un nivel de energía perturbadora que todavía permanece y necesita ser minimizado, ya que las perturbaciones afectan al WFE. La literatura muestra gran número de investigaciones dedicadas a la mitigación de perturbaciones en los modos tip-tilt de los espejos [51]–[53] por ser las de mayor contribución al WFE.

En el caso del GST [38] se implementó un controlador LQG en el lazo de control, lo que permitió una importante reducción de las vibraciones, además de compensarlas con técnicas de mitigación pasivas. G. Agapito et al. [54] modificaron el lazo de control en el AO del LBT utilizando un filtro Kalman y compararon los resultados con un controlador clásico proporcional integrador (PI, *Proportional-Integral*). Los resultados mostraron que el controlador PI con filtro Kalman mejoró significativamente la estabilidad del actuador en comparación con el controlador PI clásico. Sobre el mismo telescopio, M Böhmer et al. [55] utilizaron acelerómetros en diferentes puntos de los espejos para obtener una posición lo más uniforme posible. Para lograr esto emplearon un alimentador de perturbaciones (DFF, *Disturbance Feedforward*) con dos enfoques diferentes en el lazo de control: reconstruir el posicionamiento del espejo a partir de la señal de un acelerómetro y utilizar filtros paso banda. Existen otras líneas de investigación que se basan en observadores basados en perturbación (DOB, *Disturbance Observer Based*) [56], o en cancelación de vibración adaptativa (AVC, *Adaptive Vibration Cancellation*) [57], entre otros.

Mitigación por técnicas pasivas. Se trata de sistemas empleados para amortiguar las vibraciones desde el origen de la fuente de producción empleando sistemas mecánicos de absorción. Por ejemplo, en un estudio realizado por D. Adams et al. [12] se emplearon resortes de baja rigidez para mitigar las vibraciones en el TMT causadas por las conducciones de líquido refrigerante desde la enfriadora criogénica hasta la instrumentación.

En el caso del GMT se actuó sobre los ventiladores de la unidad de tratamiento de aire de los espejos segmentados. La construcción de la unidad de tratamiento de aire se hizo en dos etapas (el bloque refrigerante y ventilador) utilizando técnicas de mitigación independientes. Mediante ensayos con acelerómetros en diferentes puntos se observaron las vibraciones producidas en su conjunto. Para atenuar las vibraciones propusieron dos estrategias. Por un lado, un TVA, de tal forma que, ajustando la velocidad del ventilador causante del primer armónico, conseguir sintonizar la velocidad para que el armónico principal coincida con el amortiguador. Por otro lado, utilizar un TMD. Mediante este sistema los investigadores pretenden amortiguar resonancias estructurales que pueden inducir en el propio sistema de aislamiento. Sobre el mismo telescopio GMT, se observó que el sistema de enfriamiento criogénico generaba grandes fuerzas en su etapa de vacío. Absorber tanta energía implica que los amortiguadores para mitigación de fuerzas deben tener rigidez prácticamente nula. Para ello diseñaron un resorte mecánico con tres muelles que actúan para negar la tasa de amortiguamiento en el fuelle instalado en la cámara de vacío. El prototipo mostró un resultado con una frecuencia de resonancia de 1,5 Hz. En futuros desarrollos pretenden conseguir frecuencias de resonancia de 0,3 Hz.

Mitigación por diseño estructural. Las estructuras ligeras son propensas a transmitir vibraciones debido a su baja masa, lo que facilita el desplazamiento de energías de baja intensidad a través de la estructura. Por otro lado, las estructuras pesadas absorben las vibraciones debido a la gran cantidad de energía necesaria para desplazar su masa. Este concepto resulta interesante en estructuras complejas como los telescopios, donde los diferentes componentes están formados por estructuras de distintas masas.

Un ejemplo de cómo afecta la masa a la vibración es el experimento realizado por D. Adams et al. [12], en el que utilizaron una mesa óptica pesada con aisladores para estudiar el comportamiento de estructuras del

telescopio. Mediante un martillo de ensayos y acelerómetros instalados en diferentes puntos sobre la superficie caracterizaron sus frecuencias naturales. Esta mesa resultó útil para ensayar elementos de pequeño o mediano tamaño. Para elementos de mayor tamaño, idearon una sala con un bloque de hormigón de 3x3x0,5 metros con aisladores, basada en el concepto de una mesa óptica amortiguada. Después de realizar los ensayos, observaron que el primer armónico de resonancia en la sala con bloque de hormigón estaba separado del de la mesa óptica (2 Hz frente a 15 Hz), pero su espectro se mantenía plano hasta los 100 Hz. Concluyeron que los resultados obtenidos al realizar los ensayos en la sala técnica con bloque de hormigón y con la mesa óptica eran similares, pudiendo realizar ensayos con elementos pesados y de gran volumen sobre el bloque de hormigón ensayado.

Del anterior desarrollo se comprueba que grandes masas tienen la capacidad de amortiguar las vibraciones que se producen principalmente del entorno de la instalación, evitando que lleguen a afectar a los elementos instalados sobre ellas. Extrapolando estos resultados al campo de los ELT, ocurre algo similar a lo que sucede en la sala técnica mencionada anteriormente. Las bases sobre las cuales se instalan los telescopios, así como el peso de los espejos primarios y sistemas auxiliares son significativamente mayores que el resto de las estructuras que componen el telescopio, lo que los aísla de perturbaciones de baja energía que puedan provenir del entorno.

A un nivel inferior al de un ELT, D. Adams et al. [12] investigaron la mitigación de perturbaciones en sistemas auxiliares mediante el uso de amortiguadores de masa sintonizada (como en el caso mencionado anteriormente en el GMT). Estas masas se acoplaron al equipo, proporcionando un mayor peso en las zonas críticas donde se generaban las vibraciones y reduciendo la frecuencia a la que se producen las resonancias.

La estructura del telescopio funciona como un medio de transmisión, similar a las tuberías que transportan líquido refrigerante desde la criofriadora hasta la instrumentación. En un estudio realizado por M. Böhm et al. [55], se analizó la diferencia de trayectoria óptica (OPD, *Optical Pathway Difference*) que llega a la cámara adaptativa Visible/Near-InfraRed e Interferómetro para astronomía (LINC-NIRVANA, Near-InfraRed/Visible Adaptive Camera and INterferometer for Astronomy) causada por las vibraciones en los espejos primarios M1 del LBT. A través del comportamiento de las estructuras que soportan los espejos primarios se realizaron medidas con acelerómetros en los espejos segmentados M1 y mediante análisis espectral se determinaron las frecuencias más sobresalientes que pudieran interactuar con las frecuencias de resonancia del telescopio. Se tuvo en cuenta que la masa total del telescopio era mucho mayor a la masa de sustentación de los espejos segmentados de M1, lo que implica que las vibraciones en masas más grandes tienen una menor transmisión de vibración que las masas más pequeñas. Los investigadores observaron dos tipos de espectros para analizar: uno con pocos modos frecuenciales bien definidos y separados, y otro con muchos modos frecuenciales diferentes y amortiguados. El segundo caso dificultó establecer una correlación entre las frecuencias medidas en puntos sensibles y las frecuencias de resonancia de la estructura. Por otro lado, el espectro con pocos modos frecuenciales mostró un rango frecuencial bajo, entre 10 y 100 Hz, debido a que la estructura de sustentación de los espejos es más flexible en comparación con el resto de la estructura. Los resultados del estudio mostraron una atenuación de las vibraciones en los espejos segmentados M1 mediante el uso de filtros y algoritmos, lo que permitió reducir el OPD en el rango de 8 a 80 Hz.

En definitiva, todas estas técnicas permiten a los astrónomos compensar las vibraciones causadas por diversas fuentes y mantener la estabilidad del conjunto de elementos y dispositivos que forman el telescopio durante la observación, lo que a su vez mejora la precisión de las investigaciones astronómicas.

2.5 Métodos y tecnologías de medición de vibraciones

Cuando se realiza un estudio de frecuencias de resonancia en una estructura es fundamental tener conocimiento del rango de frecuencias que se van a medir. Esto permitirá seleccionar la instrumentación más adecuada. Además, servirá de referencia para determinar si las frecuencias más bajas son las más influyentes en la calidad de imagen como algunos autores aseguran [12]. Posteriormente, se determinarán los instrumentos de medida que mejor se ajusten al rango frecuencial y al método de medición empleado.

2.5.1 Rango frecuencial

En este apartado se enumeran los rangos frecuenciales estudiados por investigadores en telescopios profesionales. Las referencias tomadas se basan en los rangos frecuenciales establecidos para la mitigación de vibraciones, frecuencias de resonancia del telescopio y presupuestos de vibración.

En el estudio realizado por S. Niu et al. [58] se determinó que el rango de frecuencia para la supresión de vibraciones estaba entre 7.5 Hz y 12.5 Hz. Este estudio se centró en modificar el lazo de control de posicionamiento de un espejo en el laboratorio, con el objetivo de corregir la posición tip/tilt/piston. En esta línea T. Tang et al. [59], mejoró el posicionamiento tip/tilt de un espejo en el laboratorio mediante el uso de un filtro-Q en el lazo de control para el rango frecuencial de 0 a 20 Hz. Cabe destacar que este rango frecuencial también fue analizado en el estudio de G. Agapito et al. [54] sobre óptica adaptativa en el LBT. Por otro lado, el estudio de T. Tang et al. [52] estableció un rango de frecuencia de 0 a 11 Hz en su investigación sobre espejos deformables para astronomía.

Sin embargo, en el caso de estudios de frecuencias de resonancia en telescopios de gran tamaño, como el LBT o el Telescopio Espacial Muy Grande (VLST, *Very Large Space Telescope*), el rango de frecuencia se extiende más allá de los 20 Hz (hasta los 100 Hz). Se considera que las vibraciones con espectros de frecuencia más altos no suponen una perturbación significativa para el telescopio. Es importante tener en cuenta, que, debido a las dimensiones de los telescopios (especialmente en los ELT), no tiene por qué haber un único armónico de frecuencia resonante para todo el telescopio. Es posible que coexistan varios armónicos, ya que las partes que lo componen se comportan de manera diferente cuando se ensayan de forma independiente a cuando están instaladas en su ubicación final debido a los acoplamientos mecánicos a la estructura.

En el estudio realizado por M. Böhm et al. [55] se encontró que el rango de frecuencia crítico por resonancia para los espejos secundarios del telescopio LBT se concentran entre 10 y 100 Hz. Estas bajas frecuencias se deben a las diferencias de masa entre los espejos secundarios y la estructura del telescopio. D. Adams et al. [12] también confirmaron esta idea en su estudio sobre los ELT. En el estudio de M. Böhm et al. [55], se determinó un rango de frecuencia para mitigación de vibraciones en los espejos secundarios entre 10 Hz a 80 Hz. Por su parte R. Muradore et al. [57] encontraron que el rango de frecuencias de vibración alcanzaba los 200 Hz, aunque los armónicos más destacados ocurrieron en 18 y 48 Hz. En el estudio de T. Tang et al. [51], a pesar de medir frecuencias notables hasta los 78 Hz, el ancho de banda energético se encontraba por debajo de los 10 Hz, con dos picos destacados a 4.8 y 6 Hz. Por último, D. Adams et al. [12] determinaron unos rangos frecuenciales críticos para el TMT entre 5 y 20 Hz, mientras que para los telescopios LBT y GMT estaban por debajo de los 100 Hz, concentrándose especialmente por debajo de los 25 Hz.

2.5.2 Métodos de medición de vibraciones

La medición de vibraciones en grandes estructuras requiere de una estrategia clara de lo que se pretende medir. Esto implica identificar, tanto los puntos estratégicos de medida, como definir los ejes en los que se debe realizar la medición. En algunos casos, se utiliza un único acelerómetro en el punto sensible que se desea estudiar. En otros casos, se distribuyen acelerómetros en diferentes ubicaciones de la estructura para medir de manera puntual la vibración en cada uno de ellos. Esta técnica permite observar cómo disminuye la energía de la vibración y determinar el punto de origen. Además, en ocasiones es necesario conocer el comportamiento de la estructura en los tres ejes cartesianos, para lo cual se utiliza un eje triaxial de acelerómetros. Cada estudio de vibración requerirá características específicas y puede utilizar uno o varios de estos métodos mencionados. En los estudios revisados en la literatura encontramos diferentes estrategias de medición. Presentamos a continuación algunos ejemplos.

El estudio realizado por C. Trigona et al. [24] se llevó a cabo en el observatorio Serra la Nave. El objetivo principal fue el investigar el efecto de los movimientos del telescopio en la generación de vibraciones, y para ello se utilizaron tres acelerómetros ubicados estratégicamente en diferentes puntos de la estructura del telescopio. Estos acelerómetros formaban un montaje 3D creando una estructura triaxial ortogonal.

Las investigaciones realizadas por S. Altarac et al. [60] se enfocaron en analizar las vibraciones generadas en tres telescopios: el Telescopio *William Herschel* (WHT, *William Herschel Telescope*), el Gran Telescopio

Azimutal (BTA, *Big Telescope Azimuthal*) y el Telescopio Canadá-Francia-Hawái (CFHT, *Canadá-Francia-Hawái Telescope*). Para llevar a cabo el estudio, se midieron las vibraciones utilizando acelerómetros colocados estratégicamente debajo de la instrumentación, registrando movimientos muy sutiles. Los resultados obtenidos demostraron la correcta ubicación de los acelerómetros en cada telescopio, y se observaron diferencias en las vibraciones generadas por cada uno de ellos. Estos hallazgos sentaron las bases para futuros estudios sobre vibraciones en telescopios similares.

En el telescopio *Subaru*, N. I. Tomo et al. [61] observaron que las imágenes capturadas presentaban alargamiento en azimut y elevación. Mediante el uso de acelerómetros descubrieron que las frecuencias de hasta una decena de hertzios estaban afectando a la instrumentación. Con el objetivo de identificar la fuente de las vibraciones medidas, se procedió a reubicar los acelerómetros. Tras un análisis exhaustivo, se determinó que la vibración provenía de uno de los actuadores. Sin embargo, se concluyó que la intervención mecánica no sería suficiente para resolver el problema. En su lugar, se propuso realizar ajustes en los parámetros del bucle de control del actuador para reducir las vibraciones.

En el estudio realizado por A. Keck et al. [62], los investigadores se centraron en el análisis de vibraciones en grandes telescopios mediante simulaciones en laboratorio. Utilizando un solo acelerómetro se estudiaron las vibraciones generadas tanto por la atmósfera como por la estructura del telescopio.

2.5.3 Tecnologías de medición de vibraciones

Las tecnologías de medición de vibraciones, además de cumplir con los requisitos mencionados anteriormente deben tener ciertas características que permitan su implementación sobre el telescopio. Entre otros factores se considera el peso, el método de fijación a la estructura y la tecnología utilizada. Existen diversas opciones tecnológicas disponibles como la visión 3D [63], acelerómetros piezoeléctricos [42], [61] o acelerómetros de fibra óptica con tecnología Fabry-Perot [64], entre otros. Algunos estudios optan por el uso de acelerómetros sismológicos [65], que permiten cuantificar frecuencias muy bajas.

Los acelerómetros piezoeléctricos son ampliamente utilizados debido a su buena sensibilidad y sus rangos de medida que alcanzan frecuencias muy bajas, cercanas a 0 Hz. Sin embargo, estos sensores son muy sensibles a los campos electromagnéticos, lo que puede dar lugar al acoplamiento de señales no deseadas, como la frecuencia de la red eléctrica. Afortunadamente, la eliminación de estos acoplamientos de frecuencias indeseables es posible mediante técnicas de software de filtrado [66]–[68].

2.6 Entornos experimentales

Los telescopios profesionales, debido a su complejidad y alto costo, requieren que cualquier intervención en ellos sea cuidadosamente estudiada con anticipación. Por esta razón, se realizan previamente en laboratorios preparados para ello, mediante la utilización de ópticas y actuadores a escala con características similares a las de los telescopios reales. Estos experimentos permiten extrapolar los resultados al entorno real. Es importante tener en cuenta que los actuadores utilizados en los grandes telescopios deben cumplir con especificaciones de control para evitar exceder los límites de aceleración, ya que un exceso podría dañar la óptica y/o la instrumentación. Por lo tanto, las pruebas con algoritmos de control se realizan en la configuración del laboratorio, y, una vez verificados y depurados, se ajustan en los grandes telescopios.

Sin embargo, de los estudios analizados en esta investigación, solo uno llevó a cabo una implementación más cercana a la realidad. En el estudio de G. Agapito et al. [54], además de verificar los resultados en el laboratorio experimental, se probó el sistema desarrollado en condiciones reales de trabajo en la torre solar del Observatorio Astrofísico Arcetri.

2.7 Ubicación de telescopios

Los telescopios ubicados lejos de los centros de procesamiento de datos presentan un desafío logístico para el tratamiento de las imágenes capturadas [69]. Los requisitos necesarios para la observación nocturna exigen condiciones específicas para su ubicación [70], como la ausencia de contaminación lumínica [71] y una atmósfera estable de flujo laminar [72]. Esto hace que sea preferible instalarlos en lugares elevados y alejados

de áreas densamente pobladas y habitadas. Sin embargo, esta ubicación presenta el desafío de tener accesos difíciles, especialmente durante las estaciones invernales debido a las condiciones meteorológicas.

Por esta razón, es necesario dar solución al control y acceso a la información de forma telemática en el diseño de telescopios. Por ejemplo, los telescopios JST250 y JAST80 están robotizados para su control desde el CEFCa, que se encuentra a varias decenas de kilómetros del OAJ. Una red de antenas transmite los datos y comandos para su funcionamiento con un personal mínimo, lo que permite la observación nocturna de forma automatizada. Las imágenes capturadas en los telescopios del OAJ se transmiten al centro de procesamiento en el CEFCa a través de antenas. De la misma forma, desde el CEFCa se supervisan las instalaciones, alarmas y el control remoto de los telescopios. La transmisión de órdenes permite superar la barrera de acceso al telescopio en las condiciones más adversas.

Telescopio JAST80 y entorno de
trabajo

3

3. Telescopio JAST80 y entorno de trabajo

El telescopio JAST80 es una estructura singular debido al tamaño de su espejo primario en comparación con otros telescopios con la misma montura. Está instalado en el OAJ junto con el telescopio JST250, que tiene una montura altazimutal con un espejo primario de 2,5 m y una instrumentación diseñada para cartografiar el universo. El JAST80 es un telescopio con montura ecuatorial-alemana y un espejo de 80 cm cuya misión es apoyar el cartografiado del telescopio JST250.

3.1 Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ)

El telescopio JAST80 [73] forma parte del OAJ [74]–[78], ubicado en el Pico del Buitre en la Sierra de Javalambre, en el término municipal de Arcos de las Salinas (Teruel), a una altitud de 1.957 metros sobre el nivel del mar (Figura 3.1). El OAJ está compuesto por el telescopio JAST80, el telescopio JST250 [79]–[81] y una estación de calidad de imagen [82] (Figura 3.2). Además, el OAJ cuenta con el telescopio *JavaDIMM* para caracterización de las turbulencias atmosféricas, sala de control, sala limpia, un edificio de instalaciones, vivienda y una campana de aluminizado de espejos.

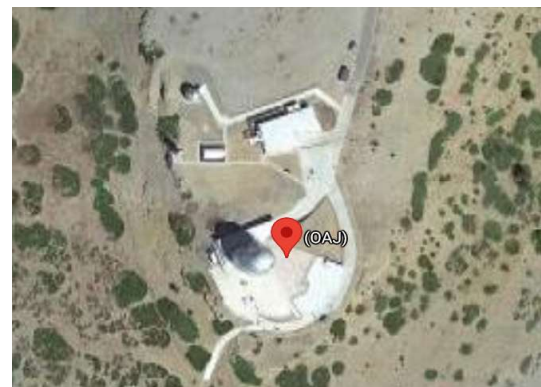


Figura 3.1. Mapa ubicación OAJ. Fuente [83]. Vista desde el espacio del OAJ. Fuente [83].



Figura 3.2. Vista general del OAJ. Fuente [84].

La instalación es considerada como ICTS [85] por el Gobierno de España, lo que implica que parte del tiempo de producción de imágenes se dedica a proyectos de la comunidad científica. Está gestionada por el CEFGA [84], [86] ubicado en la Plaza San Juan, Teruel. El CEFGA es una Fundación del Gobierno de Aragón creada para la construcción y gestión del OAJ. En él se lleva a cabo el control, almacenamiento y tratamientos de datos a través de la unidad de procesado y archivo de datos (UPAD) [87]–[89], además de los proyectos de investigación que motivan el OAJ.

3.2 Objetivos de explotación

El Javalambre-Física de la aceleración del universo y estudio astrofísico (J-PAS, *Javalambre Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey*) [90] es un proyecto internacional encargado del estudio cosmológico en el hemisferio norte para el cartografiado del universo. Su característica más relevante son los filtros de banda estrecha combinados con un gran campo de observación de la instrumentación [91]. El proyecto comprende el Javalambre-Estudio fotométrico local del universo (J-PLUS, *Javalambre Photometric Local Universe Survey*) [91], situado en el OAJ, y el Sur- Estudio fotométrico local del universo (S-PLUS, *South Photometric Local Universe Survey*) [92], [93], situado en el CTIO Chile. Ambos telescopios son similares y están diseñados para realizar el sondeo del universo por multifiltros, en la línea de los planteados en CLASH [94], ALHAMBRA [95] o el COSMOS [96], con el objetivo de cartografiar los dos hemisferios terrestres de forma complementaria apoyando a la instrumentación del JST250 del OAJ.

El objetivo de explotación es utilizar filtros de longitudes de onda con bandas estrechas adyacentes en observaciones muy tenues, lo que permite discretizar los fotones por su longitud de onda y determinar la composición química de los astros que los emiten. Esto no sería posible en un espectro muy amplio formado por pocos filtros. El telescopio JAST80 [97] tiene la función de realizar calibraciones fotométricas de apoyo a la investigación del telescopio JST250 dentro del proyecto J-PAS.

3.3 Configuración

El telescopio JAST80 [73], [74], [84] tiene una configuración óptica *Ritchey-Chrétien*, con plano focal *Cassegrain* y corrector de campo de tres lentes. El conjunto tiene un peso de 2.500 kg y es capaz de soportar instrumentación de hasta 80 kg. El telescopio está formado por un espejo primario M1 hiperbólico de 830 mm de diámetro con un campo de visión de 2 grados que recibe los fotones del universo y un espejo secundario M2 con óptica activa mediante hexápodo (ver Figura 3.3).

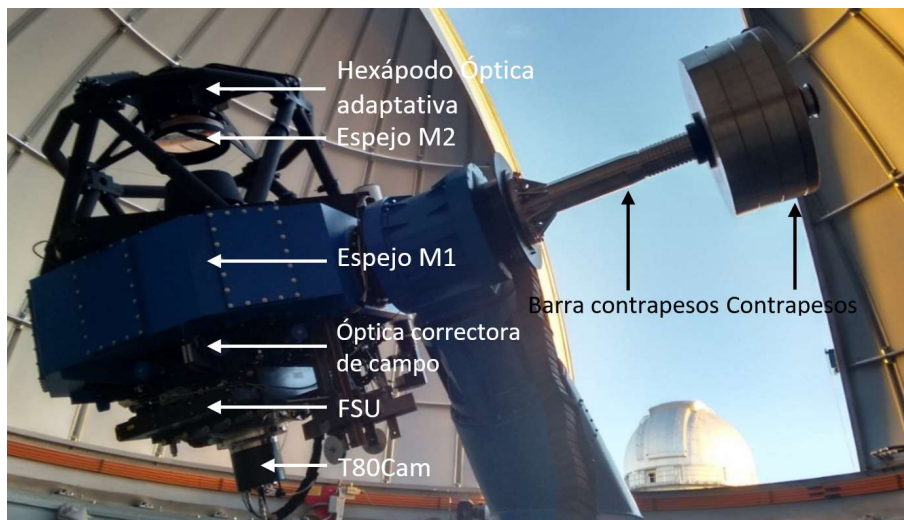


Figura 3.3. Telescopio JAST80. Fuente: [84].

La disposición de los espejos, corrector de campo e instrumentación del telescopio JAST80 para capturar los fotones es como se dispone en la Figura 3.4. En primer lugar, se utiliza un espejo primario M1 esférico cóncavo con una superficie pulida y aluminizada para reflejar la luz hacia el espejo secundario M2 controlado por el hexápodo. La superficie del espejo M2 es esférica y convexa, reflejando la luz hacia la instrumentación mediante una abertura central del espejo primario M1. Antes de llegar a la instrumentación T80Cam, los fotones llegan al plano focal del corrector de campo tipo *Cassegrain*, que está formado por tres ópticas que concentran los fotones hacia los filtros.

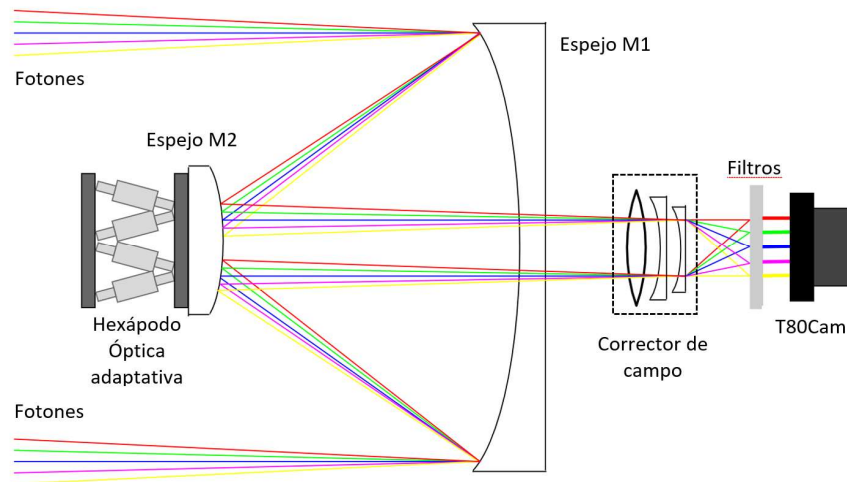


Figura 3.4. Configuración óptica Ritchey-Chrétien del telescopio JAST80, plano focal Cassegrain y corrector de campo. Fuente: Fuente propia.

El espejo primario M1 está fabricado en una única pieza sujeta a la estructura del telescopio (Figura 3.5). Su anclaje es fijo y se compensa mecánicamente para evitar que los movimientos produzcan deformaciones en la superficie que dispersen el haz de luz. Solidarias al telescopio están las ópticas de corrección de campo formada por tres lentes contiguas.



Figura 3.5. Fotografía del espejo primario M1. Fuente: [84].

El espejo secundario M2 es esencial para cumplir con los estándares de calidad, ya que tiene un papel fundamental en la orientación de los fotones. Su objetivo es corregir las desviaciones en la trayectoria de los fotones para dirigirlos al corrector de campo. Es importante destacar que algunas ópticas adaptativas utilizan espejos deformables para alterar su superficie y orientar los fotones [98]. Por otro lado, los espejos secundarios activos corrigen su posición mediante hexápodos, independientemente de que sean o no espejos deformables.

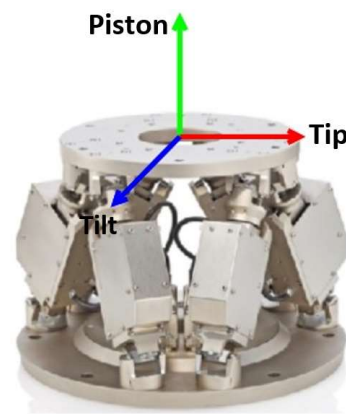


Figura 3.6. Óptica adaptativa mediante hexápodo para el espejo M2 del telescopio JAST80. Izquierda, imagen del espejo secundario del telescopio JAST80 [84]. Derecha, hexápodo. Fuente: [84].

En el caso del JAST80, el espejo secundario M2 se controla mediante un hexápodo de 6 Grados de Libertad (GDL) que modifica los modos tip-tilt-piston. Estos modos se utilizan para alinear correctamente los fotones en el plano focal y mitigar las desviaciones producidas por el entorno, la estructura, los actuadores y las instalaciones de servicio que puedan afectar a la imagen (Figura 3.6).

3.4 Instrumentación de observación

El telescopio JAST80 cuenta con la instrumentación de observación T80Cam (ver Figura 3.7.a), la cual incluye un corrector de campo (Figura 3.7.b) que mejora el área efectiva y la calidad de imagen. Este corrector de campo está compuesto por tres ópticas consecutivas ubicadas delante de la caja de filtros. A continuación, está el obturador que permite el paso de los fotones a la instrumentación. Este obturador está integrado en el filtro y unidad de obturador (FSU, *Filter and Shutter Unit*) [92] (Figura 3.7.c), que alberga dos bandejas de filtros (J0202 y J0201) en forma de rueda. Cada bandeja de filtros contiene seis filtros y una posición vacía, lo que permite combinar ambos conjuntos de filtros de tal manera que los fotones atraviesen un único filtro antes de llegar a la cámara.

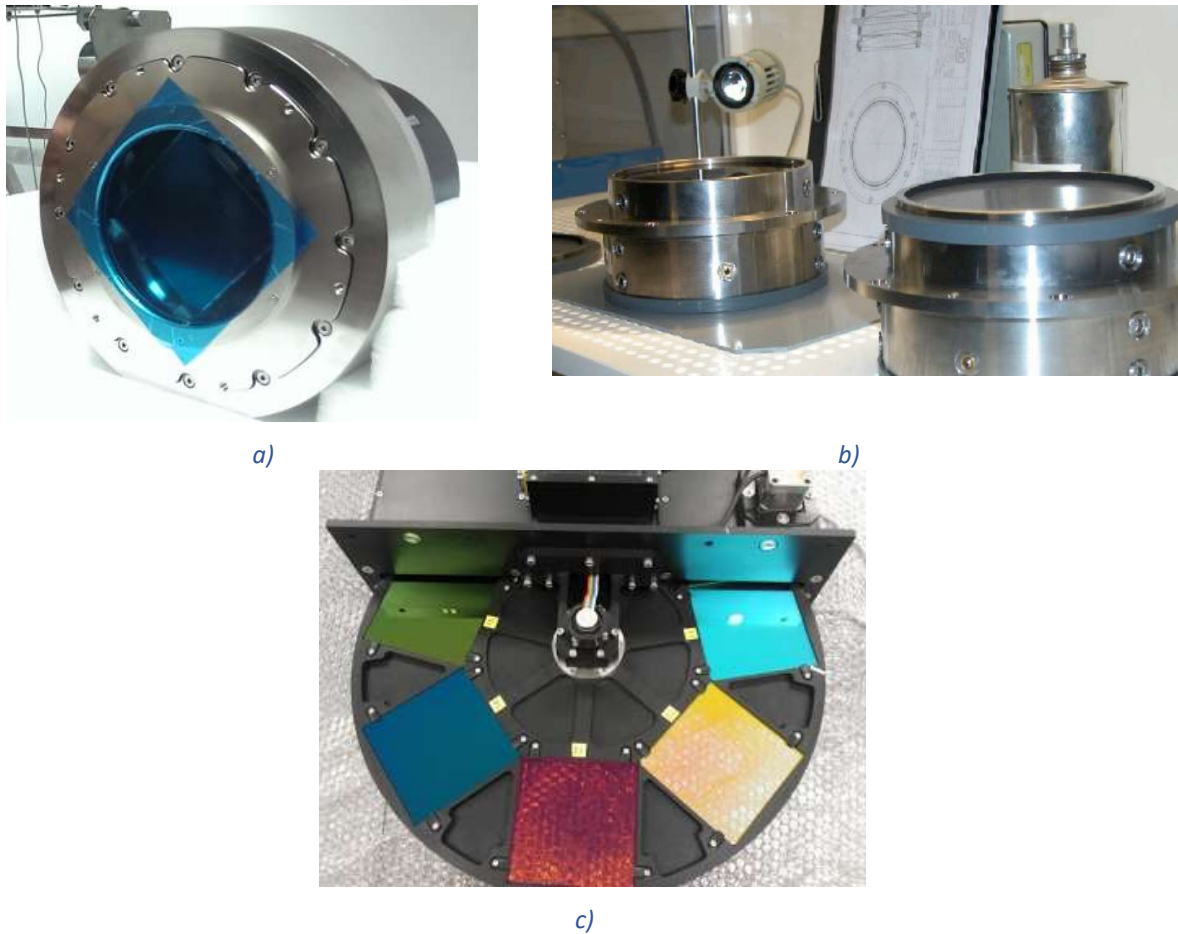


Figura 3.7. a) Imagen de la instrumentación T80Cam. b) Ópticas de corrección de campo. c) Imagen de una rueda de filtros del FSU. Fuente: [84].

Finalmente se dispone de la cámara criogénica formada por una óptica de potencia, el criostato con temperaturas de operación internas de -100°C , el detector CCD formado por una matriz de $9,2\text{ k} \times 9,2\text{ k}$ píxeles con un tamaño de píxel de $10\ \mu\text{m}$ [99] y los sistemas de vacío, enfriamiento y electrónica. La electrónica del sistema logra evacuar en 12 s los datos de la CCD por 16 puertos de salida con 16 modos diferentes de lecturas, ruido (e-, RMS) y tiempo variables [84].

3.5 Montura del telescopio

El telescopio JAST80 se instala sobre una montura ecuatorial-alemana, como se muestra en la Figura 3.8. Esta montura se diseñó específicamente para la ubicación del telescopio. El eje vertical de la montura es perpendicular al eje de la Tierra, mientras que el eje oblicuo tiene un ángulo de inclinación orientado hacia

el polo norte celeste, cerca de la estrella polar. La razón por la que se utiliza este tipo de montura es su gran precisión en la observación astronómica.



Figura 3.8. Telescopio JAST80, cúpula y pilar. Descripción de la estructura y movimientos.

El telescopio JAST80 se encuentra dentro de una cúpula giratoria con abertura radial que permite abrir la sala del telescopio en cualquier posición para observar el cielo. Además, para evitar las vibraciones generadas por máquinas, instalaciones y personas que se desplazan por la sala el telescopio está soportado por un pilar independiente de la estructura del edificio. Esto logra un aislamiento mecánico que ayuda a mejorar la calidad de las observaciones evitando la propagación de vibraciones.

3.6 Movimientos del telescopio

El telescopio cuenta con dos ejes de posicionamiento perpendiculares entre sí, que son movidos por dos actuadores. Estos actuadores son sistemas electromecánicos que generan el movimiento en el eje asociado, el movimiento horizontal o declinación (DEC) y el movimiento vertical o ascensión recta (AR). Con estos dos movimientos, el telescopio es capaz de orientarse con la referencia de la montura hacia cualquier punto deseado del cielo.

La velocidad de movimiento del telescopio JAST80 depende del tipo de tarea que se esté ejecutando. Puede tratarse de desplazamientos de posicionamiento o parking, denominados modo *slewing*, que se caracterizan por tener altas velocidades, o de seguimiento, denominados modo *tracking*, que se caracterizan por movimientos que compensan la velocidad de la Tierra con respecto al universo.

En el cartografiado astronómico, los tiempos de exposición de observación son elevados, llegando incluso a algunos minutos, durante los cuales la CCD recoge los fotones para registrar la imagen. Sin embargo, debido al movimiento rotacional y traslacional de la Tierra con respecto al Sol (movimiento sidéreo), la posición de la orientación del telescopio con respecto al punto en el espacio que se está observando cambia continuamente (movimiento no sidéreo). Este movimiento sidéreo induce que la calidad de la imagen disminuya, presentando algún tipo de aberración. Para compensar este movimiento, el telescopio corrige continuamente la posición en AR y DEC en modo *tracking*.

3.7 Entorno de trabajo en el telescopio JAST80

La instrumentación de medición de vibraciones se instaló en el telescopio JAST80 por el ingeniero mecánico del OAJ. La Figura 3.9 muestra el aspecto general del telescopio JAST80, mientras que la Figura 3.10 detalla la cámara T80Cam, la FSU y la ubicación de los acelerómetros con el equipo de adquisición de datos.

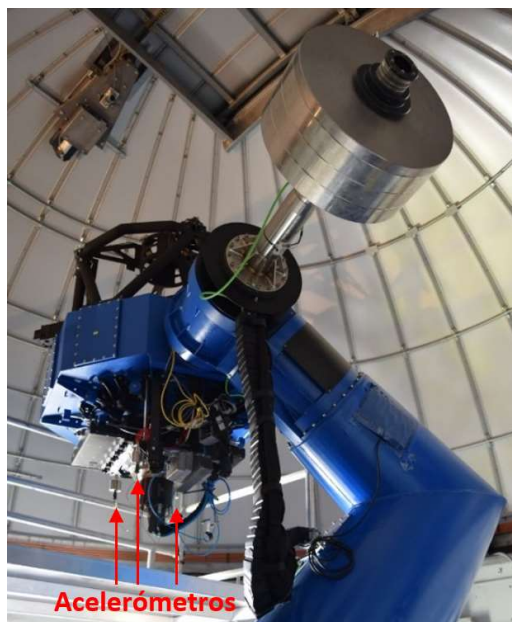


Figura 3.9. Detalle del telescopio JAST80 y los tres acelerómetros.

Los acelerómetros se instalaron en la parte posterior de los filtros, encima del JAST80Cam y a la misma altura que la CCD, como se muestra en la Figura 3.10. Debido a las características mecánicas y dimensionales de la T80Cam, no fue posible instalar los acelerómetros directamente sobre ella. Por lo tanto, los tres acelerómetros se colocaron perpendiculares al plano X-Y de la CCD en dirección del eje Z. Se anclaron a la FSU mediante un perno roscado en ambos extremos. Esta distribución de los acelerómetros no afectó la compensación de la cámara por el peso de los mismos. El uso de una estructura triaxial habría generado desajustes en la instrumentación debido al exceso de peso en un único punto.

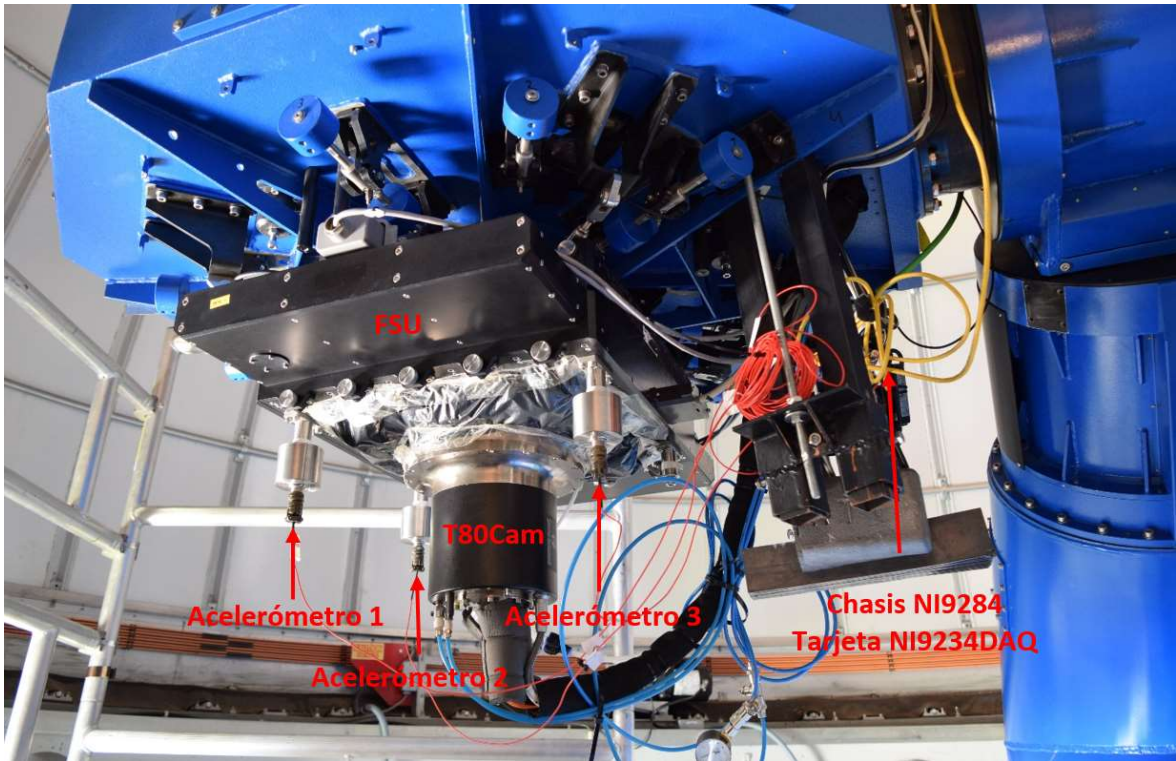


Figura 3.10. Detalle del telescopio JAST80, la cámara T80Cam, filtros, acelerómetros y equipo de adquisición de datos.

Finalmente, se estableció una conexión telemática entre el laboratorio remoto y el servidor del OAJ a través de una red ethernet conectada al chasis NI9234. Para llevar a cabo esta transmisión, fue necesario utilizar un software de gestión VPN para acceder a la dirección IP del servidor OAJ proporcionada por el CEFGA. Además, se requirieron los permisos necesarios para establecer la comunicación con la IP asignada.

3.8 Transmisión vía telemática

Los datos recogidos por los acelerómetros se transmiten al servidor local del OAJ a través de una conexión Ethernet. Luego, la señal se envía a la antena de la sede del CEFGA en la Plaza San Juan, ubicada a 80 km de distancia, mediante una red de antenas, como se muestra en la Figura 3.11. Por motivos de seguridad, la descripción de este apartado no puede ser descrita en este trabajo.

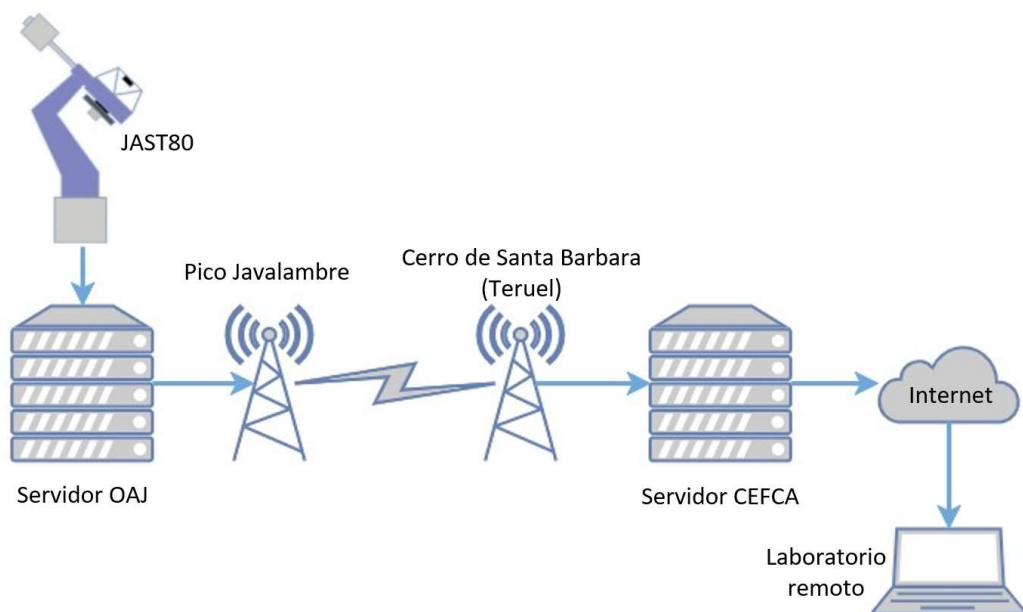


Figura 3.11. Esquema de comunicación entre OAJ - CEFGA y un laboratorio remoto.

Materiales, métodos y
 experimentos iniciales

4

4. Materiales, métodos y experimentos iniciales

En el Capítulo 2 se han revisado diferentes métodos de adquisición de señales de vibración. En esta tesis se emplearon acelerómetros piezoeléctricos sismológicos conectados a una tarjeta de adquisición de datos. El equipo de medición se ensayó en instalaciones controladas con la intención de minimizar los tiempos de investigación en el telescopio JAST80.

Para cumplir con los objetivos planteados se han utilizado herramientas de software adecuadas para el procesamiento de señales, como es el caso de la herramienta de procesamiento de datos Matlab. Se llevaron a cabo diferentes experimentos basados en un análisis espectral de las señales adquiridas mediante herramientas basadas en transformada de Fourier, cuyos resultados fueron de gran utilidad para el desarrollo del trabajo posterior.

4.1 Materiales: descripción del equipamiento

El diseño de telescopios profesionales supone un gran desafío en términos de precisión. Durante el proceso de diseño, se define el presupuesto de vibración como la desviación total de la suma de las desviaciones parciales producidas por todos los actuadores y sistemas que intervienen en la producción de imágenes. Esto implica elegir la instrumentación adecuada y ubicarla en el lugar óptimo para adquirir las señales que suman el conjunto de desviaciones en su ubicación más crítica, la instrumentación.

4.1.1 Instrumentación de medida

Para cumplir con las desviaciones máximas exigidas en la medición de vibraciones y perturbaciones en la instrumentación [42], [61], [65], [100], es crucial utilizar la instrumentación de medición adecuada. En el caso del telescopio JAST80, se utilizó el equipamiento cedido por el OAJ-CEFCA con el fin de obtener resultados precisos y repetibles en futuros estudios bajo las mismas condiciones experimentales. El equipo cedido consta de tres acelerómetros piezoeléctricos, que se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características de los acelerómetros cedidos por el OAJ-CEFCA

Tipo	Acelerómetro
Unidades	3
Marca	Wilcoxon
Modelo	731 A
Sensibilidad, ±10%, 25°C	10 V/g
Rango de aceleración	0.5 g pico
Amplitud no lineal	1%
Frecuencia de respuesta:	
± 10%	0.10 - 300 Hz
± 3 dB	0.05 - 450 Hz
Frecuencia de resonancia	750 Hz
Sensibilidad transversal máxima	1% del eje
Respuesta de temperatura:	
-10°C	-12%
+65°C	+5%
Alimentación:	
Tensión de alimentación	18 - 30 VCC
Ruido eléctrico eqv. en g:	
Ancho de banda:	
2.5 Hz - 25 kHz	0.5 µg
Espectro: 2 Hz	0.03 µg/VHz
10 Hz	0.01 µg/VHz
100 Hz	0.004 µg/VHz
Salida impedancia máxima	100 Ω
Tensión de salida de polarización	9 VCC

Conexión a tierra	Caja aislada
Rango de temperatura	-10° to +65°C
Límite de vibración	10 g pico
Límite por impacto	Frágil
Sensibilidad electromagnética a 60 Hz	20 µg/gauss
Sellado	Hermético
Sensibilidad a la deformación de la base máxima	0.0001 g/µstrain
Diseño del sensor	PZT cerámico / flexible
Peso	760 gramos
Material	Acero inoxidable 316L
Montaje	Agujero roscado 3/8-16
Conector de salida	2 pin, MIL-C-5015
Conector de unión	R6
Cableado recomendado	J9 / J9T2A

Las dimensiones exteriores de los acelerómetros Wilcoxon 731A se muestran en la Figura 4.1.

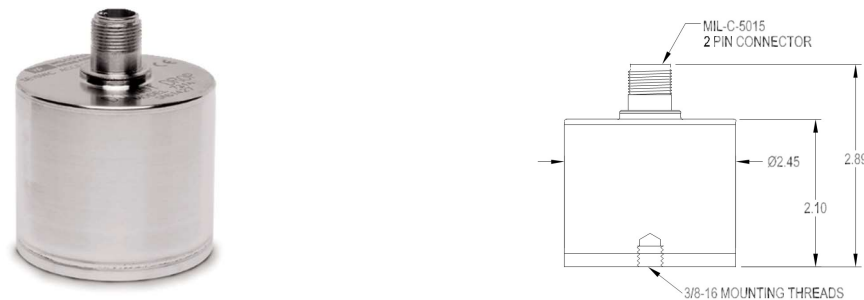


Figura 4.1. Imagen del acelerómetro Wilcoxon 731A y esquema de cotas.

La tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ de National Instruments es la encargada de recoger las mediciones de los acelerómetros. En la Tabla 4.2 se muestran sus características técnicas.

Tabla 4.2. Características de la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ cedida por el OAJ-CEFCA.

Número de canales	4 canales de entrada analógica
Resolución del ADC	24 bits
Tipo de ADC	Delta-Sigma (con prefiltro analógico)
Modo de muestreo	Simultáneo
Tipo de TEDS soportado	IEEE 1451.4 TEDS Clase I
Base interna de tiempos maestra (f_M)	
Frecuencia	13.1072 MHz
Precisión	±50 ppm máximo
Rango de velocidad de datos (f_s)	
Usando base de tiempos interna	
Mínimo	1.652 kS/s
Máximo	51.2 kS/s
Usando base de tiempos externa	
Mínimo	0.391 kS/s
Máximo	52.734 kS/s
Velocidad transmisión 1 (f_s)	(f _M ÷ 256)/n,

	n = 1, 2, ..., 31
Acoplamiento de entradas	AC/CC (seleccionable por software)
Rango de entrada	±5 V
Rango de tensión AC de fondo de escala	
Mínimo	±5 V _{pico}
Típico	±5.1 V _{pico}
Máximo	±5.2 V _{pico}
Corriente de excitación IEPE (seleccionable por software on/off)	
Mínimo	2.0 mA
Típico	2.1 mA
Tensión de cumplimiento IEPE	19 V máximo

En la Figura 4.2 se muestra la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ.



Figura 4.2. Imagen de la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ.

Por último, la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ está insertada sobre un chasis de comunicación NI-cDAQ9184 de National Instruments. Las características se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Características NI-cDAQ9184.

Interfaz de red	10BaseT y 100BaseTX Ethernet
Compatibilidad	IEEE 802.3
Rango de comunicación	10 Mbps, 100 Mbps, autonegociado
Distancia máxima de cableado	100 m/segmento
Número de módulos E/S	8

En la Figura 4.3 se muestra la conexión entre la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ y el chasis de comunicación NI-cDAQ9184.

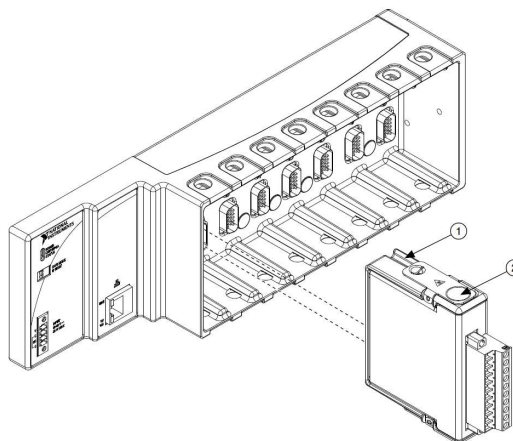


Figura 4.3. Imagen del chasis NI-cDAQ9184.

Los acelerómetros proporcionados por el OAJ-CEFCA tienen un rango de aceleración por debajo del valor máximo permitido por la instrumentación del JAST80. Según las especificaciones del fabricante de la instrumentación T80Cam y el equipo de ingenieros del OAJ-CEFCA, la aceleración máxima permitida para evitar daños a la CCD es de 1 g. Los acelerómetros tienen un rango de medida de ± 500 mg, lo que significa que valores superiores a este límite saturarán el equipo de medición y cortarán la señal. Sin embargo, en los experimentos realizados, los valores máximos de aceleración no superaron el límite máximo de los acelerómetros.

El rango frecuencial de los acelerómetros está entre 0.1 Hz y 300 Hz. Este rango está muy por encima de lo admitido por los experimentos realizados, que tuvieron un rango frecuencia entre 0 Hz y 60 Hz. El rango máximo frecuencial máximo está, además, por debajo de los rangos estudiados en otras investigaciones (entorno a un máximo de 100 Hz). Por otro lado, el peso de los acelerómetros es elevado, lo que dificulta su ubicación en la instrumentación condicionada por el peso máximo de la brida de sujeción. Eso impide el uso de un eje triaxial por descompensación en el reparto de masa en la instrumentación. El tipo de anclaje se realiza por rosca metálica, lo que limita su instalación sobre algunas superficies. Por el contrario, la estabilidad de la sujeción está garantizada.

El equipamiento de captación de las señales de los acelerómetros, formado por la tarjeta de adquisición de datos y el chasis de comunicación, es suficiente para digitalizar con precisión las señales eléctricas y transmitir las para su almacenamiento y/o procesamiento en tiempo real. Sin embargo, debido a las características mecánicas del chasis y el cableado proporcionado para la conexión entre acelerómetros y tarjeta de adquisición, no se puede alejar a grandes distancias. Por lo tanto, la ubicación final del chasis deberá situarse en las inmediaciones de los acelerómetros requiriendo un anclaje suficiente en la estructura del telescopio.

En conclusión, las características de medición del equipamiento cedido para la realización de experimentos en entorno controlado y entorno real son suficientes para los requerimientos estudiados, aunque existen dificultades mecánicas en su instalación.

4.1.2 Entorno controlado

Para realizar ensayos experimentales con recursos limitados en tiempo, como los que se presentan en el OAJ, se requiere de un proceso de adiestramiento en entorno controlado que pueda recrear las condiciones reales de trabajo en el telescopio JAST80. Con este fin se habilitó un laboratorio en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel (EUPT), específicamente en el laboratorio de Control Activo del Ruido (CAR).

Este laboratorio se encuentra en una sala aislada en el sótano del edificio principal y cuenta con equipamiento destinado al estudio del sonido. El equipamiento utilizado para los ensayos en entorno controlado consta de un generador de funciones marca Hewlett Packard modelo 33120A, un amplificador de señal marca YAMAHA modelo P4500, una caja acústica marca YAMAHA modelo SW118IV y una caja de absorción acústica fabricada para el laboratorio. En este laboratorio se llevaron a cabo los primeros desarrollos software de adquisición de señales con la finalidad de reducir el tiempo empleado una vez que todo el equipamiento se haya instalado en el JAST80 optimizando los recursos de tiempo limitados en el OAJ.



Figura 4.4. Imagen del generador de ondas y amplificador e imagen del sistema del equipamiento de producción de vibraciones controladas.

La instalación en el laboratorio CAR fue breve y temporal, por lo que se realizó un montaje provisional con el objetivo de permitir un montaje y desmontaje rápido, sin tiempos de mecanizado que pudieran ralentizar la investigación. En la Figura 4.4 se puede observar el montaje en el entorno controlado. El sistema está configurado con un generador de frecuencias que actúa como fuente de señal del amplificador de potencia, el cual proporciona la excitación a la caja acústica. Por otro lado, la caja de absorción acústica absorbe el sonido y reduce su propagación en la sala, tal como se puede observar en la Figura 4.5.

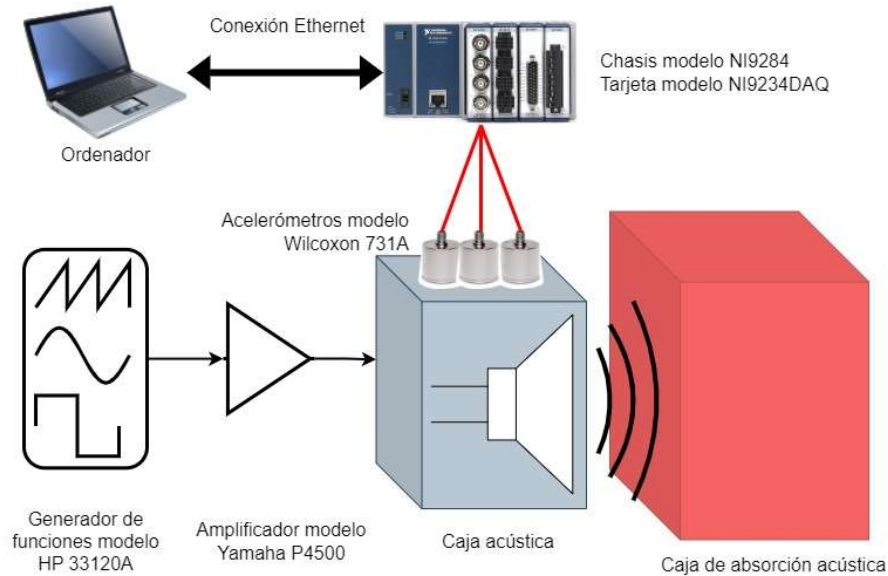


Figura 4.5. Sistema de ensayos en laboratorio CAR.

Las instalaciones resultaron adecuadas en cuanto a equipamiento y espacio, cumpliendo con las condiciones de trabajo esperadas. El aislamiento acústico y de vibración fue suficiente y no interfirió en las mediciones, como se demostró en las pruebas realizadas. Además, se desarrolló el software necesario para la conexión y adquisición de señales, estableciendo una transmisión directa de datos por cable Ethernet entre el ordenador y el chasis NI-cDAQ9184. Se gestionó eficazmente el almacenamiento y procesamiento de las señales adquiridas resolviendo cualquier eventual contratiempo. De esta manera se logró un entorno de trabajo óptimo para la realización de ensayos experimentales, con un equipamiento adecuado y un software eficiente para la adquisición y procesamiento de señales.

4.2 Métodos: Herramientas software

En este apartado se exponen las herramientas software empleadas para el desarrollo de los experimentos planteados, así como la configuración remota de la tarjeta de adquisición de datos.

4.2.1 NI MAX. Configuración y visualización del equipo remoto

La comunicación entre el chasis NI-cDAQ9184 y el ordenador utilizado para el procesado de señales se inicia con una conexión remota a los servidores del CEFA. La aplicación NI MAX v20.5 de National Instruments permite configurar el chasis NI-cDAQ9184 y la tarjeta de adquisición de datos NI9234DAQ. Los parámetros que se configuran se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Parámetros configuración NI-cDAQ9184.

Número de canales	1, 2, 3
Aceleración	g
Unidades de sensibilidad	V/g
Rango máximo y mínimo	± 500 mV
Tipo de sensor	Acelerómetro IEPE
Frecuencia de muestreo	1024 kmuestras/s

La configuración de la comunicación se establece a través de una puerta de enlace VPN proporcionada por el CEFCA. La aplicación NI MAX se comunica con el chasis NI-cDAQ9184, tal como se muestra en la Figura 4.6, para establecer la comunicación. Es importante destacar que el diálogo entre la aplicación NI MAX y el chasis NI-cDAQ9184 sólo puede ser realizado por un usuario simultáneamente.

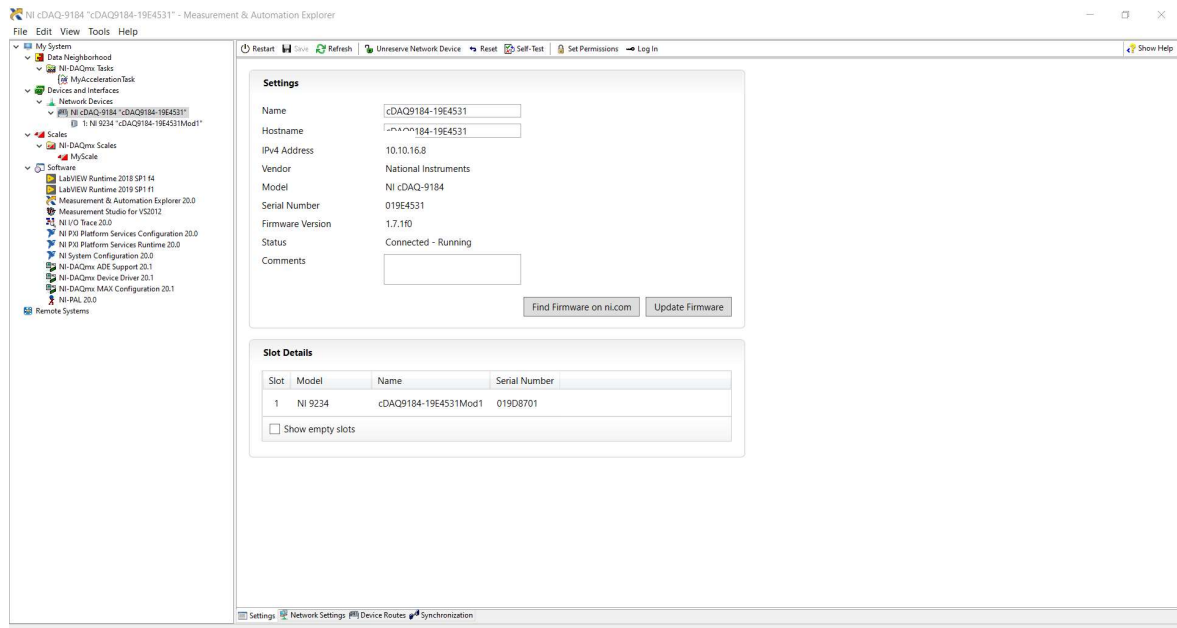


Figura 4.6. Imagen de la aplicación NI MAX. Pantalla de configuración de equipamiento.

En la Figura 4.7 se muestra el entorno de trabajo. Los parámetros de la tarjeta se modifican teniendo en cuenta las características de los acelerómetros instalados mientras que las señales se visualizan en tiempo real.

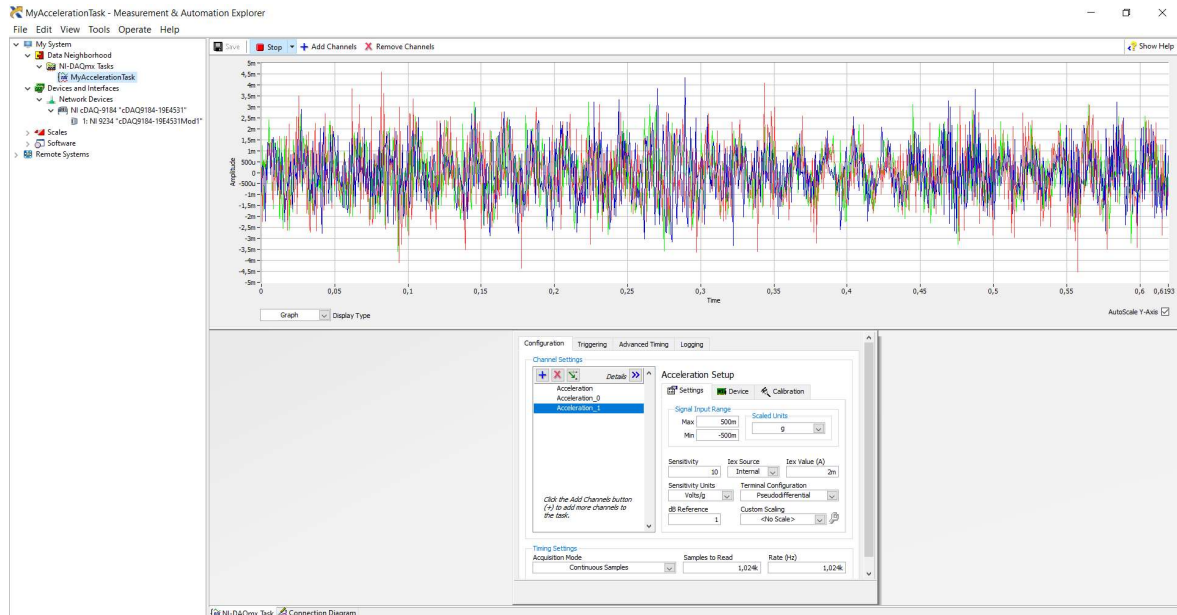


Figura 4.7. Imagen del software NI MAX con la representación de las señales adquiridas en tiempo real.

Establecida la configuración del NI MAX con el direccionamiento *Internet Protocol* (IP) del OAJ y la configuración de los acelerómetros Wilcoxom 731A, los datos se procesan desde la plataforma de Matlab.

4.2.2 Adquisición y procesamiento de señales. Matlab

El tratamiento de la información requiere de un software que permita la adquisición y el análisis de señales. Durante la realización de la tesis se utilizaron las versiones de MATLAB R2018b y MATLAB R2021b. Ésta es una plataforma de trabajo multidisciplinar que ofrece un software potente de cálculo matemático

complementado con *toolboxes* para diferentes aplicaciones. En este trabajo se requirió de herramientas de análisis frecuencial para el procesamiento digital de las señales generadas por los acelerómetros. Para ello, se instaló junto con Matlab, la *toolbox* "Analog input recorder", la cual está dedicada a la comunicación y adquisición de señales de National Instruments. Esta aplicación permite el diálogo a través del chasis con la tarjeta de adquisición NI9234DAQ mediante una comunicación preestablecida con el servidor del CECA y la aplicación NI MAX.

4.2.3 Generación modelo 3D, FEM y FEA. SolidWorks

En los últimos años, la creación y simulación de modelos tridimensionales 3D por ordenador ha experimentado un crecimiento exponencial gracias al desarrollo computacional, lo que permite obtener resultados simulados en breves espacios de tiempo. Actualmente, existen en el mercado una gran variedad de software para el modelado y análisis de modelos 3D. En este trabajo, se seleccionó el software Solidworks 2021, ampliamente extendido en la ingeniería profesional.

Solidworks es una aplicación de modelado 3D que permite el diseño de estructuras complejas siendo su campo de aplicación principal la ingeniería civil. Además, Solidworks dispone de complementos que se instalan y activan de forma independiente obteniendo resultados de simulación concretos. En este trabajo se utilizó el complemento "SOLIDWORKS Simulation", el cual permite simular los resultados de someter una estructura a fuerzas externas. Esta aplicación calcula el comportamiento de la estructura mostrando como resultado las formas modales y las frecuencias resonantes.

La aplicación se utilizó en la generación de un modelo 3D de la montura del telescopio JAST80 con la finalidad de poder simular esfuerzos que representen el comportamiento de la montura. La herramienta sirvió como método de validación de los resultados obtenidos del análisis espectral de las señales adquiridas de los acelerómetros.

4.3 Fundamentos teóricos

En el siguiente apartado se plantean herramientas de análisis espectral de señales basadas en transformada de Fourier como respuesta a las necesidades futuras. Además, se presenta una batería de filtros que ayudan a identificar los lóbulos principales del espectro representado. Estudios posteriores servirán para determinar el filtro que mejor se adapte a las necesidades propuestas. Por último, se hacen varios experimentos con transformada corta de Fourier (STFT, *Short Time Fourier Transform*).

4.3.1 Herramientas de análisis frecuencial

El procesado de señales consiste en el tratamiento, manipulación y análisis de señales digitales o analógicas y de la información que contienen mediante procesado matemático. Es por ello, que en este apartado se ensayan diferentes herramientas matemáticas con señales programadas que ayudarán a comprender los resultados de las señales obtenidas por los acelerómetros instalados en el telescopio.

Las herramientas de análisis frecuencial empleadas están basadas en la transformada de Fourier y en sus diferentes variantes. Los conceptos a revisar son: transformada de Fourier en tiempo discreto (DTFT, *Discrete-Time Fourier Transform*), transformada discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*), transformada rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) y STFT.

La DTFT $X(\omega)$ de una secuencia $x(n)$ es una función de valor complejo de la variable continua ω dada por:

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (1)$$

$X(\omega)$ es una señal periódica (de periodo 2π) que indica la cantidad de cada componente de frecuencia necesaria para sintetizar $x(n)$. Como $X(\omega)$ es una señal periódica de 2π , se puede utilizar cualquier intervalo de longitud 2π para representar la señal en el dominio de la frecuencia. Cuando el rango de valores de ω se elige entre $-\pi$ y π , se denomina representación de doble cara (*double sided*). En las representaciones de un solo lado (*single sided*), el rango de valores es $0 < \omega < \pi$. La frecuencia digital ω suele denominarse frecuencia normalizada.

A partir de ahora, se referirá a la frecuencia de las señales de tiempo continuo como frecuencia analógica y, por otro lado, se referirá a la frecuencia de las señales de tiempo discreto como frecuencia digital. Para

mayor claridad, se denota la frecuencia analógica con letras mayúsculas F (Hz) o $\Omega = 2\pi F$ (rad/s) y la frecuencia digital con letras minúsculas $\omega = 2\pi f$. La relación numérica entre las frecuencias analógicas y digitales viene dada por la frecuencia de muestreo F_s : $\omega = \Omega/F_s$ y $f = F/F_s$.

Dado que en las aplicaciones prácticas se puede tratar con un número finito de datos para representar una señal, la DFT denotada como $X(k)$, proporciona N muestras de $X(\omega)$ mediante una discretización dada por:

$$X(k) = X(\omega)|_{\omega=\frac{2\pi}{N}k} \quad (2)$$

$$k = 0, \dots, N - 1$$

La DFT puede calcularse a partir de N muestras de la secuencia $x(n)$ como sigue:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3)$$

$$k = 0, \dots, N - 1$$

La FFT no es más que una implementación computacionalmente eficiente de la DFT. Un ejemplo para comparar la DTFT y la DFT es el siguiente: sea $rect_L(n)$ un pulso rectangular de longitud L definido en términos de la función de paso $u(n)$:

$$rect_L(n) = [u(n) - u(n - L)] \quad (4)$$

La DTFT del pulso rectangular se puede obtener como:

$$RECT_L(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} rect_L(n) e^{-j\omega n} = \sum_{n=0}^{L-1} 1 e^{-j\omega n} = e^{-\frac{j\omega(L-1)}{2}} \frac{\sin\left(\frac{\omega L}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\omega}{2}\right)} \quad (5)$$

La Figura 4.8 muestra $rect_L(n)$, $RECT_L(\omega)$, y la DFT de la señal rectangular para $L = 7$ y $N = 32$.

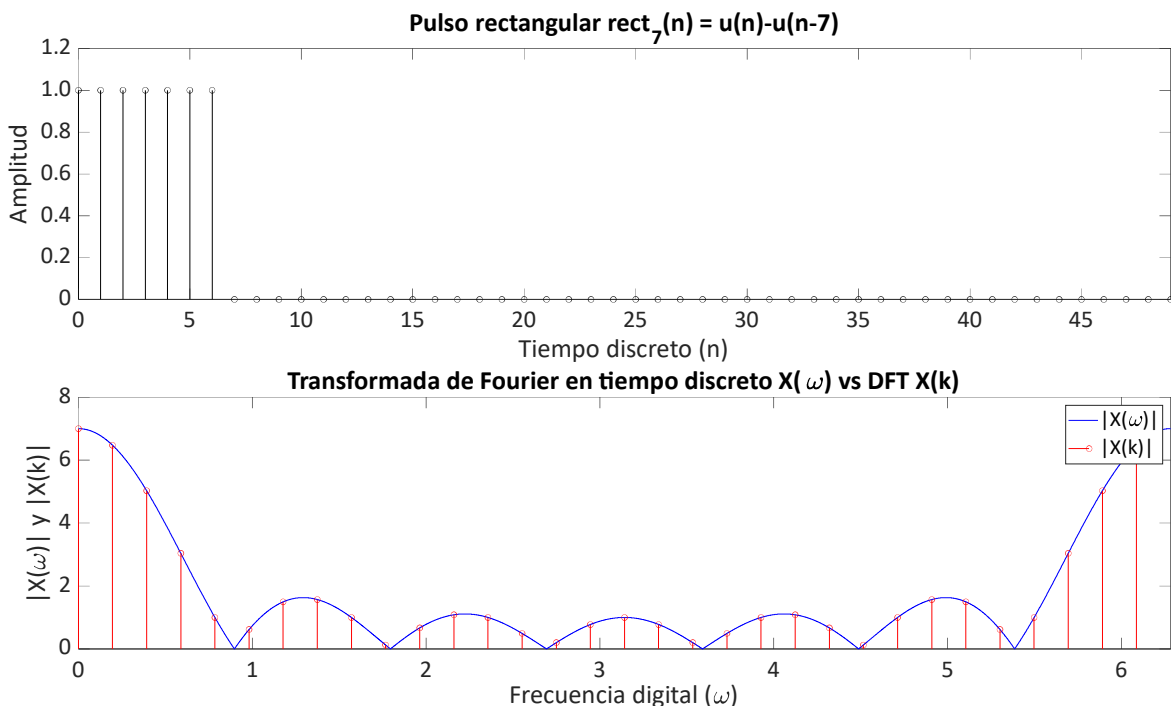


Figura 4.8. Parte superior (dominio del tiempo): Representación de la Ecuación 4. Parte inferior (dominio de la frecuencia): Representación de la Ecuación 5 en azul y representación de la ecuación 3 en rojo.

A la vista de los resultados anteriores, se establece el compromiso de resolución espectral establecido por el tamaño N de la FFT. Sea $a(t) = A \cos(2\pi F_0 t + \theta)$ una señal sinusoidal de tiempo continuo de frecuencia F_0 Hz. El proceso de muestreo puede considerarse como la sustitución de una variable de tiempo continuo t por un índice en tiempo discreto n , haciendo $t = n/F_s$, siendo F_s la frecuencia de muestreo [muestras/s]. Al hacerlo, se obtiene la señal en tiempo discreto $a(n) = A \cos(2\pi f_0 n + \theta) = A \cos(\omega_0 n + \theta)$. Se puede

obtener inmediatamente que la relación entre las frecuencias analógicas F_0 y digitales f_0 ; $\omega_0 = 2\pi f_0$ viene dada por $f_0 = F_0/F_s$.

Sea $A(k)$ la FFT de tamaño N de $a(n)$,

$$\begin{aligned} A(k) &= FFT[a(n)]; \\ k &= \frac{iF_s}{N}; \\ i &= 0, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (6)$$

Las muestras de frecuencia discreta de $A(k)$ se sitúan en frecuencias analógicas dadas por múltiplos enteros de F_s/N . Así, la representación espectral de un tono puro $a(t) = A\cos(2\pi F_0 t + \theta) = A\cos(\Omega_0 t + \theta)$ después de ser muestreado y procesado sería totalmente precisa sólo si su frecuencia F_0 corresponde a alguno de estos múltiplos jF_s/N ; $j = 0, \dots, N-1$. La estimación del error en la frecuencia está limitada por el peor caso que se da cuando F_0 se encuentra entre dos muestras de la FFT, siendo entonces este error máximo de estimación de $F_s/2N$ Hz.

Entonces, en cuanto al tamaño N del algoritmo FFT, la selección N determina la resolución espectral. El compromiso definido por la selección de este parámetro es claro: cuanto mayor sea N , mejor será la resolución espectral, pero como inconveniente, mayor será la complejidad computacional.

4.3.2 Enventanado de la FFT

Esta sección se centra en los ajustes de los parámetros que hay que realizar para obtener mediciones precisas en el dominio de la frecuencia. Algunos de los parámetros más relevantes son L , la longitud de una señal de tiempo discreto $x(n)$, N , el tamaño de la FFT y el tipo de ventana utilizada. Estos factores son clave para la precisión y resolución de las mediciones.

Sea $|A(k)|$ el módulo de la FFT de tamaño N de la secuencia $a(n)$, como se indica en la Ecuación 6. En lugar de representar este vector discreto de muestras $|A(k)|$ en el dominio de la frecuencia de doble cara, se sugiere tomar una representación sólo en frecuencias positivas (de una sola cara), $A_{ss}(k)$, de la secuencia como sigue:

$$\begin{aligned} |A_{ss}(k)| &= \frac{2|A(k)|}{N}, \\ k &= \frac{jF_s}{N}; \\ j &= 0, \dots, (N/2) - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

Para simplificar, en este apartado se presenta una señal sinusoidal $a(n) = A\cos(\omega_0 n + \theta) = A\cos(2\pi f_0 n + \theta)$. Utilizando el escalado propuesto por la Ecuación 7, se obtiene que el valor de pico del armónico en el dominio de la frecuencia se corresponde con la amplitud de la onda en el dominio del tiempo. Es decir, $\max\{A_{ss}(k)\} = \max\{a(n)\} = A$. En cuanto a la longitud de la señal, L , su duración finita puede interpretarse como, el proceso de enventanar una secuencia infinita $a_\infty(n)$ a través de una ventana rectangular con $rect_L(n)$ definido por la ecuación 4.

$$\begin{aligned} a(n) &= A\cos(2\pi f_0 n + \theta), \\ n &= 0, \dots, L-1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a_\infty(n) &= A\cos(2\pi f_0 n + \theta); \\ n &= -\infty, \dots, \infty \end{aligned} \quad (9)$$

$$a(n) = a_\infty(n)rect_L(n) \quad (10)$$

En el dominio de la frecuencia, la transformada de Fourier en tiempo discreto de $a_\infty(n)$ es:

$$A_\infty(\omega) = DTFT[a_\infty(n)] = A\pi e^{j\theta} \delta(\omega - \omega_0) + A\pi e^{-j\theta} \delta(\omega + \omega_0) \quad (11)$$

donde $\delta(\omega)$ representa la delta de Dirac en el dominio de la frecuencia. Por otro lado, la versión finita de la señal viene dada por el teorema de convolución:

$$\begin{aligned}
 A(\omega) &= A_{\infty}(\omega) * RECT_L(\omega) = \\
 &= \{A\pi e^{j\theta} \delta(\omega - \omega_0) + A\pi e^{-j\theta} \delta(\omega + \omega_0)\} * RECT_L(\omega) \\
 &= A\pi e^{j\theta} RECT_L(\omega - \omega_0) + A\pi e^{-j\theta} RECT_L(\omega + \omega_0)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

La comparación de las ecuaciones 11 y 12 refleja que la duración finita en el dominio del tiempo da lugar a la sustitución de los tonos puros, representados como deltas de Dirac en $A_{\infty}(\omega)$ por la transformada de Fourier del pulso rectangular $rect_L(n)$. $RECT_L(\omega) = DTFT[rect_L(n)]$ muestra un patrón “sinc” con un lóbulo principal centrado y lóbulos simétricos en sentido creciente y decreciente. Es conocido que cuanto más corta sea la ventana en el dominio del tiempo, más amplia será su transformada de Fourier.

La Figura 4.9 se muestra la representación en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia de una señal sinusoidal acotada por dos pulsos rectangulares de diferente longitud:

$$x_1(n) = \cos\left(\frac{2\pi n}{10}\right) rect_1(n) = \cos\left(\frac{2\pi n}{10}\right) [u(n) - u(n - 50)] \tag{13}$$

$$x_2(n) = \cos\left(\frac{2\pi n}{10}\right) rect_2(n) = \cos\left(\frac{2\pi n}{10}\right) [u(n) - u(n - 100)] \tag{14}$$

En la parte inferior de la Figura 4.9 se muestran los espectros de ambas señales utilizando la representación digital de frecuencias de *double sided* para comparar el efecto de las ventanas rectangulares en cuanto a la anchura de sus transformadas de Fourier.

Aparte de la fuga espectral de la señal en las proximidades de la frecuencia original $-2\pi f_0 = \omega_0 = 2\pi/10$, que depende de la anchura del lóbulo principal de la ventana rectangular, existe un efecto negativo secundario debido al enventanado. Esta consecuencia radica en la presencia de otros lóbulos que pueden ser malinterpretados.

El nivel entre el lóbulo principal y los lóbulos laterales no puede maximizarse cambiando la longitud de la ventana rectangular. Sin embargo, puede mejorarse eligiendo otro tipo de ventana. Otras ventanas proponen un compromiso entre la anchura del lóbulo principal y la relación lóbulos principales/laterales.

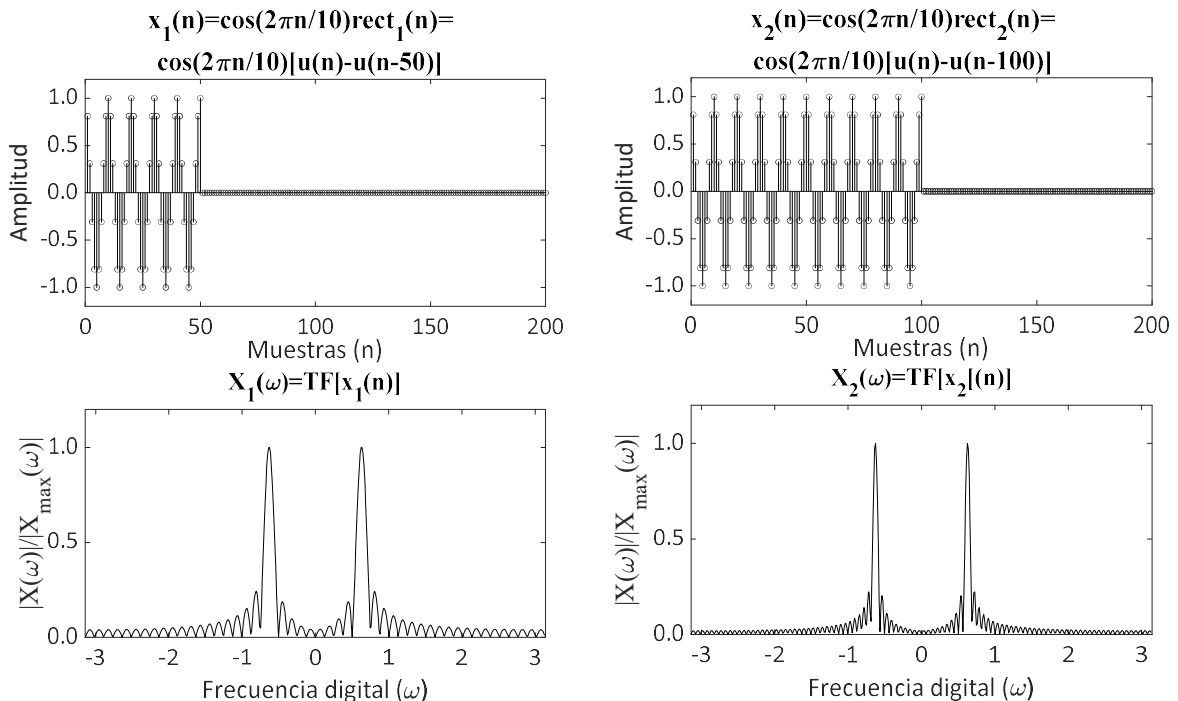


Figura 4.9. Efecto de la longitud de una ventana rectangular.

En la Tabla 4.5 se comparan las características de cinco ventanas utilizadas habitualmente. El compromiso establecido es el siguiente: la menor anchura del lóbulo principal corresponde a la ventana rectangular que presenta la peor relación entre el lóbulo principal y el secundario.

Tabla 4.5. Características de las ventanas de longitud L .

Eventanado	Anchura lóbulo principal (MLW)	Relación entre el lóbulo principal y el secundario (dB)
Rectangular	$4\pi/L$	-13
Bartlett	$8\pi/L$	-25
Hanning	$8\pi/L$	-31
Hamming	$8\pi/L$	-41
Blackman	$12\pi/L$	-58

La Figura 4.10 muestra la representación en el dominio del tiempo de las ventanas rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman. La Figura 4.11 muestra la representación en el dominio de la frecuencia de las ventanas rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman. Se pueden comprobar las características indicadas en la Tabla 4.5.

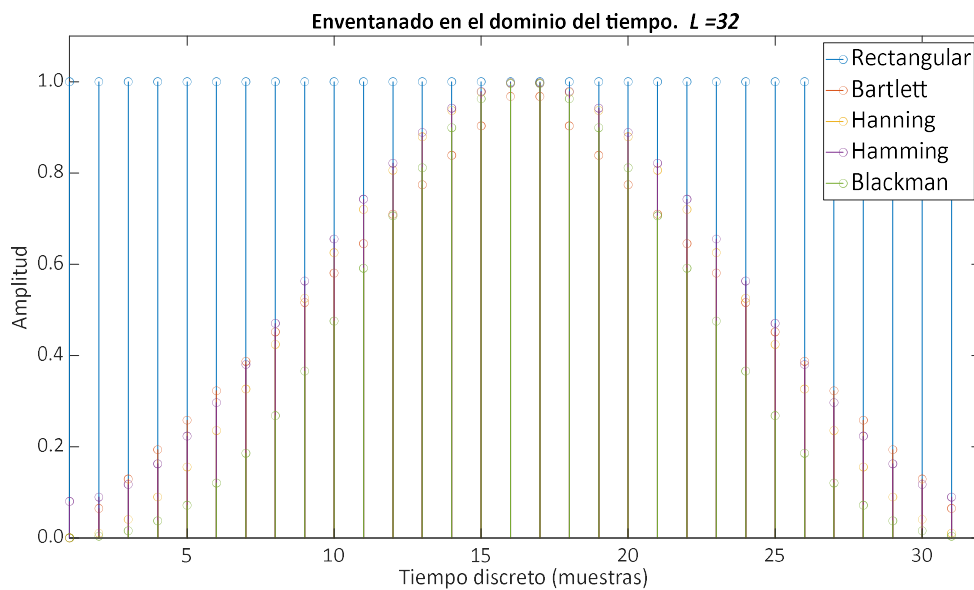


Figura 4.10. Representación en el dominio del tiempo de las ventanas rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman.

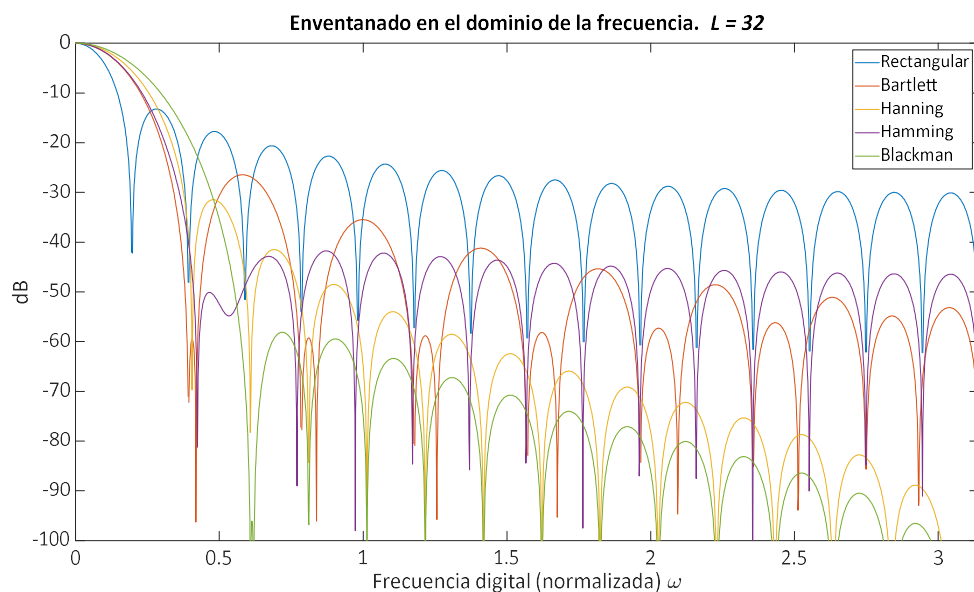


Figura 4.11. Representación en el dominio de la frecuencia de las ventanas rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman.

4.3.3 Short Time Fourier Transform

Las transformadas de Fourier (DTFT, DFT y FFT) son un conjunto de herramientas que proporcionan información sobre cómo se distribuye la energía de una señal en sus diferentes componentes de frecuencia. Es decir, permiten conocer todas las componentes espectrales existentes en la señal y sus respectivas contribuciones energéticas. Por tanto, la transformada de Fourier permite descomponer una señal y reconstruirla sin pérdida de información. Esto proporciona una buena resolución en frecuencia que la convierte en una herramienta muy útil para el análisis de señales estacionarias.

Sin embargo, la transformada de Fourier presenta el problema de su incapacidad inherente para analizar correctamente las señales que no son estacionarias en el tiempo: no puede aplicarse para obtener información precisa sobre el momento en que aparecen los distintos componentes espectrales en la señal. El comportamiento no estacionario es un fenómeno común que aparece en la mayoría de las señales. Para superar esta limitación, se recurre a una variante de las herramientas de Fourier: la STFT, en la que se analiza la señal y se obtiene información tanto del espectro de la señal como del instante de tiempo en el que están presentes esas frecuencias.

Para superar las limitaciones de las herramientas de Fourier, se introdujo un análisis diferente consistente en introducir una función de ventana de longitud determinada que se desliza sobre el eje temporal para ejecutar un análisis de Fourier localizado en el tiempo de los datos determinando por dicha ventana. Este enfoque, denominado STFT, fue presentada por primera vez en 1946 por D. Gabor [101].

El procedimiento consiste en dividir una señal en pequeños segmentos de tiempo suponiendo que para cada segmento de tiempo la señal es estacionaria y, así, calcular la transformada de Fourier estándar. Posteriormente se desliza el enventanado, con un cierto solapamiento con el enventanado anterior, cubriendo una nueva porción de la señal y calculando nuevamente su transformada de Fourier. La ventana salta sobre la señal original a intervalos de R muestras. La mayoría de las ventanas se atenúan en los bordes para evitar el anillamiento espectral. Si se especifica una longitud de solapamiento L distinta de cero, la superposición de los segmentos de la ventana compensa la atenuación de la señal en los bordes de la ventana. La transformada de Fourier de cada enventanado se añade a una matriz que contiene la magnitud y la fase para cada punto en el tiempo y la frecuencia.

La matriz STFT viene dada por:

$$\mathbf{X}(\omega) = [X(\omega, 1) \ X(\omega, 2) \ X(\omega, 3) \ \dots \ X(\omega, M)] \quad (15)$$

tal que el elemento matemático de esta matriz es

$$X(\omega, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)w(n - mR)e^{-j\omega n} \quad (16)$$

donde $w(n)$ es una función de ventana de longitud M ; $X(\omega, m)$ es la transformada de Fourier de los datos con ventana centrada en el tiempo mR ; R es el tamaño del salto entre las sucesivas transformadas de Fourier. El tamaño del salto es la diferencia entre la longitud de la ventana M y la longitud de solapamiento L .

El módulo de la STFT produce la representación del espectrograma de la densidad espectral de potencia de la función. A continuación, la función de ventana $w(n)$ se utiliza para calcular la STFT. Es aconsejable comprobar que la ventana satisface el cumplimiento del *Constant-Overlap-Add* (COLA). El cumplimiento de la COLA garantiza una reconstrucción perfecta para los espectros no modificados.

En las siguientes figuras se representa en el dominio del tiempo, varias señales con su respectiva STFT. En la Figura 4.12 se muestra la STFT de una señal formada por una corriente continua (CC) y cuatro armónicos: $x(t) = 1 + \cos(2\pi 3.5t) + \cos(2\pi 5t) + \cos(2\pi 10t) + \cos(2\pi 12.5t)$. Su comportamiento estacionario se refleja en la STFT mediante cinco líneas espectrales de intensidad constante.

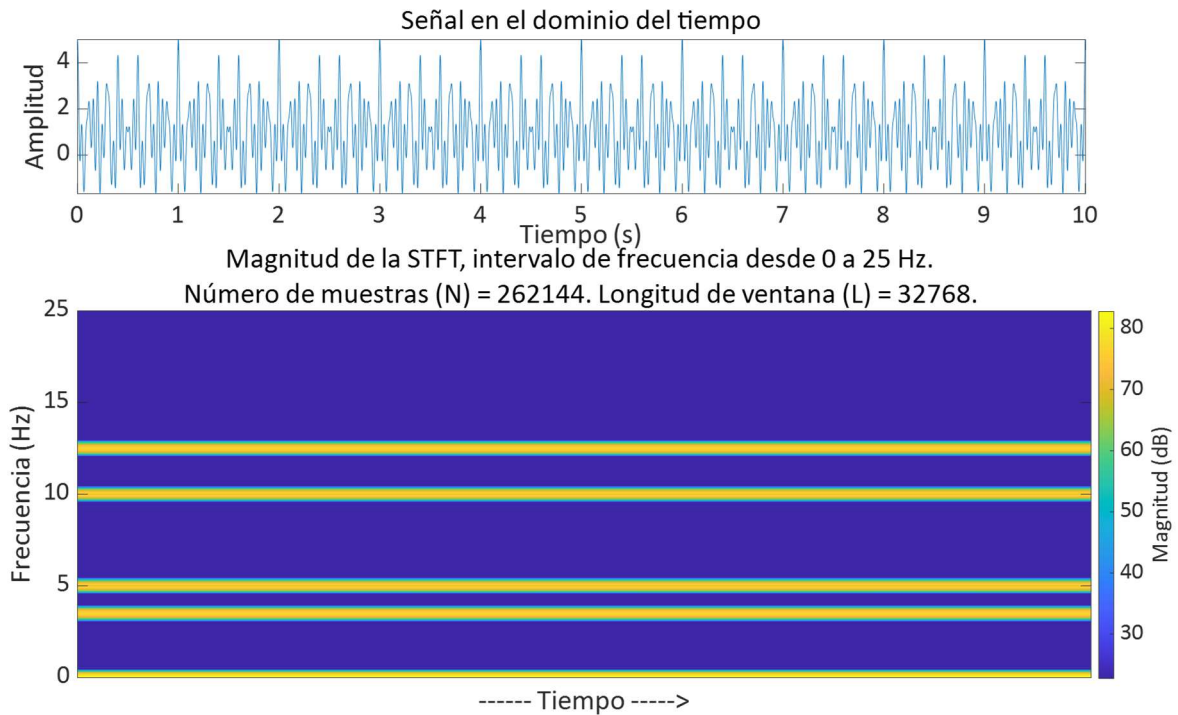


Figura 4.12. STFT de la señal $x(t) = 1 + \cos(2\pi 3.5t) + \cos(2\pi 5t) + \cos(2\pi 10t) + \cos(2\pi 12.5t)$.

En la Figura 4.13, se muestra la STFT de otra señal estacionaria cuyas amplitudes tiene diferentes valores: $x(t) = 1 + 2 \cos(2\pi 3.5t) + 4 \cos(2\pi 5t) + 8 \cos(2\pi 10t) + 16 \cos(2\pi 12.5t)$.

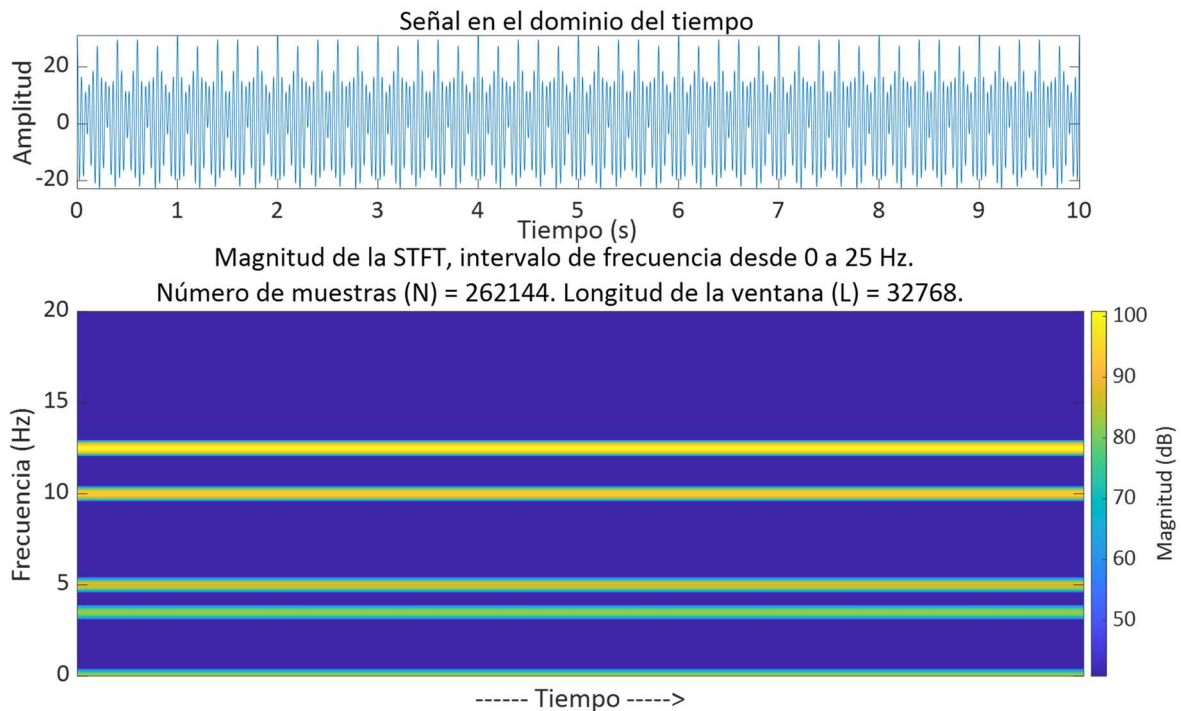


Figura 4.13. STFT de la señal $x(t) = 1 + 2 \cos(2\pi 3.5t) + 4 \cos(2\pi 5t) + 8 \cos(2\pi 10t) + 16 \cos(2\pi 12.5t)$.

Para mostrar el potencial de una representación STFT, en la Figura 4.14, se trata una señal modulada en amplitud dada por: $x(t) = kt(1 + \cos(2\pi 7t) + 2 \cos(2\pi 10t) + 3 \cos(2\pi 20t) + 4 \cos(2\pi 25t))$. La intensidad de las líneas del espectro se incrementan en el tiempo.

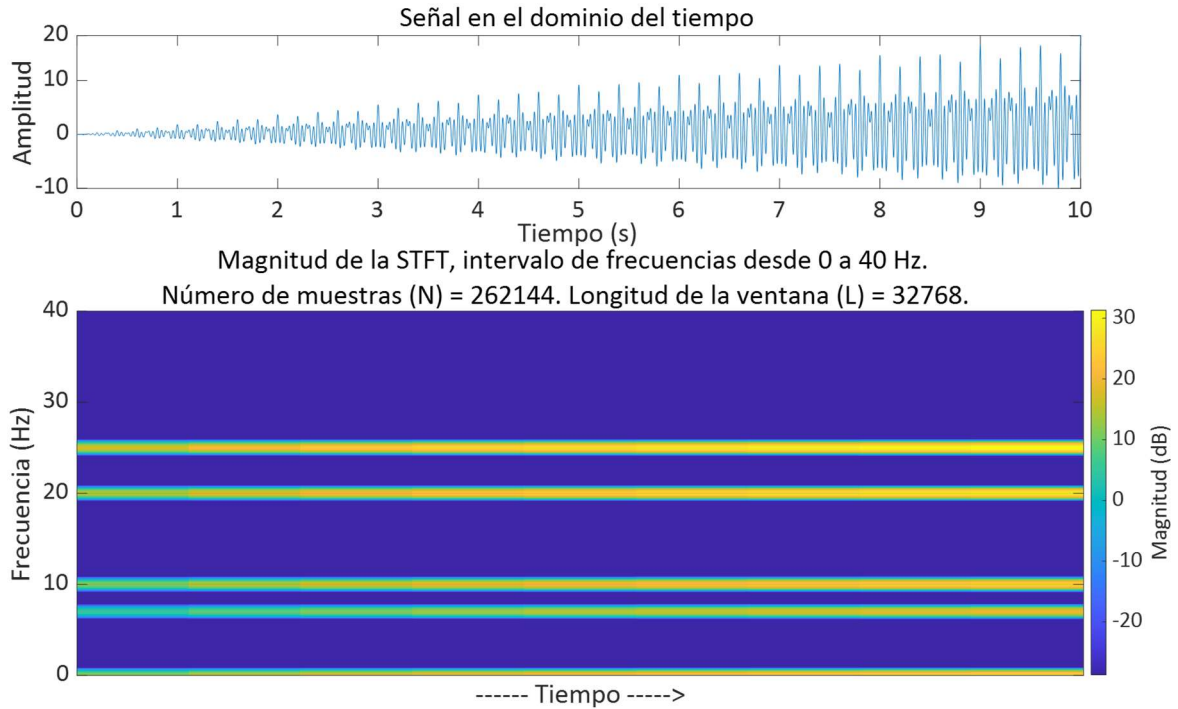


Figura 4.14. STFT de la señal $x(t) = k t (1 + \cos(2\pi 7t) + 2 \cos(2\pi 10t) + 3 \cos(2\pi 20t) + 4 \cos(2\pi 25t))$.

En la Figura 4.15 se representa una señal cuya frecuencia aumenta con el tiempo: $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con una ventana rectangular. En las Figuras 4.16 y 4.17 se mantiene la señal anterior y se eligen ventanas Hanning y Blackman, respectivamente. Los tres gráficos tienen en común un comportamiento de la frecuencia creciente, pero el tipo o la ventana elegida afecta a la anchura del lóbulo principal y a la relación entre lóbulos principales y secundarios.

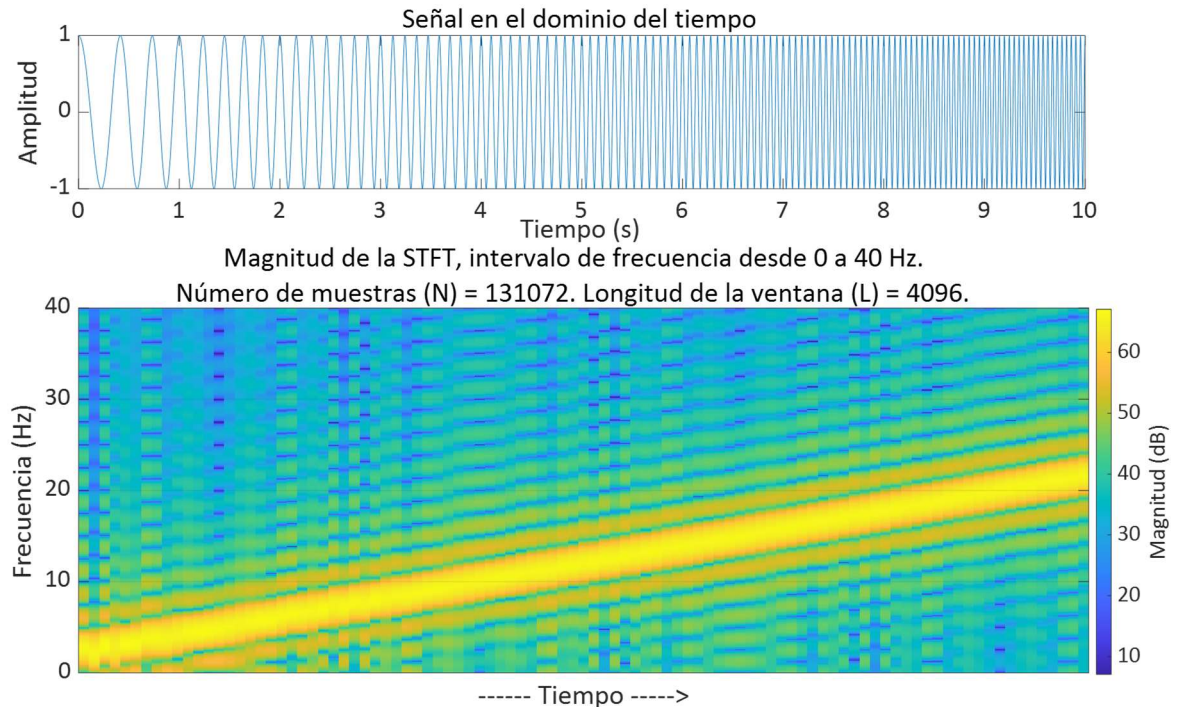


Figura 4.15. STFT de la señal $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con ventana rectangular.

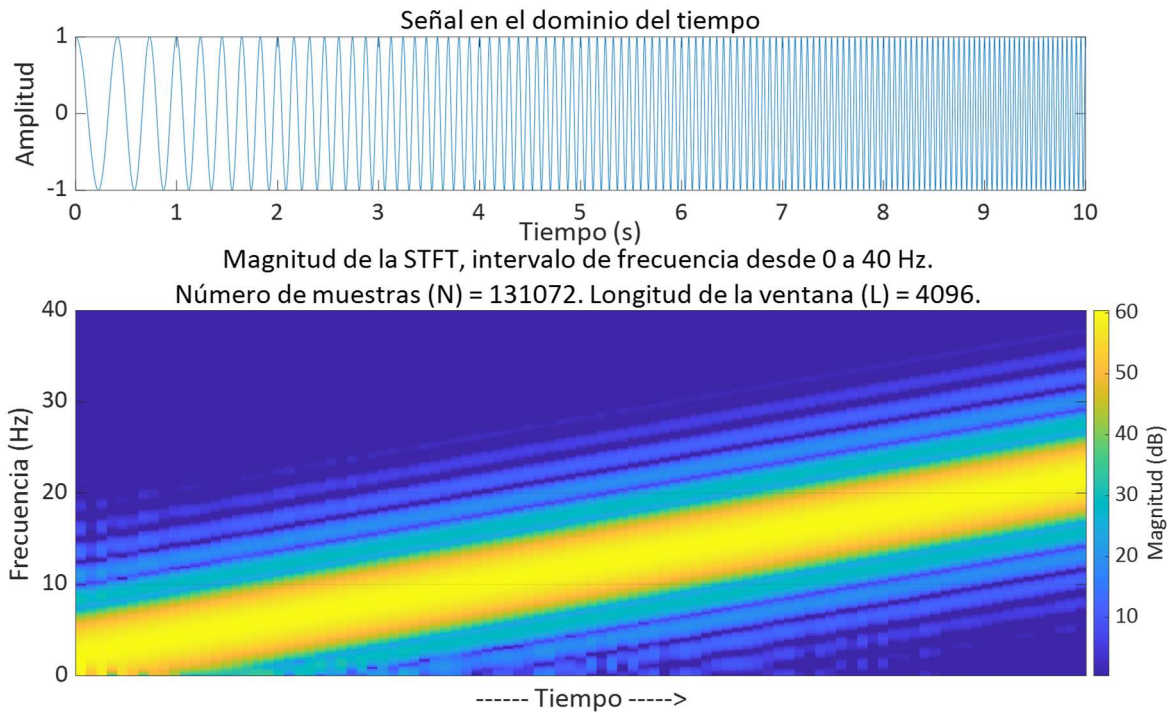


Figura 4.16. STFT de la señal $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con ventana Hanning.

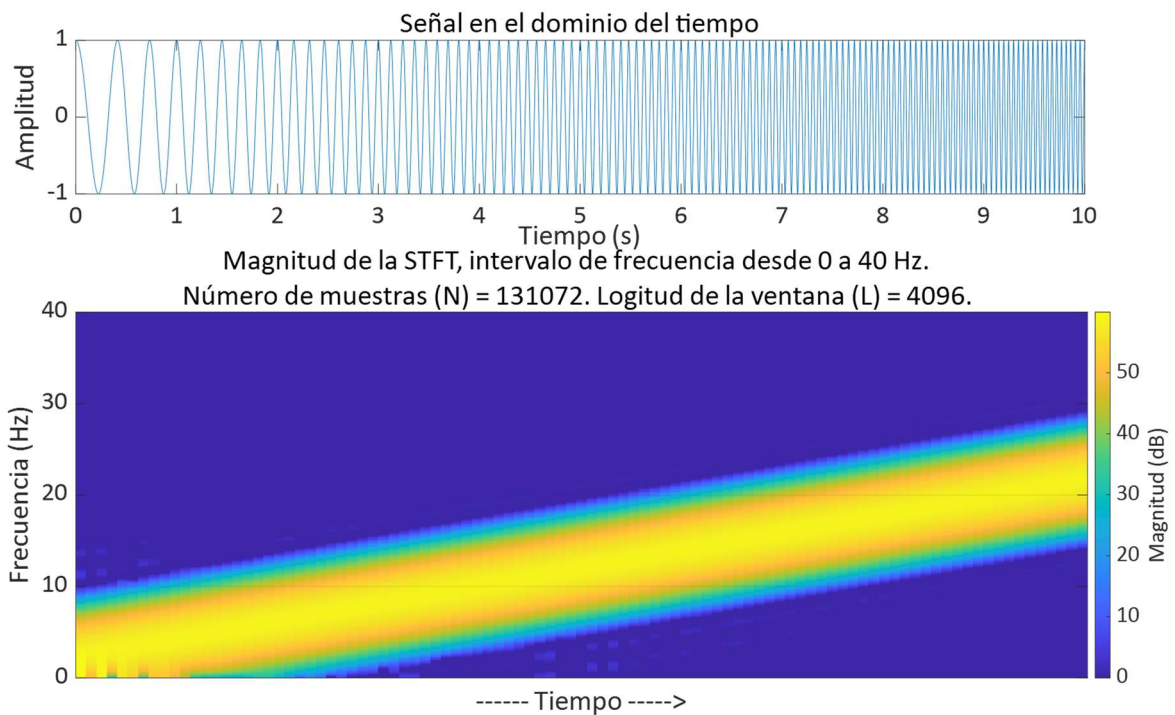


Figura 4.17. STFT de la señal $x(t) = \cos(2\pi 2(1 + \Delta_f)t)$ con ventana Blackman.

Análisis de la vibración en los
dominios temporal y frecuencial

5

5. Análisis de la vibración en los dominios temporal y frecuencial

Los acelerómetros registran las variaciones de aceleración de una perturbación mostrando su comportamiento a lo largo del tiempo. Esta es una buena perspectiva para conocer cómo evoluciona el movimiento del telescopio en modo *slewing*, pero no es suficiente para conocer toda la información que contiene. Un análisis en el dominio de la frecuencia permitirá obtener cuáles son las frecuencias dominantes. En el análisis se verá el problema de la CC acoplada a las señales y la necesidad de su eliminación.

5.1 Movimientos y pruebas en el telescopio JAST80

Inicialmente, las vibraciones captadas por los acelerómetros en la FSU cuando el telescopio está parado no superan los 5 mg, lo cual es un valor despreciable en comparación con el límite compatible con la instrumentación T80Cam de 1 g. Estas vibraciones tienen varias causas, como las generadas por el terreno y transmitidas a través de la cimentación hasta la montura del telescopio, o bien por las producidas por instalaciones auxiliares como el sistema de refrigeración de la T80Cam, tal y como se explica en el estudio de D. Adams et al. [12]. En este último caso, el líquido refrigerante se bombea por el conducto de impulsión y vuelve al recuperador por el circuito de retorno. A su paso por los conductos instalados por dentro y fuera de la montura, el líquido refrigerante produce una fricción en el interior del conducto e intercambiador generando turbulencias y por tanto vibración.

El objeto de la investigación no es identificar las vibraciones producidas por elementos externos o internos al telescopio cuando está parado, sino las vibraciones producidas cuando los actuadores se activan en modo *slewing*. Por tanto, es necesario realizar una colección de movimientos de captación de señales para su estudio *offline*.

El telescopio cuenta con múltiples actuadores empleados durante las maniobras de operación, mantenimiento y parking. En la tabla 5.1 se muestran todos los movimientos. Una pormenorización en detalle de los experimentos realizados de cada bloque se encuentra en el Anexo I.

Tabla 5.1. Movimientos del Telescopio JAST80.

Movimiento	Descripción	Momento de uso
AR	Movimiento de ubicación astronómico.	Posicionamiento a coordenadas, seguimiento de posición durante la observación, posición de parking y mantenimiento.
DEC	Movimiento de ubicación astronómico.	Posicionamiento a coordenadas, seguimiento de posición durante la observación, posición de parking y mantenimiento.
FSU	Selección de filtro.	Movimiento de preparación del telescopio antes de la observación.
Mirror cover	Cubierta de protección de la T80Cam	En arranque y parada del telescopio para las observaciones programadas.
Obturador	Enfoque de las lentes en la preparación del telescopio.	Antes de cada una de las observaciones.
Hexápodo	Alineación de los fotones y corrección de imagen.	Antes de cada una de las observaciones.
Cúpula	Estructura de seguimiento del telescopio para abrir la sala al exterior.	En arranque y parada del telescopio para las observaciones programadas.

Las pruebas consistieron en movimientos concretos de cada uno de los actuadores en diferentes posiciones (ver Tabla 5.2). El tipo de movimiento fue a propuesta del equipo de ingeniería del OAJ-CEFCA, de acuerdo con los movimientos más característicos de los ejes del telescopio. Cada movimiento está identificado con un número de prueba que servirá de guía en el resto de la investigación para su identificación.

Tabla 5.2. Resumen pruebas realizadas.

Movimiento	Prueba	Observaciones
DEC	1-2	Se incluye movimiento de cúpula
AR	3-15, 22	Se incluye movimiento de cúpula
FSU	16-20	Movimientos de cada una bandeja de filtros y simultáneamente
Obturador	21	
Cortina espejo	23-24	Movimientos de apertura y cierre
Hexápodo	25-26	Movimiento en tip y tilt

Las pruebas realizadas se grabaron utilizando la comunicación descrita en el Apartado 4.2 “Métodos: Herramientas software”. El almacenamiento de los datos se realizó en un fichero Matlab. Éste contiene los datos de todas las pruebas realizadas durante la sesión de grabación. Las características de adquisición de cada prueba fueron: tres canales de adquisición simultáneos 0-1-2, $F_m = 10.240$ m/s y duración de la grabación 60 s.

5.2 Análisis en el dominio del tiempo

Las pruebas realizadas por los actuadores en los ejes AR y DEC consistieron de movimientos independientes o combinados. Se definió una posición de partida y se hizo desplazar a un ángulo concreto cada uno de los ejes. A continuación, se muestra en la Figura 5.1 las señales en el dominio temporal de los tres acelerómetros en un movimiento en DEC de 0° a 40° y AR en 0° Prueba 2 del Anexo I.

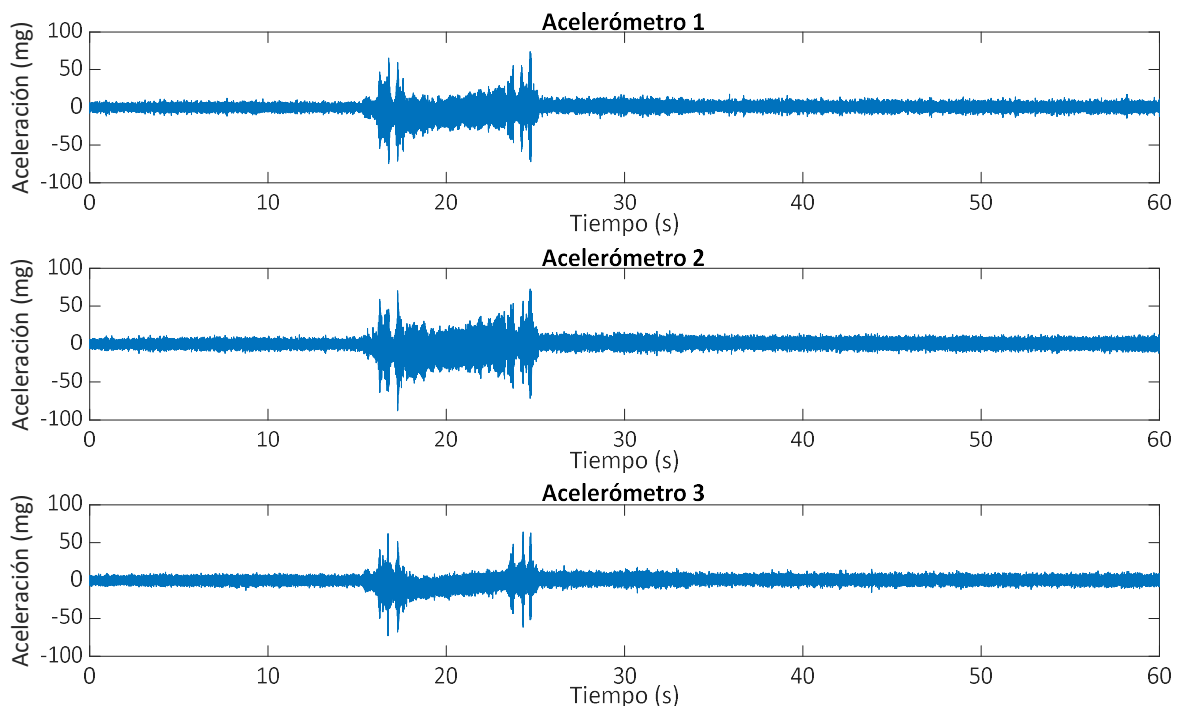


Figura 5.1. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en DEC de 0° a 40° y AR en 0° . Correspondiente a Prueba 2 del Anexo I.

En la Figura 5.1 se observa que las tres señales de los acelerómetros son similares en forma y amplitud. En la Figura 5.2 se distinguen las diferentes fases de aceleración. Partiendo de una posición de reposo, se produce una vibración más acentuada debida a la aceleración necesaria para alcanzar la velocidad máxima del desplazamiento según programación de la unidad de control. A continuación, se observa una disminución de la amplitud de la vibración a velocidad constante para volver a aumentarla por la deceleración hasta alcanzar velocidad cero, permaneciendo finalmente en reposo. Se observa como aparece una deriva de CC en la zona de velocidad constante.

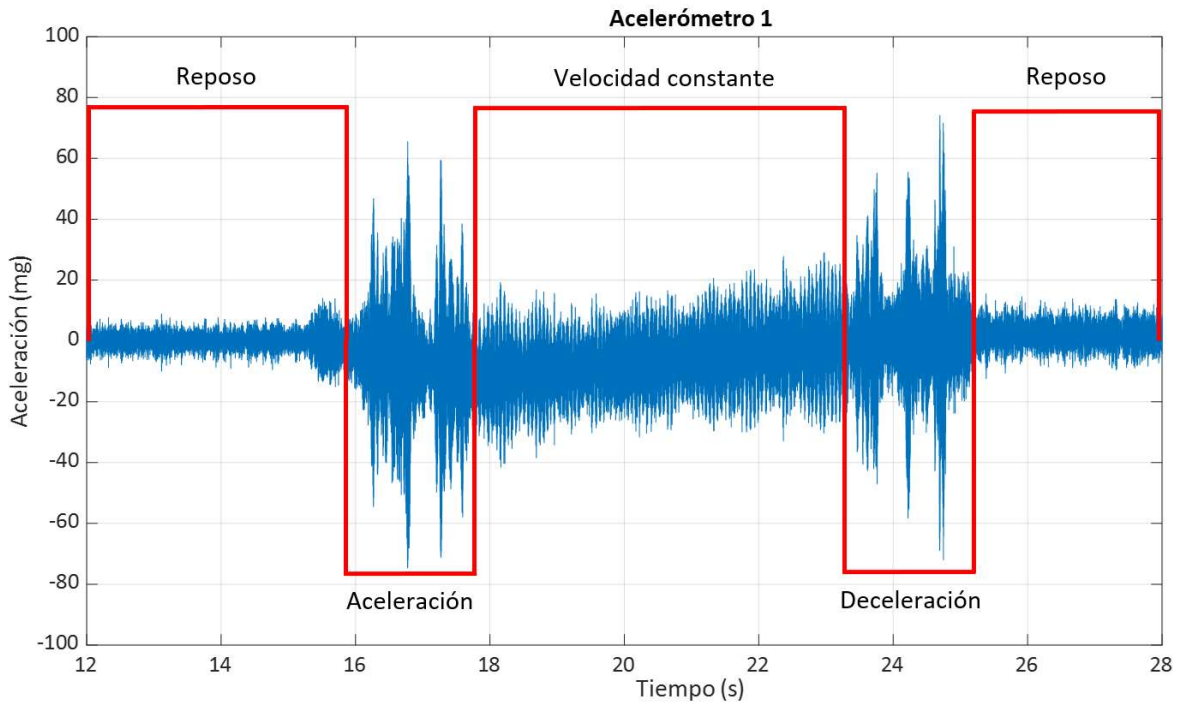


Figura 5.2. Fases del movimiento en DEC de 0° a 40° y AR en 0° . Correspondiente a Prueba 2 del Anexo I.

En la Figura 5.3 se muestra un movimiento en AR de 0° a -40° y DEC en 40° , correspondiente a la Prueba 5 del Anexo I. Se aprecia que la forma de la señal es similar al movimiento en DEC, pero las amplitudes son significativamente superiores, aunque lejos del límite de ruptura establecido en 1 g. Una mayor amplitud implica una mayor capacidad de excitación de las frecuencias de resonancia de la montura. Toda estructura tiene frecuencias naturales, que, cuando la energía de la vibración inducida sobre la montura es coincidente con las frecuencias naturales de la estructura, ésta se excita pudiendo llegar a colapsar.

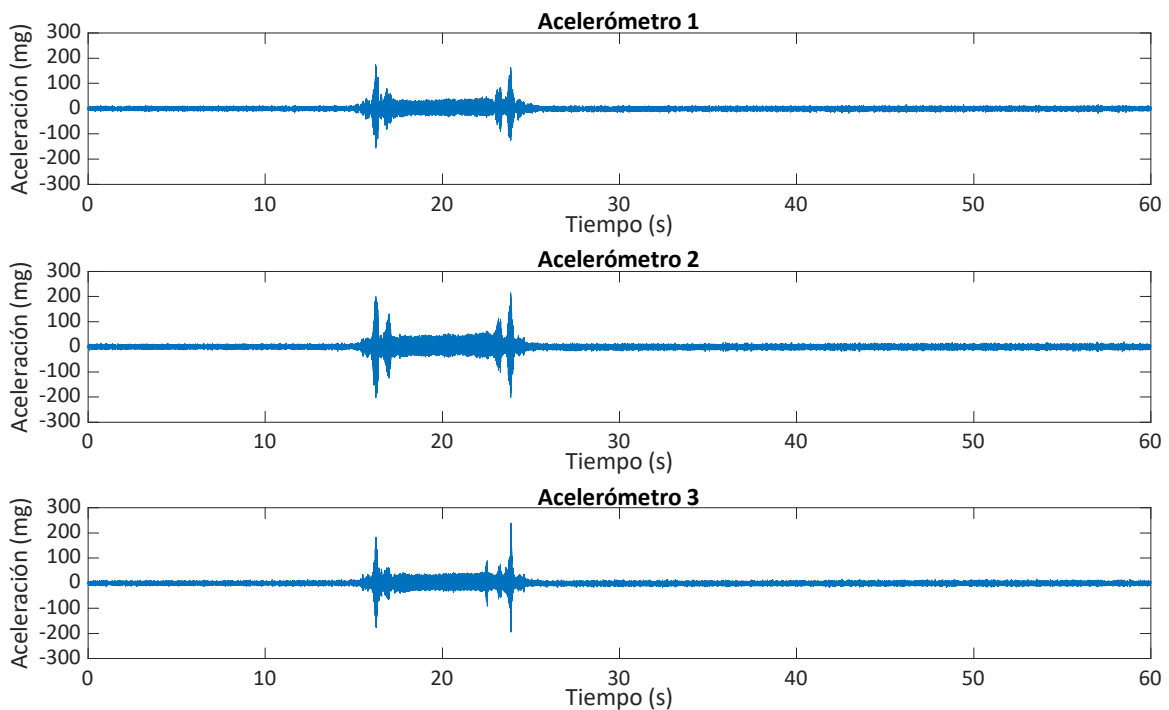


Figura 5.3. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a -40° y DEC en 40° . Correspondiente Prueba 5 del Anexo I.

Por otro lado, la observación de cuerpos celestes requiere tiempos de exposición prolongados, lo que implica que el punto de observación se mueva a la misma velocidad que la rotación de la Tierra. Por lo tanto, el telescopio debe corregir continuamente la posición de la instrumentación para mantener el plano focal

centrado en el punto del universo observado. Aunque los movimientos de *tracking* pueden parecer críticos en el telescopio, son los movimientos de *slewing* los que más preocupan debido a las mayores amplitudes de las vibraciones que llegan a la instrumentación.

Durante la sesión de adquisición de señales, el software de control detectó tres anomalías técnicas provocando la detención del movimiento del telescopio por emergencia. La Figura 5.4 muestra un desplazamiento correspondiente a la Prueba 3 del Anexo I con un movimiento AR de 0° a 90° y DEC en 40° , en el que se produjo una detención brusca al comienzo del movimiento. Los valores de amplitud obtenidos son del orden de 400 mg, mientras que el tiempo del evento se redujo en poco más de un segundo. El evento se produjo durante la aceleración para alcanzar la velocidad constante desde la posición inicial en reposo del telescopio, lo que generó un par máximo del actuador en el arranque.

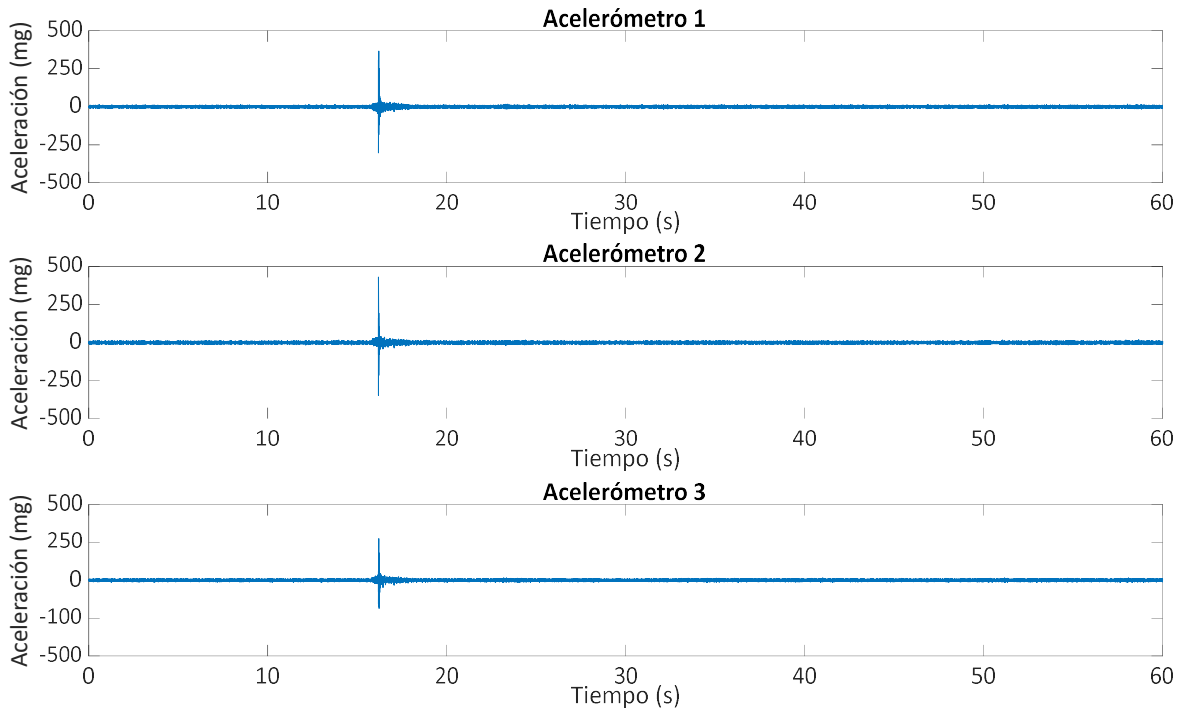


Figura 5.4. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40° con parada inesperada por emergencia. Correspondiente a Prueba 3 del Anexo I.

En la Figura 5.5 se muestra el movimiento correspondiente a la Prueba 4 del Anexo I con AR de 0° a 40° y DEC en 40° . Este movimiento tiene las mismas características que la Figura 5.4 pero con amplitudes inferiores (del orden de 100 mg). Esto se debe a que el tiempo transcurrido entre el inicio del movimiento y la parada brusca por emergencia es inferior. Además, la aceleración empleada en este movimiento es menor que en el movimiento anterior debido a que se trata de un desplazamiento más corto. Es importante aclarar que los valores de aceleración para alcanzar la velocidad constante se determinan por el sistema de control de los actuadores en función de la distancia a recorrer.

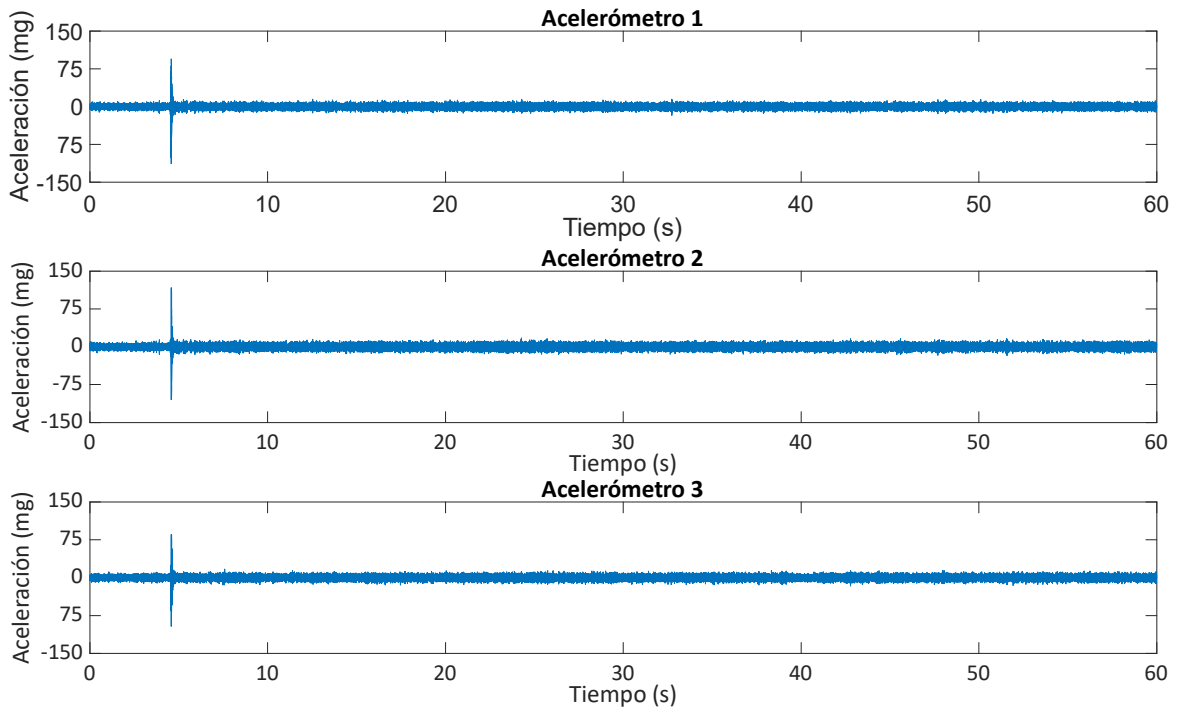


Figura 5.5. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a 40° y DEC en 40° con parada inesperada por emergencia. Correspondiente a Prueba 3 del Anexo I.

En la Figura 5.6 se muestra un movimiento correspondiente a la Prueba 12 del Anexo I con AR de 0° a 90° y DEC en 40° . En este caso la parada por emergencia se produce al comenzar la desaceleración del movimiento. El sistema no para bruscamente sino que se queda en un movimiento amortiguado hasta que se detiene.

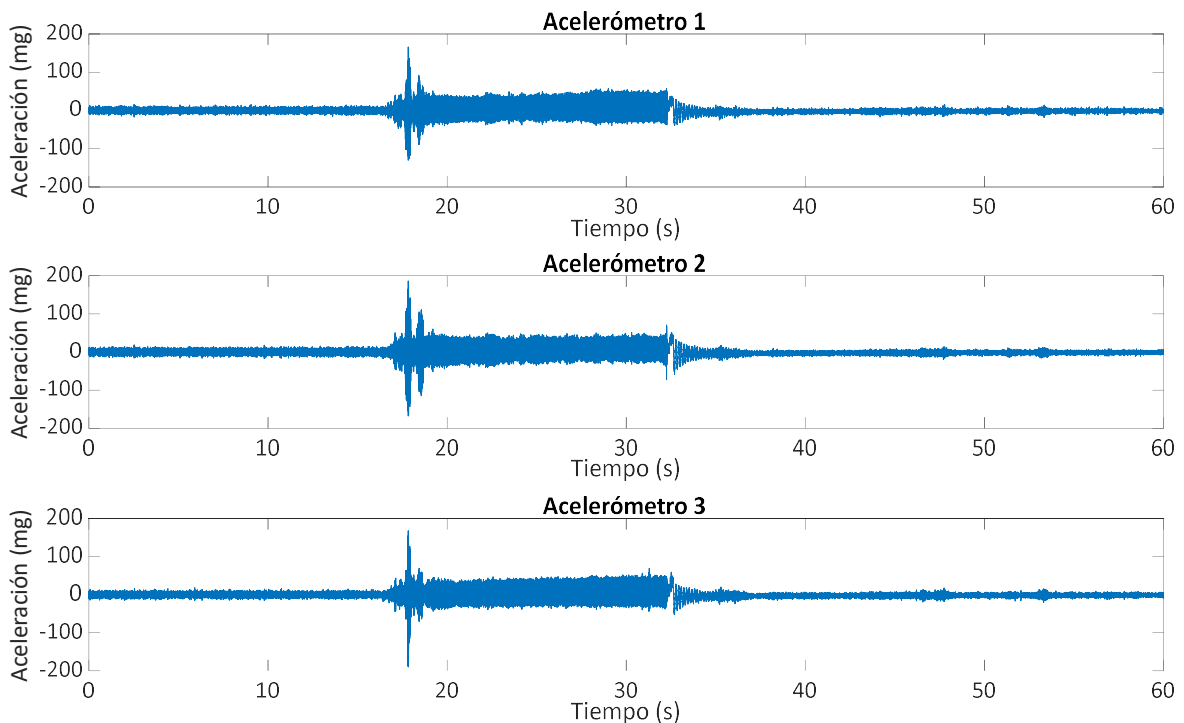


Figura 5.6. Señales en el dominio del tiempo de los tres acelerómetros en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40° con parada inesperada por emergencia. Correspondiente a Prueba 12 del Anexo I.

Los movimientos de los actuadores de la cortina del espejo primario no se muestran trascendentes para la instrumentación. Su función es proteger la superficie reflectante del espejo primario de posibles proyecciones de material que puedan dañarla. Estos movimientos se realizan al inicio y al final de cada

observación. Los actuadores del hexápodo permiten ajustar la trayectoria de los fotones hacia la instrumentación antes y durante la exposición, para corregir posibles deformaciones de la estructura en el seguimiento de las coordenadas astronómicas. Estos movimientos son del orden de micrómetros y se realizan esporádicamente. La FSU se activa antes de cada observación con el objetivo de seleccionar el filtro adecuado para el experimento programado. Durante la observación no interviene y no influye su movimiento en la calidad de imagen. Por su parte, el obturador, al igual que la cortina del espejo primario, se accionan en ocasiones determinadas. Su función es permitir que los fotones incidan en la instrumentación. Se activa una vez ubicado el telescopio en el punto de observación y hasta que finaliza el tiempo de exposición.

Durante las pruebas realizadas en los últimos actuadores citados, no se observaron aceleraciones destacables por encima del ruido observado cuando el telescopio está parado. Por tanto, no se estudiarán ya que no aportan datos relevantes.

5.3 Análisis en el dominio frecuencial

Las frecuencias que componen las señales de las vibraciones de los acelerómetros durante los movimientos de los actuadores pueden ser susceptibles de interferir con las frecuencias naturales de la montura. Con las herramientas de la transformada de Fourier descritas en el Capítulo 4 se dará una visión, en el dominio frecuencial, del comportamiento del telescopio. Utilizando la FFT se analizan las señales de los acelerómetros en diferentes pruebas. En las Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11 se representan señales correspondientes a movimientos del banco de pruebas. La Figura 5.7 corresponde a un movimiento en DEC, la Figura 5.8 a un movimiento en AR y las Figuras 5.9, 5.10, 5.11 a movimientos por parada brusca por emergencia.

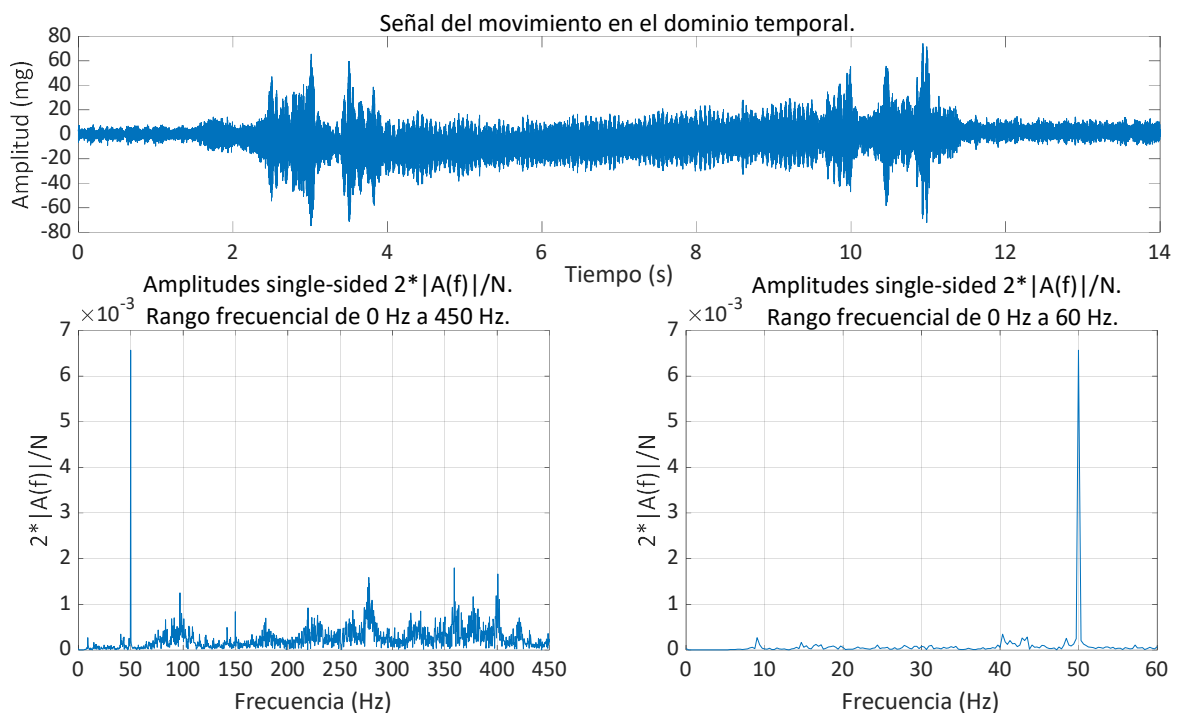


Figura 5.7. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR en 0° y DEC 0° a 40° . Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 2 del Anexo I.

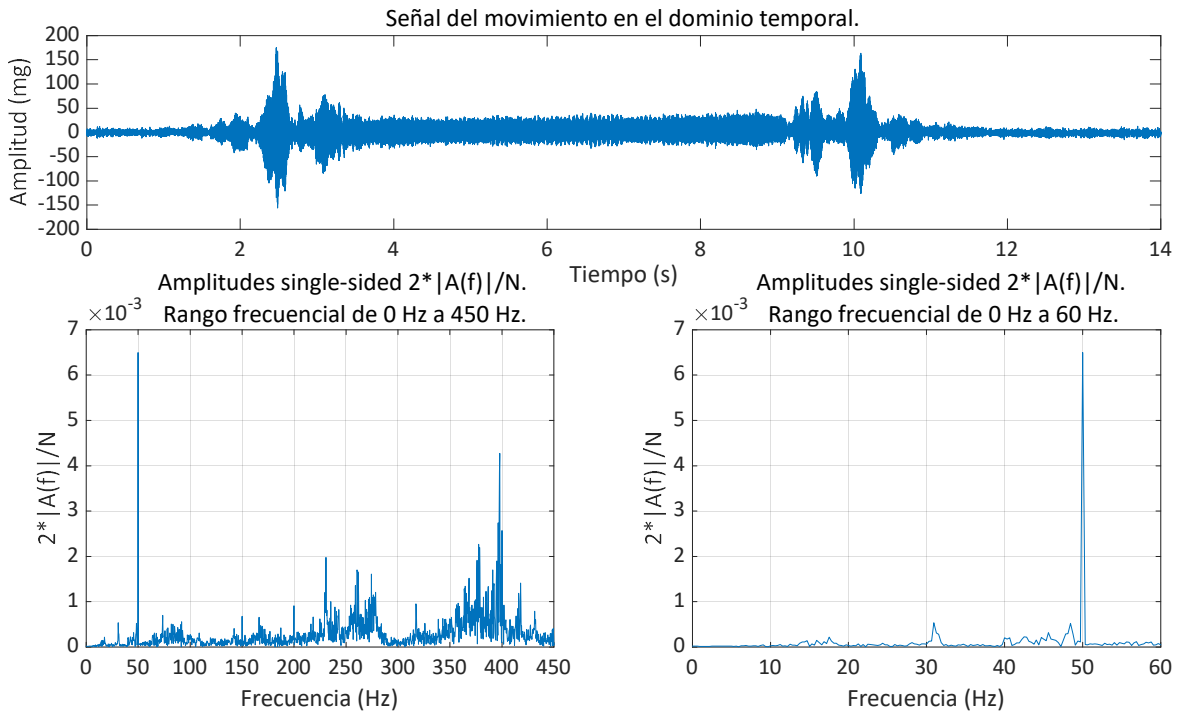


Figura 5.8. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a -40° y DEC en 40° . Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 5 del Anexo I.

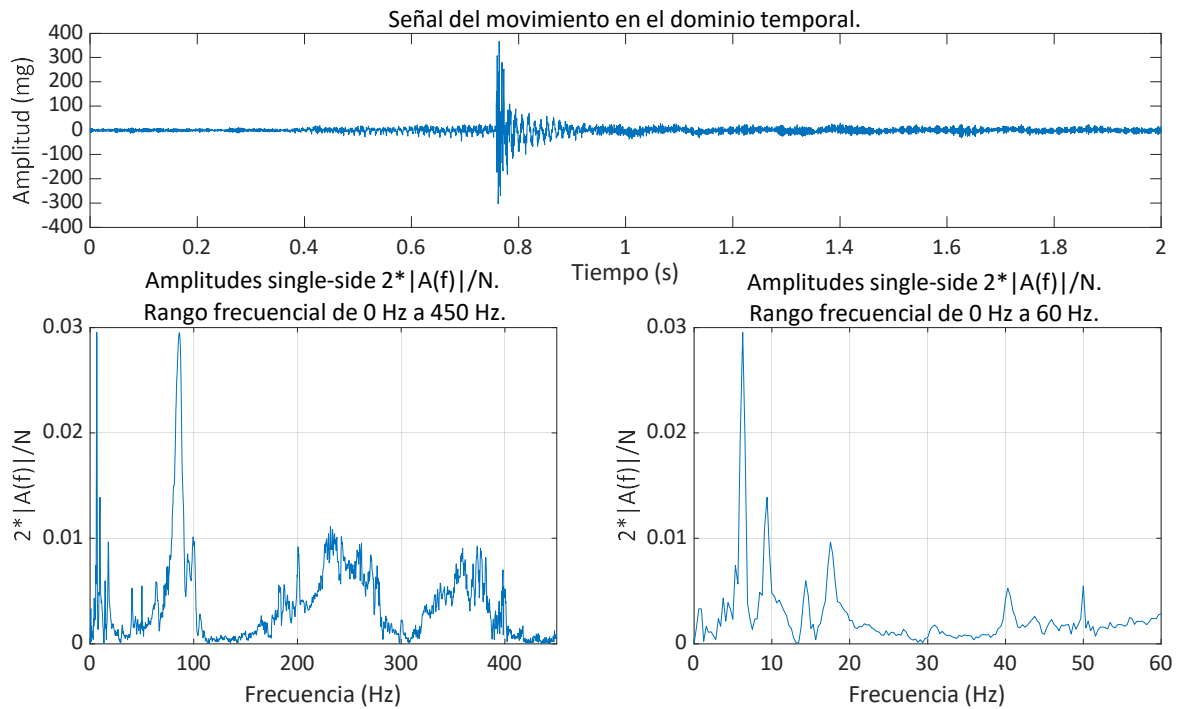


Figura 5.9. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40° . Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 3 del Anexo I.

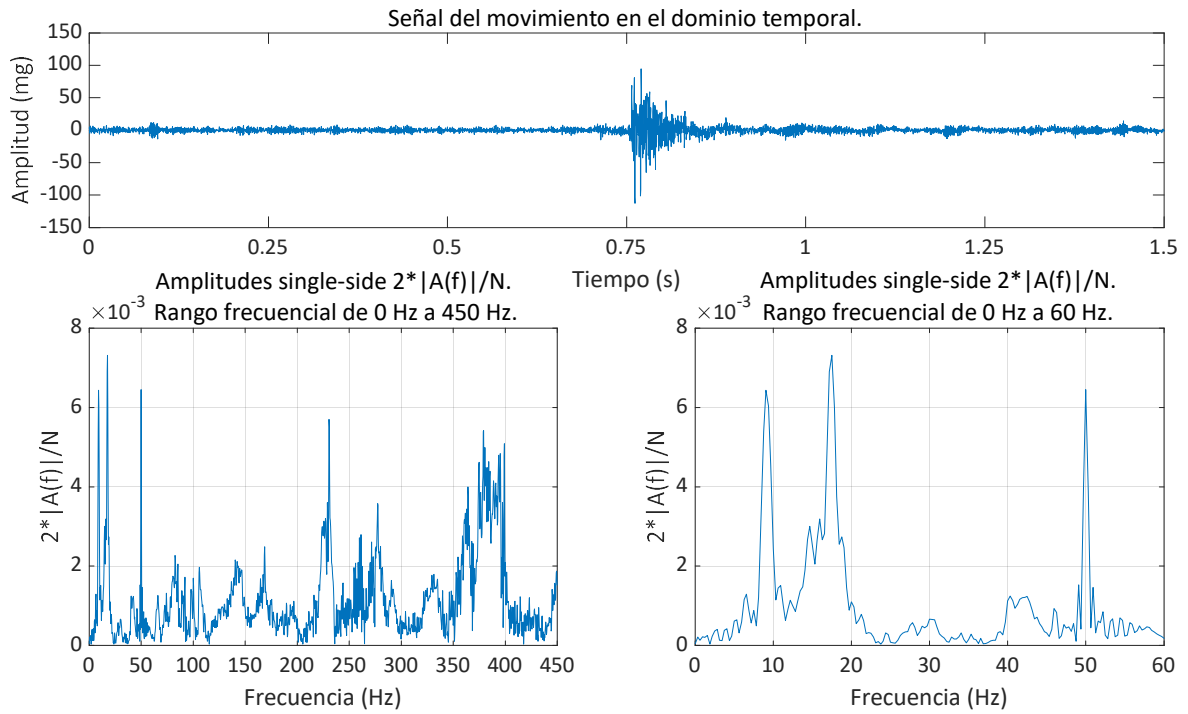


Figura 5.10. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a 40° y DEC en 40° . Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 4 del Anexo I.

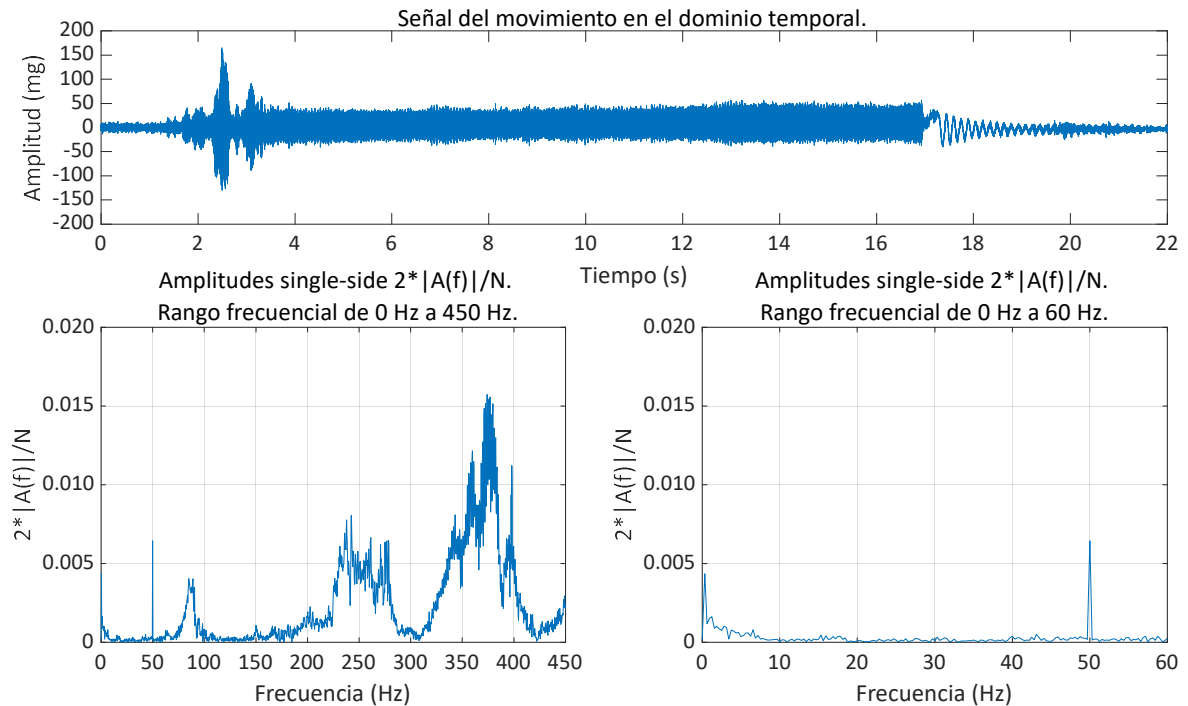


Figura 5.11. Arriba señal en el dominio del tiempo en un movimiento en AR de 0° a 90° y DEC en 40° . Abajo a la izquierda, señal en el dominio de la frecuencia hasta 450 Hz. Abajo a la derecha, señal en el dominio de la frecuencia hasta 60 Hz. Correspondiente a Prueba 12 del Anexo I.

En las figuras se observa (gráfica superior) la señal en el dominio del tiempo del movimiento. En las gráficas 5.7 y 5.8 no se llega a superar los 80 mg y 200 mg respectivamente, mientras que en las gráficas 5.9 y 5.10 correspondientes a una parada brusca por emergencia, las amplitudes llegan a 300 mg y 100 mg, respectivamente. Por el contrario, la amplitud de la señal en la Figura 5.11 es de aproximadamente 150 mg, terminando el desplazamiento con un movimiento de oscilación libre. En cuanto a las gráficas inferiores de cada figura, se tiene la representación de la señal en el dominio de la frecuencia. La representación en

amplitud está en $2 * |A(f)|/N$, nomenclatura perteneciente a una señal en *single-sided*. Los límites frecuenciales vienen determinados en la gráfica izquierda por el límite de frecuencia del acelerómetro y en la gráfica derecha por el límite frecuencial basado en los rangos frecuenciales tal y como se ha visto en el Capítulo 2.

En las Figuras 5.7, 5.8 y 5.11 no se aprecian frecuencias destacables a excepción del valor de 50 Hz de acoplamiento de la frecuencia de la red eléctrica de alimentación de los actuadores. Por el contrario, en las Figuras 5.9 y 5.10 se muestran frecuencias con amplitudes superiores al valor de 50 Hz de la red eléctrica, destacando las amplitudes de la Figura 5.9. La señal de la Figura 5.12 no aporta datos relevantes por debajo de los 60 Hz.

5.4 Discusión

De los experimentos realizados con las señales seleccionadas en este capítulo, se observa como la vibración aumenta en los periodos de aceleración en los tiempos de arranque y parada de los movimientos de los actuadores. Por el contrario, durante el desplazamiento a velocidad constante la vibración disminuye (ver Figura 5.2). Por otro lado, se muestra una superposición de la CC por deriva en los acelerómetros. Esto distorsiona los valores máximos de aceleración y pueden afectar en el análisis frecuencial. Este efecto se agudiza en los movimientos en DEC (Figura 5.1).

De igual modo, se observa que las pruebas realizadas en modo *slewing* evidencian amplitudes con valores alejados a 1 g. En movimientos en AR se aprecian mayores amplitudes con respecto a los movimientos en DEC. En los movimientos en los que ocurre una parada de emergencia inesperada (Figura 5.4), se observan las mayores amplitudes de aceleración en el dominio temporal de todas las pruebas realizadas.

En el análisis espectral de los movimientos en AR no se evidencian frecuencias sobresalientes que puedan afectar a la instrumentación o a la propia estructura del telescopio. Se observan amplitudes en el dominio frecuencial destacables en las dos pruebas en las que se produce una parada inesperada por emergencia (Figuras 5.9 y 5.10). Estas señales serán las que aporten mayor información en el desarrollo de la tesis para la validación de un modelo 3D simplificado.

Modelado 3D y frecuencias
naturales de la montura

6

6. Modelado 3D y frecuencias naturales de la montura

La obtención de un modelo 3D correspondiente a un sistema real que proporcione sus frecuencias naturales es esencial para ensayar su comportamiento ante posibles estímulos. Un modelo es una abstracción teórica de la realidad cuyo objetivo es facilitar su comprensión y realizar una evaluación realista de su comportamiento. A la hora de desarrollar un modelo, hay que tener en cuenta el compromiso que se establece entre fidelidad, modelos suficientemente precisos, y manejabilidad, modelos sencillos. En el caso de un sistema tan complejo como un telescopio profesional se desarrolla un modelo fiable y manejable que permita estimar las frecuencias naturales de la montura. Disponer de un modelo preciso también permite desarrollar estrategias de rechazo de resonancias de baja frecuencia basadas en técnicas activas [102].

6.1 Modelado 3D del telescopio JAST80 del OAJ

En este capítulo se presenta un modelo tridimensional de la estructura de soporte del telescopio utilizado para obtener las frecuencias naturales del sistema y validar su comportamiento. Para simplificar el modelo, se omitió el análisis de la cúpula, el pilar de hormigón y algunos detalles menores de las piezas. Por otro lado, se redujeron algunas partes del sistema a elementos simples representados como pesos puntuales. Todo ello redujo considerablemente el coste computacional del FEA.

En la literatura se pueden encontrar investigaciones encaminadas a ahorrar costes computacionales para ejecutar simulaciones en un ordenador estándar, como el método de reticulado de Boltzmann utilizado por F. Zhao et al. en [103] para estudiar el impacto dinámico del viento en un telescopio de 2 metros. Otro ejemplo lo encontramos en el experimento Lira-B desarrollado a bordo de la estación espacial internacional (ISS) [104]. En él se utilizó un modelo simplificado de simulación que proporcionó resultados en concordancia con los obtenidos a partir del modelo complejo real. En cuanto a las herramientas de software, se utilizó SolidWorks para desarrollar el modelo 3D, herramienta ampliamente utilizada en simulaciones en este campo [103]–[107].

Las frecuencias naturales y los modos de vibración de la estructura se identifican detectando los picos de la respuesta en frecuencia del modelo del sistema utilizando técnicas de análisis modal [105]. En la literatura se pueden encontrar simulaciones de análisis modal realizadas para obtener hasta los 200 modos más bajos [103], mientras que otras investigaciones se centran sólo en los tres primeros modos [106]. El análisis estructural y el FEA se utilizan a menudo en tareas orientadas al diseño para cumplir un requisito estándar: la frecuencia de resonancia mínima debe estar por debajo de las frecuencias de la vibración medida en el telescopio [105], [108]. En esta tesis, se calculan y comparan los seis primeros modos mediante dos métodos diferentes: análisis modal numérico y análisis espectral de las vibraciones medidas. La justificación de limitar a seis el número de frecuencias a estudiar se basa en que en el desarrollo de este capítulo se concluye que el 80% de la masa de la estructura es movilizadada por estos seis primeros modos.



Figura 6.1. Telescopio JAST80. A la izquierda modelo 3D, a la derecha fotografía.

A partir del modelo 3D proporcionado por el equipo de ingeniería del OAJ-CEECA del conjunto telescopio, cúpula y pilar (Figura 6.1), se simplifican algunos elementos y se realiza un análisis FEA para definir un modelo numérico que permita analizar la respuesta vibratoria generada por los movimientos en modo *slewing* sobre la montura del telescopio. Se omite la cúpula y el pilar de hormigón al que se encuentra fijado, limitándose al conjunto formado por la montura, las bridas de accionamiento, el telescopio y los contrapesos (véase Figura 6.2).

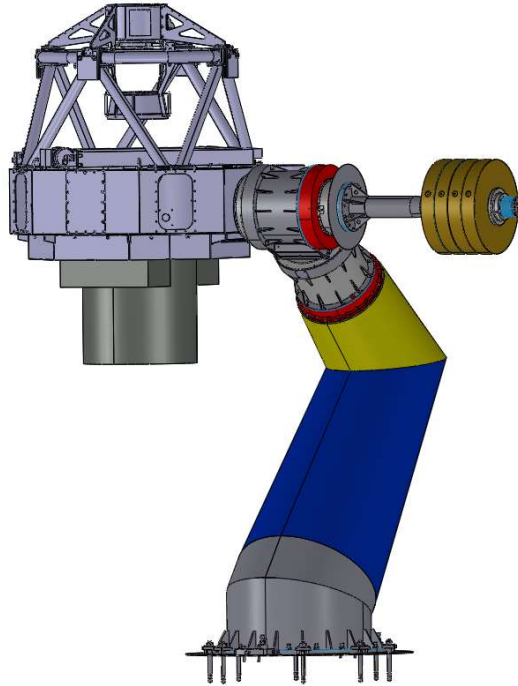


Figura 6.2. Telescopio JAST80. Montura, telescopio y contrapesos.

No obstante, no es necesario realizar un modelo detallado de cada una de estas partes, ya que, considerando el rango frecuencial de interés, que corresponde a bajas frecuencias, hay componentes que actúan como elementos perfectamente rígidos y sólo introducen masa al sistema. En la Figura 6.3 se puede apreciar cómo se simplificó la montura eliminando la tornillería, nervios y elementos mecánicos que generan una carga excesiva de procesamiento sin aportar resultados significativos al análisis.

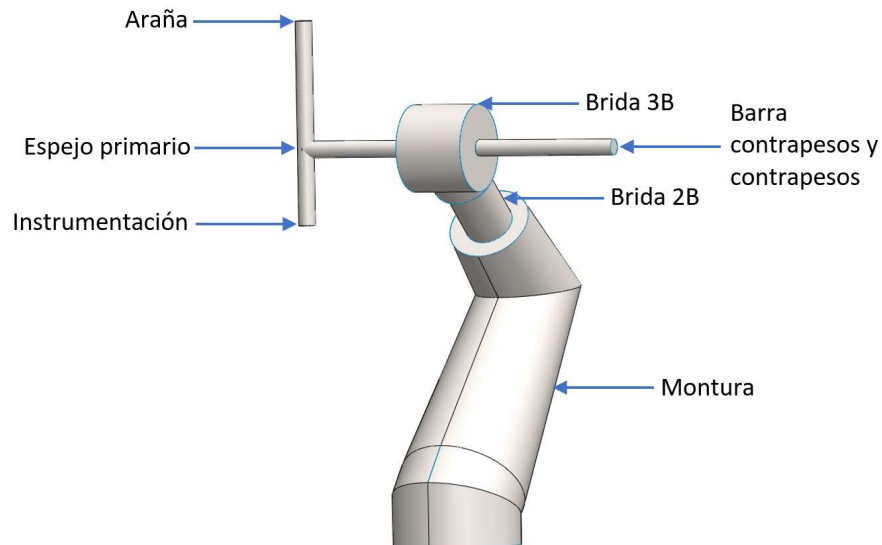


Figura 6.3. Telescopio JAST80. Montura, ópticas y contrapesos.

Para distribuir de forma equilibrada las masas y obtener un modelo más aproximado al modelo real, se diferencia la araña, espejo primario e instrumentación, aplicando a cada uno de ellos una masa puntual. Por otro lado, las bridas 2B y 3B se mantienen independientes de la montura.

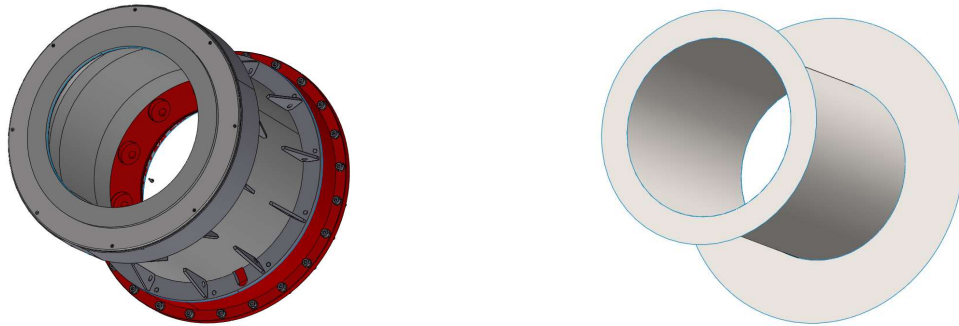


Figura 6.4. Detalle de la brida 2B. A la izquierda el modelo 3D y a la derecha modelo simplificado.

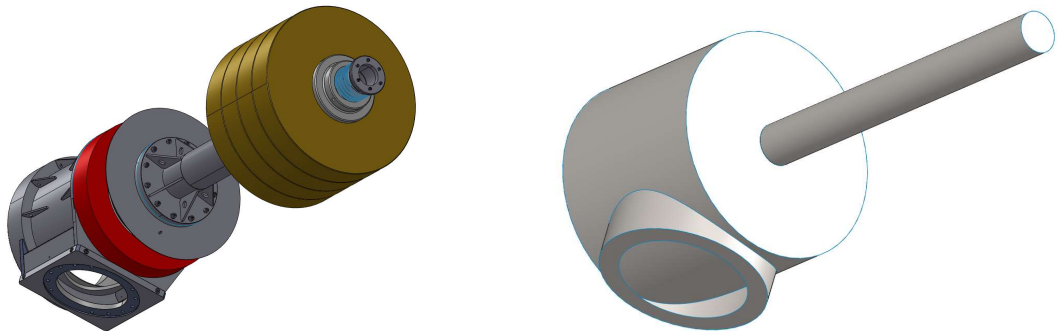


Figura 6.5. Detalle de la brida 3B, contrapesos y barra de contrapesos. A la izquierda el modelo 3D y a la derecha modelo simplificado.

En las Figuras 6.4 y 6.5 se puede apreciar con detalle la simplificación de las bridas 2B y 3B, respectivamente. Se eliminan todos aquellos elementos que, por su escaso volumen, no intervienen en el FEA debido a la densidad del mallado. La barra de contrapesos y contrapesos se reducen a una barra con una masa puntual en su extremo. Al aplicar esta idea, se considera que el telescopio se comporta como un elemento rígido que sólo introduce masa al sistema, así como las dos bridas 2B y 3B con los sistemas de posicionamiento y contrapesos. Con esta reducción se simplifica el modelo sin perder exactitud en el análisis, como se puede observar en la Figura 6.6.

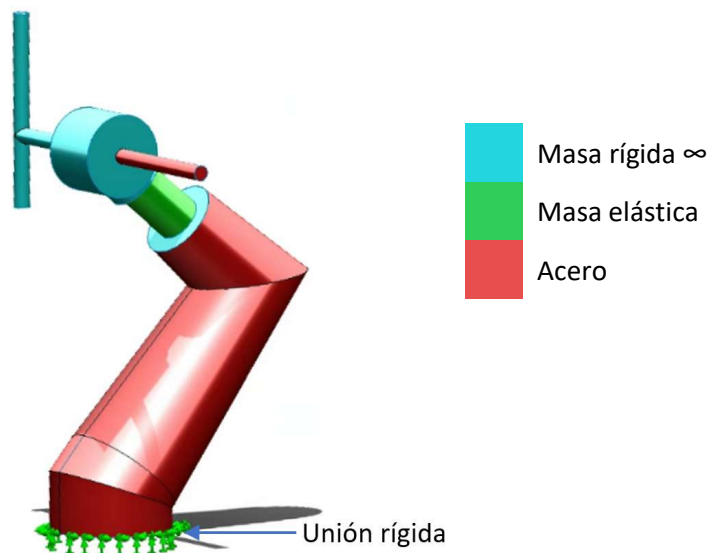


Figura 6.6. Telescopio JAST80. Materiales modelo 3D.

La geometría se crea con superficies que posteriormente se mallan con elementos tipo SHELL, definiendo el espesor y el material asociado a cada uno de los componentes que constituyen el conjunto de la estructura. Como se ha señalado previamente, el telescopio presenta un comportamiento como sólido rígido, caracterizado por la masa de los tres subconjuntos principales que lo componen: la araña, el espejo primario

y la instrumentación. Se crea una geometría simplificada que posiciona dichas masas en su ubicación equivalente, dada por su centro de gravedad (CDG), como se muestra en la Figura 6.6. A partir de la geometría se realiza el FEM y FEA para determinar las frecuencias naturales y sus modos de vibración.

Los materiales y densidades asignados a cada uno de los elementos se muestran en la Tabla 6.1. La brida 2B, debido a la incertidumbre de su comportamiento como rígido ideal o flexible, se establece sin densidad estudiándose con tres módulos elásticos diferentes, en la línea de mejoras aportadas por P. Gatkine et al. [105] en su estudio.

Tabla 6.1. Asignación de materiales a los elementos simplificados.

Elemento	Propiedad	Características del material			
		Densidad (kg/m ³)	Coefficiente de Poisson	Módulo Elástico (Pa)	Espesor (mm)
Montura	Acero	7700	0,29	$2 \cdot 10^{11}$	5
Barra contrapesos	Acero	7700	0,29	$2 \cdot 10^{11}$	NP
Brida 3B	Rígido ideal	0	0	$2 \cdot 10^{15}$	NP
Telescopio simplificado	Rígido ideal	0	0	$2 \cdot 10^{15}$	NP
Brida 2B	Comportamiento experimental	0	0	$2 \cdot 10^{14}$ $2 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^{10}$	NP

NP: No Procede

Seguidamente se vincula a la geometría, mediante elementos tipo MASS, las masas correspondientes a los elementos que se consideran con un comportamiento rígido: araña, espejo primario, instrumentación, contrapesos y brida 3B. En este punto, dado que no se disponía de la masa del espejo primario se determinó ésta por equilibrio respecto al eje de la brida 3B mediante la Ecuación 17.

$$(m_{barra}d_{barra}) + (m_{contrapeso}d_{contrapeso}) = (m_{araña} + m_{espejo\ primario} + m_{instrumentación})d_{telescopio} \quad (17)$$

Los datos obtenidos de las masas y su origen se muestran en la Tabla 6.1, mientras que las distancias con respecto al eje de la brida 3B se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2. Masas de los elementos y origen.

Elemento	Designación	Masa (kg)	Origen del dato
Contrapeso	$m_{contrapeso}$	378	Solidworks
Barra contrapeso	m_{barra}	58	Solidworks
Araña	$m_{araña}$	35	Asignado por OAJ
Instrumentación	$m_{instrumentación}$	68	Asignado por OAJ
Espejo primario	$m_{espejo\ primario}$	410	Calculado
Brida 2B	$m_{brida\ 2B}$	81	Solidworks
Brida 3B	$m_{brida\ 3B}$	128	Solidworks

Las fuentes de los datos de la Tabla 6.2 son: "Solidworks", a partir de los cálculos del volumen y densidad del material del modelo 3D utilizando el software Solidworks, "Asignado por OAJ", asignado por el equipo de ingeniería del OAJ según sus bases de datos y "Calculado", mediante los resultados calculados a partir de la ecuación 17.

Tabla 6.3. Distancias de los elementos al CDG de la brida 3B.

Elemento	Designación	Distancia (mm)	Origen del dato
Contrapeso	$d_{contrapeso}$	888	Telescopio
Barra contrapeso	d_{barra}	581	Solidworks
Araña	$d_{telescopio}$	719	Solidworks
Instrumentación	$d_{telescopio}$	719	Solidworks
Espejo primario	$d_{telescopio}$	719	Solidworks

Las fuentes de los datos de la Tabla 6.3 son: “Telescopio”, obtenido por instrumentos calibrados medidos directamente en el JAST80 y “Solidworks”, medido en el modelo 3D mediante herramientas del software Solidworks.

En el siguiente paso se definen las condiciones de contorno, restringiendo los 6 GDL en el borde inferior de la montura, lo que permite simular la conexión rígida de la montura al pilar de hormigón, como se muestra en la Figura 6.6. Finalmente, se realiza el mallado utilizando elementos triangulares tipo SHELL de 3 nodos con 6 GDL cada uno. Para determinar el tamaño de malla más óptimo se realizaron varios análisis. En la Tabla 6.4 se reflejan el Tiempo de Cálculo (TC), número de nodos y elementos para cada tamaño de malla, junto con los valores de frecuencia pertenecientes a cada vibración. Un enfoque similar fue realizado con éxito por M. S. Worthington et al. [106].

Tabla 6.4. Estudio de sensibilidad del mallado.

Malla	Malla 1	Malla 2	Malla 3
TC (s)	2	7	35
Nodos	1840	7554	36897
Elementos	3360	14868	73370
Modo	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)
1º	10.05	7.20	7.31
2º	11.08	9.07	9.18
3º	15.15	13.24	13.45
4º	19.83	16.26	16.35
5º	32.89	31.34	30.83
6º	65.71	55.37	55.15

Una malla con un tamaño de elemento muy grande (como en la malla 1) rigidiza excesivamente la estructura y proporciona frecuencias naturales elevadas. Por el contrario, apenas hay variación en los valores determinados para las frecuencias naturales al comparar la Malla 2 y la Malla 3. Las diferencias entre las frecuencias están por debajo del 3%, mientras que el tamaño nodos, elementos y TC se multiplican por 5 en esta última. Es importante tener en cuenta que los resultados de la simulación se han obtenido con un PC equipado con un procesador Intel XEON CPU 31240 a 3,30 GHz, con 8 GB de RAM y un sistema operativo Win10 64 bit.

Finalmente, se ha elegido el mallado 2 con un tamaño máximo de 100 mm y mínimo de 25 mm, obteniendo un modelo con 14868 elementos y 7554 nodos, ya que proporciona resultados precisos con un coste computacional ajustado. La Figura 6.7 muestra el mallado 2 del modelo 3D.

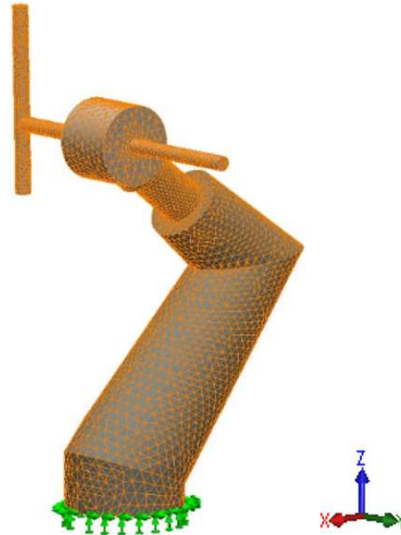


Figura 6.7. Telescopio JAST80. Mallado 2 con 14868 elementos y 7554 nodos.

En la bibliografía se pueden encontrar simulaciones similares basadas en FEM. Por ejemplo, K. Fujita et al. [109] realizaron cálculos FEM basados en elementos triangulares, pero para un problema bidimensional con el objetivo de investigar el efecto de la rugosidad superficial en la alineación mecánica de electrodos cilíndricos coaxiales.

Una vez definido el FEM, se procede a determinar las 6 primeras frecuencias y sus correspondientes modos de vibración utilizando el algoritmo iterativo de Lanczos empleado por B. N. Parlett et al. [110].

El primer análisis se realizó definiendo un módulo elástico $E = 2 \cdot 10^{14}$ Pa, similar al de un sólido rígido ideal para el material asociado a la brida 2B. El segundo análisis se realizó con un módulo elástico $E = 2 \cdot 10^{11}$ Pa, similar al del acero, mientras que en un tercer análisis se utilizó un módulo elástico $E = 2 \cdot 10^{10}$ Pa, por debajo del valor típico del acero. La Tabla 6.5 muestra las 6 primeras frecuencias naturales del soporte.

Tabla 6.5. Valores de frecuencias naturales obtenidos de los 6 primeros modos con tres valores diferentes para el módulo de elasticidad de la brida 2B.

Modo (Hz)	Módulo elástico E (Pa)		
	$2 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{10}$
1º	8.38	7.20	5.80
2º	9.98	9.07	7.67
3º	13.92	13.24	8.94
4º	18.46	16.26	13.83
5º	33.58	31.34	24.32
6º	62.78	55.37	39.25

Se comprueba que considerar únicamente la masa de aquellos componentes que se comportan como elementos perfectamente rígidos en el modelo 3D no afecta a la precisión de los resultados, al igual que en el trabajo de D. Giagopoulos et al. [111], donde se utilizó una masa puntual para simular la masa total de una estructura, o el trabajo de P. Langer et al. [112], donde se realizaron varios FEA sobre una estructura en la que se simuló una parte del conjunto como una masa puntual situada en su CDG. Este resultado es también consistente con el trabajo de V. P. Smekalin et al. [104]. Además, el coste computacional se reduce drásticamente, hecho también señalado por A. Thakur et al. en su trabajo [113].

El factor de participación modal de la masa para el caso intermedio con un módulo elástico similar al del acero se muestra en la Tabla 6.6. Como se puede observar, prácticamente el 80% de la masa de la estructura se moviliza teniendo en cuenta los seis primeros modos, por lo que se puede considerar que la respuesta de la estructura está condicionada en gran medida por ellos. Los valores resaltados en negrita indican el valor máximo en cada frecuencia y la dirección en la que se produce el desplazamiento.

Tabla 6.6. Distribución de masas con módulo elástico $2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$

Modo	Frecuencia (Hz)	Dirección		
		X (%)	Y (%)	Z (%)
1º	7.20	32.6	2.7	0.2
2º	9.07	2.6	23.7	41.1
3º	13.24	6.5	26.1	5.8
4º	16.26	14.9	2.4	17.8
5º	31.34	22.5	21.8	18.2
6º	55.37	7.8	0.4	0.5
	Suma	86.9	77.1	83.4

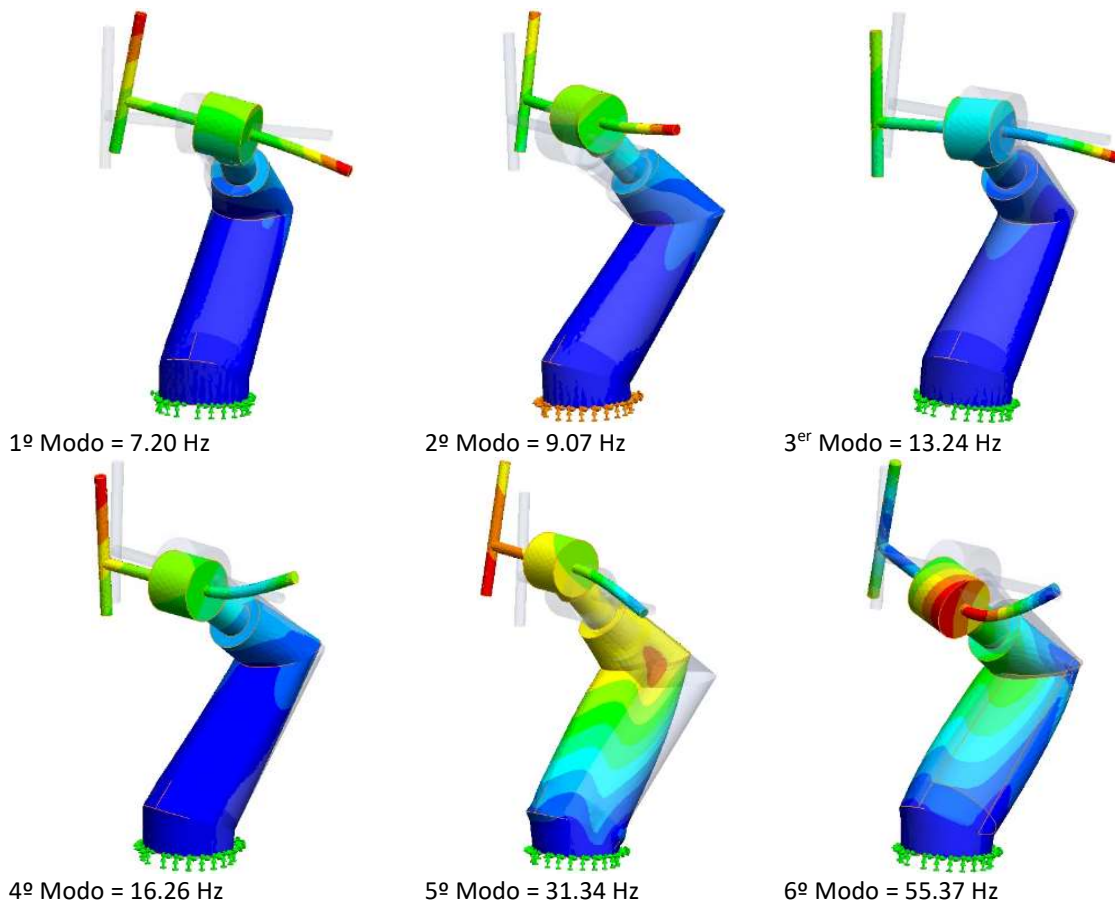


Figura 6.8. Gráficos de deformación de la montura del telescopio JAST80 según el modo de frecuencia con un módulo elástico similar al del acero.

Para cada frecuencia natural se obtiene el patrón modal asociado, que muestra la forma en que la estructura se deforma cuando vibra a esa frecuencia, tal y como se puede observar en la Figura 6.8. Cada subfigura representa en colores, desde el más frío al más cálido, la deformación en valores relativos. Los colores fríos indican deformaciones escasas o nulas, mientras que los colores cálidos representan deformaciones mayores. La imagen sombreada en gris representa la posición inicial del modelo 3D sin excitación.

6.2 Discusión

Los resultados obtenidos del FEA a partir del FEM del modelo 3D simplificado mostraron los 6 primeros modos y frecuencias naturales que definen el comportamiento dinámico de la montura ecuatorial-alemana. Para ajustar el valor de la rigidez correspondiente a la brida 2B, que proporciona el movimiento en AR, se realizó un estudio de sensibilidad del módulo elástico sobre las frecuencias naturales de la estructura, de forma similar al utilizado en el trabajo de P. Gatkine et al. [105]. Se observa que la rigidez de la brida 2B influye

notablemente en las frecuencias naturales del conjunto de la estructura. Una mayor rigidez de la brida 2B hace que las frecuencias naturales obtenidas sean mayores, y, por el contrario, cuanto menor sea la rigidez de dicha brida, menor será la rigidez de la estructura.

Al analizar los resultados de la Tabla 6.6, se ve como el 1º modo moviliza la mayor cantidad de masa en el eje X. El 1º y 5º modos movilizan más de la mitad de la masa modal en esa dirección. La masa total movilizada en el eje Y se produce en los modos 2º, 3º y 5º a partes casi iguales. En el eje Z destaca el 2º modo, que por sí solo moviliza la mayor parte de la masa y junto a los modos 4º y 5º movilizan más del 75% de la masa modal en dicha dirección. Como se observa en la Figura 6.9, este modo corresponde a un movimiento de flexión de la parte superior de la montura sobre la que se fija el telescopio. Este resultado es muy significativo si se tiene en cuenta la dirección del eje Z (Figura 6.8), que coincide con la dirección de medición de los acelerómetros. Por último, es importante mencionar que los modos 4º y 6º presentan valores muy bajos de masa movilizada en las direcciones Y Z, por lo que su influencia en la respuesta de la estructura en estas direcciones puede ser ignorada.

Análisis espectral de las señales y
validación del modelo 3D

7

7. Análisis espectral de las señales y validación del modelo 3D

La respuesta dinámica de una estructura está determinada por sus frecuencias naturales y las formas modales asociadas. Por lo tanto, es fundamental conocerlas para predecir la respuesta vibratoria que sufrirá la montura frente a una excitación dinámica. La comparación de los resultados obtenidos mediante el FEA y el análisis espectral de las medidas de los acelerómetros validará el FEM del modelo 3D simplificado.

Además, el análisis espectral de las señales captada por los acelerómetros instalados en el JAST80 de un movimiento en modo *slewing* permitirá determinar si existe una influencia crítica de las vibraciones sobre la montura. Si las frecuencias más destacables del análisis espectral no coinciden con las frecuencias naturales de la montura calculadas a partir del FEA, se puede concluir que no existe interacción entre ellas. Por el contrario, si las frecuencias del análisis espectral coinciden con las frecuencias naturales del FEA, existirá interacción entre las vibraciones y la montura. El modelo de simulación permitirá prever un comportamiento errático del telescopio por la interacción de la vibración con las frecuencias naturales de la montura.

7.1 Frecuencias naturales en telescopios

Conocer las frecuencias naturales de una estructura, así como sus modos de vibración, es fundamental para predecir su respuesta vibratoria ante una excitación dinámica. Cuando un sistema es excitado a una de sus frecuencias naturales, su vibración puede sufrir un efecto de amplificación debido a la acumulación de fuerzas de inercia del sistema.

Las frecuencias naturales del emplazamiento, o del pilar [1], [105] pueden afectar al rendimiento del telescopio. Por ejemplo, Y. Lammen et al. [3] determinaron experimentalmente las frecuencias naturales y modos correspondientes al conjunto de elementos que forman el espejo secundario. Su objetivo fue identificar y evaluar soluciones al problema de resonancia existente. Por otro lado, P. Gatkine et al. [105] obtuvieron las frecuencias naturales del pilar que soportaba el telescopio de 3,6 m de espejo primario y comprobaron que su principal frecuencia natural no coincidía con las frecuencias de los sistemas y actuadores del telescopio. Además, pudieron evaluar la transferencia de energía no deseada del pilar al sistema óptico.

Existen diferentes técnicas de análisis experimental para obtener las frecuencias resonantes de vibración de una estructura, como la respuesta al impulso, la respuesta a excitaciones armónicas o la vibración aleatoria. Sin embargo, debido a la singularidad del equipo, no se pueden proponer métodos similares que podrían provocar daños o desajustes en el equipamiento. Por ello, en esta tesis se propone identificar experimentalmente las frecuencias naturales del telescopio JAST80 aprovechando la vibración libre a la que se ve sometida la estructura tras una parada de emergencia.

Para ello, se realiza un análisis frecuencial de las señales de los actuadores captadas por los acelerómetros similar al estudio de K. S. Lim et al. [114]. En su trabajo, la respuesta de un puente sometido a una excitación transitoria se midió examinando la respuesta vibratoria, en vibración libre, mediante un *array* de acelerómetros repartidos por la estructura. En su análisis espectral de la señal temporal utilizaron FFT y STFT con la ayuda del software Matlab para identificar las frecuencias naturales de la estructura. Estas herramientas ya han sido utilizadas en otras investigaciones para determinar e identificar componentes armónicas [115]–[117], o como la realizada por J. Sebag et al. [107] en el *Large Synoptic Survey Telescope* (LSST) en Cerro Pachón, Chile.

Posteriormente se comparan las frecuencias obtenidas del análisis espectral con las frecuencias naturales obtenidas del FEA a partir del modelo 3D simplificado de la montura del telescopio. Si las frecuencias son coincidentes, el modelo 3D simplificado se validará. A partir de este modelo 3D se realizará un análisis espectral del movimiento en AR en funcionamiento normal para determinar si las frecuencias de mayor amplitud de la vibración medida se corresponden con las frecuencias naturales validadas de la estructura. Si las frecuencias son diferentes, las vibraciones producidas por los actuadores y otras perturbaciones que se trasladen hasta la instrumentación no tendrán influencia en las frecuencias naturales de la montura. Por el contrario, si las frecuencias son coincidentes, se producirá una amplificación que tendrá efectos impredecibles sobre la instrumentación y, por lo tanto, se requerirá intervención en el sistema.

En resumen, para identificar las frecuencias naturales del telescopio JAST80 y validar un modelo 3D simplificado, se establecen cuatro pasos: i) medición de la vibración en la instrumentación del JAST80 en

vibración libre tras parada de emergencia, ii) realización de un análisis espectral de las señales medidas mediante la herramienta FFT, iii) obtención de los modos y frecuencias naturales mediante FEA del modelo FEM a partir del modelo 3D simplificado de la montura del telescopio, y iv) comparación de las frecuencias obtenidas del análisis espectral con las frecuencias naturales obtenidas del FEA para determinar la validación del modelo 3D simplificado. Finalmente, se realizará un análisis espectral del movimiento en AR en funcionamiento normal para determinar la interacción con las frecuencias naturales de la estructura del modelo 3D validado.

7.2 Estrategia de medida de vibración en modo libre y validación del modelo 3D

Para comparar las mediciones tomadas por los acelerómetros con las frecuencias naturales de vibración de la estructura calculados a partir del FEA se requiere un movimiento no forzado con oscilación libre. Este tipo de vibración se produce en una parada de emergencia o una situación similar en que la estructura queda vibrando libremente.

Durante la elaboración del banco de pruebas de los actuadores del telescopio se experimentaron tres paradas inesperadas por emergencia, como se muestran en las Figuras 5.9, 5.10 y 5.11, respectivamente. Sin embargo, la señal de la Figura 5.11 no puede ser considerada como una señal válida para la validación del FEA, ya que su análisis espectral no revela datos tan significativos como las otras dos señales. La justificación de esto se basa en el comportamiento de la montura, el cual difiere de las otras dos señales. En lugar de detener el movimiento rápidamente, la estructura continúa oscilando. Además, el momento en que se produce la parada no coincide en el tiempo con las otras dos señales, ya que ocurre al final del movimiento, a diferencia de las otras dos señales, que sucede al comienzo del movimiento.

Las características de las dos señales que se estudiarán son las siguientes: la señal 1 corresponde a la Prueba 3 del Anexo I, con un movimiento en AR de 0° a 90° , DEC en 40° y una aceleración de $0,2454$ grados/ s^2 . La señal 2 corresponde a la Prueba 4 del Anexo I, con un movimiento en AR de 0° a 40° , DEC en 40° y una aceleración de $0,179$ grados/ s^2 . En el análisis espectral de ambas señales se comprobó que las componentes frecuenciales de los tres acelerómetros están situadas en las mismas frecuencias, variando ligeramente sus amplitudes.

En las Figuras 7.1, 7.2 y 7.3 se llevan a cabo diferentes experimentos (variación de parámetros) sobre la señal 1 para optimizar la visualización de los resultados con la herramienta FTF utilizada.

El primer efecto que se observa al reducir el tamaño de la ventana temporal es la ampliación del lóbulo principal de cada componente frecuencial. Este efecto se puede apreciar comparando la Figura 7.1 y la Figura 7.2, en las que se reduce la ventana temporal de 5 segundos a 1 segundo. En ambos casos se aplica una ventana rectangular y el intervalo de frecuencias mostrado llega hasta 60 Hz, por encima de la frecuencia del 6º modo obtenida en el FEA (ver Tabla 6.5 con módulo elástico $E = 2 \cdot 10^{11} Pa$). Además del efecto relacionado con la anchura de los lóbulos, al aumentar el tiempo de la ventana de la señal de 1 a 5 segundos pueden aparecer nuevos componentes de frecuencia en el espectro o cambiar su peso relativo.

El segundo efecto está relacionado con el tipo de ventana utilizada. En la Figura 7.3 se muestra el efecto de 5 tipos de ventanas diferentes: ventana rectangular, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman, respectivamente. Aunque existen muchas otras ventanas, este subconjunto de cinco ilustra el compromiso establecido entre la anchura del lóbulo principal y la relación lóbulo principal-lóbulo lateral. La ventana rectangular proporciona un lóbulo principal estrecho a costa de una mala relación lóbulo principal-lóbulo lateral, mientras que la ventana Blackman proporciona una mejor relación lóbulo principal-lóbulo lateral a costa de un lóbulo principal más ancho. Las otras tres ventanas ensayadas se mueven en una zona intermedia entre los extremos que marcan las ventanas rectangular y Blackman. Para determinar las frecuencias más relevantes, es necesario que los lóbulos laterales sean los menos posibles para evitar confusiones con los lóbulos principales. Por lo tanto, se utilizará la ventana Blackman, por tener la mejor relación lóbulo principal-lóbulo lateral de las cinco ventanas propuestas.

Por último, se programa un detector de picos para localizar las frecuencias en las que el espectro de la señal medida presenta el máximo local. Este detector de picos es un buscador de máximos relativos que se utiliza para identificar las frecuencias en las que se encuentran los armónicos más importantes. Se parametriza en términos del umbral mínimo de detección y del número máximo de picos a detectar para optimizar su funcionamiento.

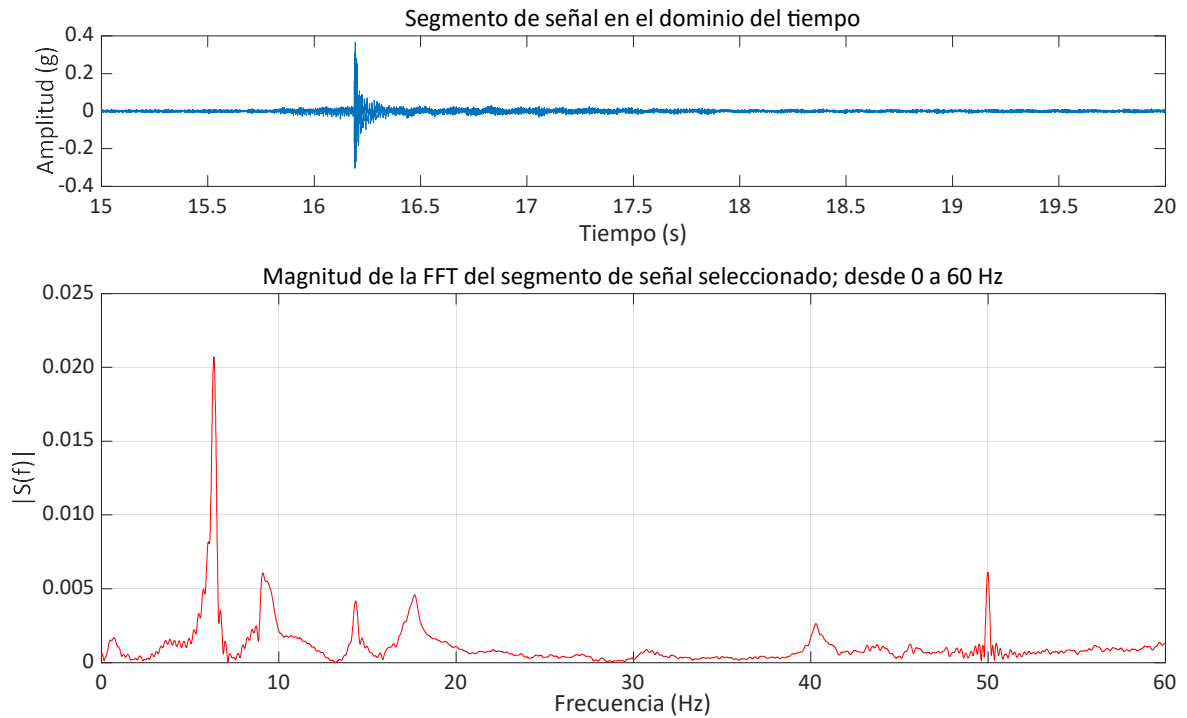


Figura 7.1. Señal 1. Parte superior, dominio temporal; $L_w = 5$ s. Parte inferior, dominio frecuencial: espectro del segmento de señal. Ventana rectangular; ancho de banda visualizado B_w de 0 a 60 Hz.

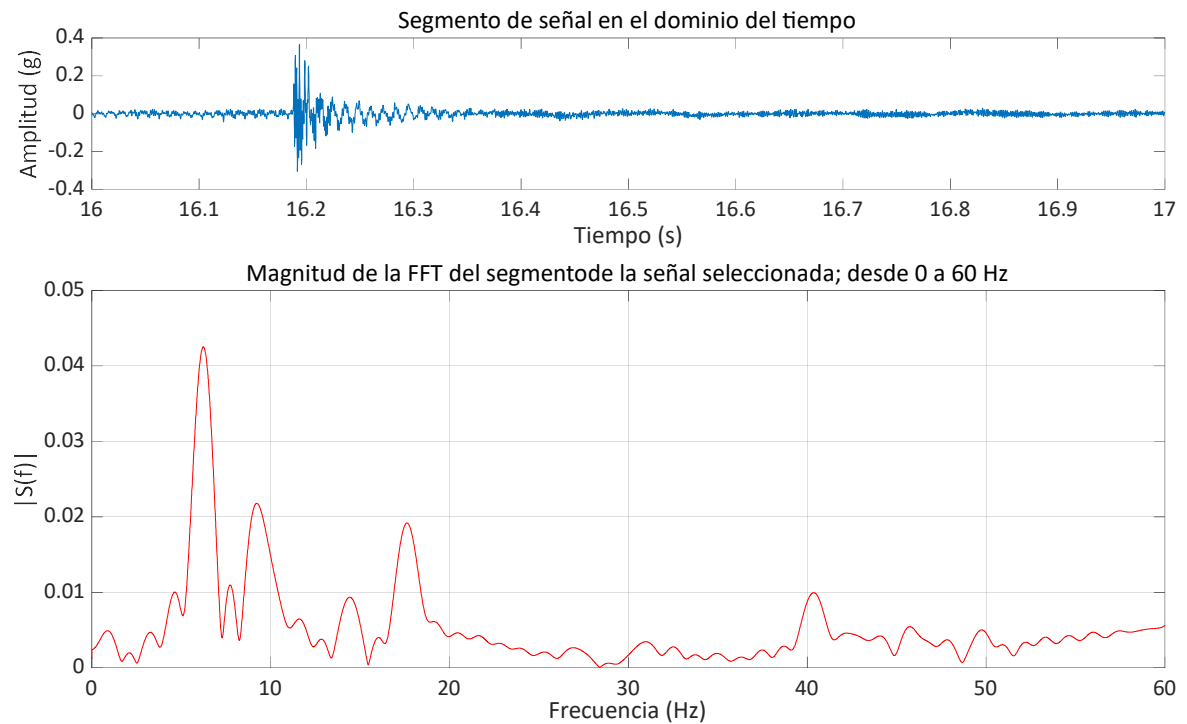


Figura 7.2. Señal 1. Parte superior, dominio temporal; $L_w = 1$ s. Parte inferior, dominio frecuencial: espectro del segmento de señal. Ventana rectangular; ancho de banda visualizado B_w de 0 a 60 Hz.

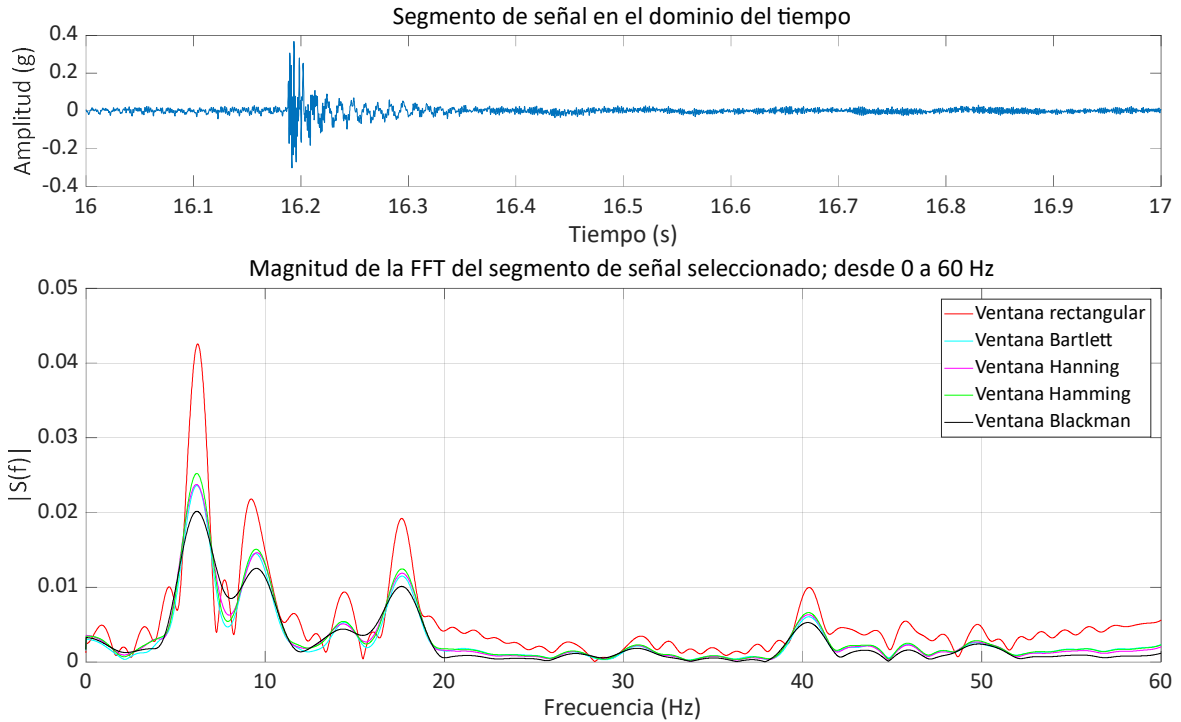


Figura 7.3. Señal 1. Parte superior, dominio temporal; $L_w = 1$ s. Parte inferior, dominio frecuencial: espectro del segmento de señal. Ventanas rectangulares, Bartlett, Hanning, Hamming y Blackman; ancho de banda mostrado Bw de 0 a 60 Hz.

Las Figuras 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7 muestran dos movimientos con parada brusca por emergencia pertenecientes a la señal 1 y señal 2, respectivamente. Las Figuras 7.4 y 7.6 representan la señal mediante la herramienta STFT, mientras que las Figuras 7.5 y 7.7 muestran las señales con la herramienta FFT representadas con los mismos parámetros de ventana Blackman, longitud de ventana de 3 s, determinado experimentalmente por el mejor espectro y ancho de espectro de 0 a 60 Hz. En la parte superior de todas estas figuras se muestra la representación temporal de la forma de onda, lo que permite localizar el instante en que se produce la parada de emergencia.

En la Figura 7.4 se puede observar cómo existen frecuencias (destacadas en un color más claro) que se alargan en el tiempo hasta aproximadamente los 13 s, mientras que en la Figura 7.6 las frecuencias tienen una duración en el tiempo de aproximadamente 6 s. La duración de las señales en el tiempo, junto con el color de magnitud, indican la influencia de la vibración. La señal 1 es la que tiene una mayor duración en el tiempo. Si comparamos el análisis espectral que se muestra en las Figuras 7.5 y 7.7, vemos que los armónicos de la señal 1 son de una amplitud mayor que en el caso de la señal 2, por lo que son más fácilmente identificables con un detector de picos. Por lo tanto, para la validación del modelo 3D simplificado se utilizará la señal 1, ya que muestra con más claridad la información relativa al contenido espectral de la vibración libre.

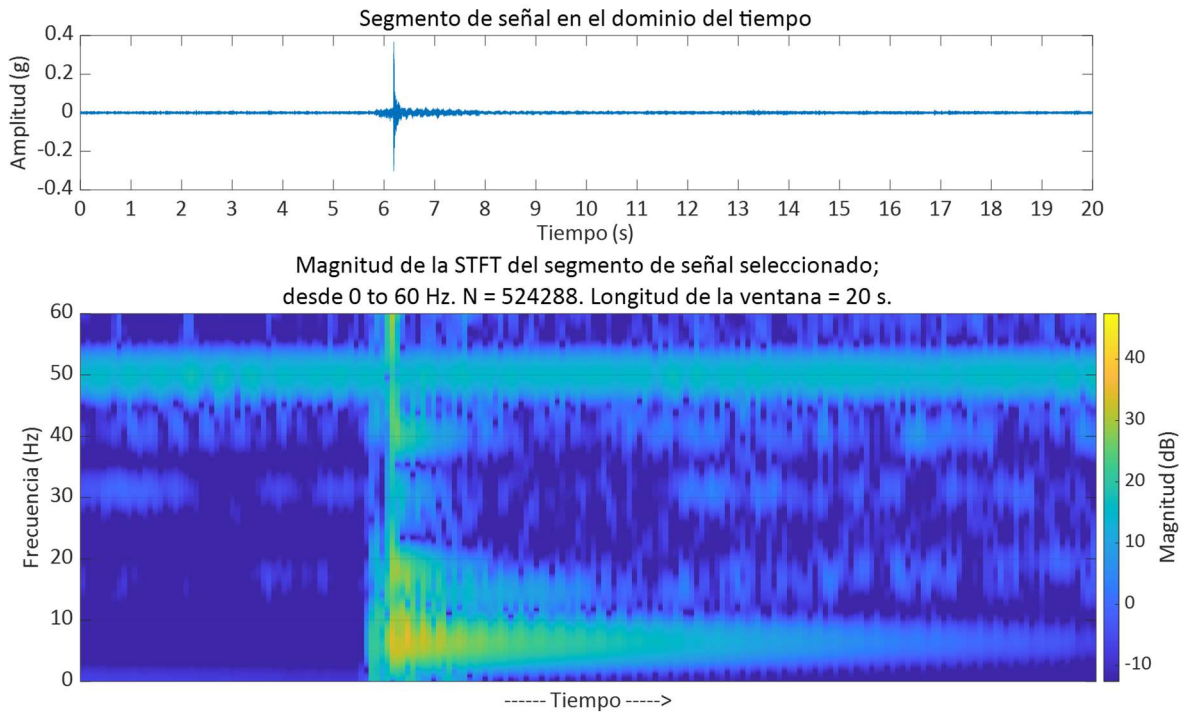


Figura 7.4. Señal 1. Parte superior: dominio temporal. Parte inferior: STFT de un segmento de señal de vibración. Ventana Blackman.

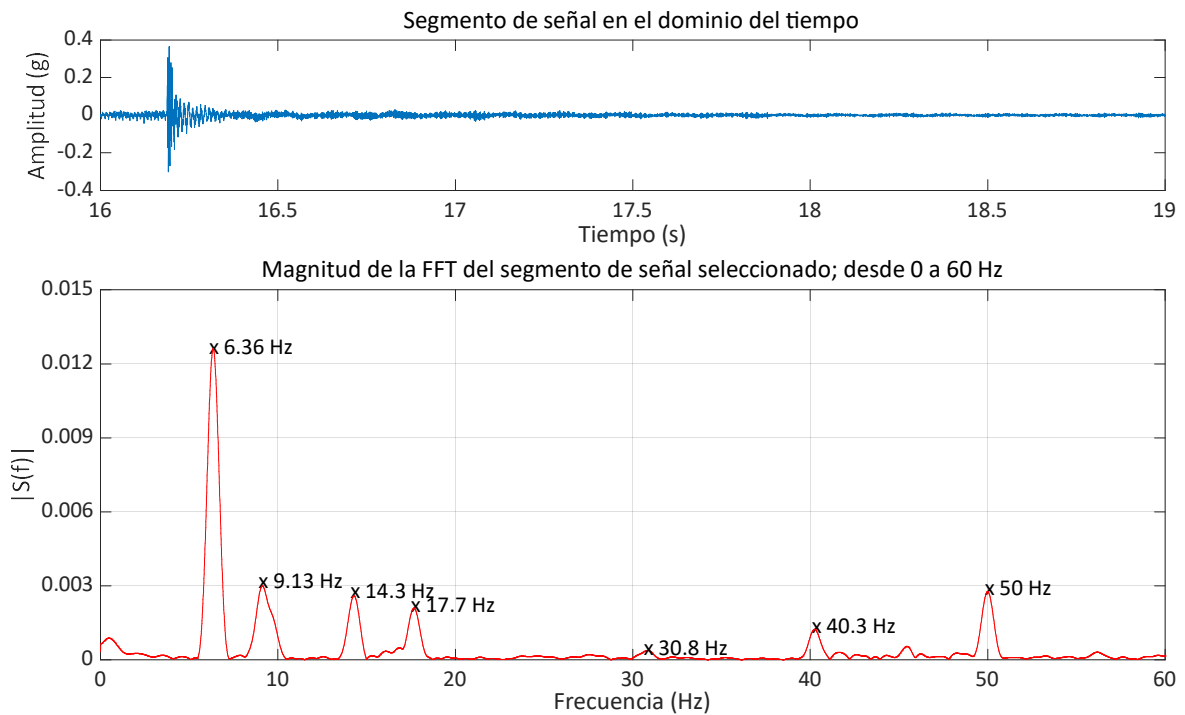


Figura 7.5. Señal 1. Parte superior, dominio temporal. Parte inferior, dominio de la frecuencia: Espectro de un segmento de señal utilizando detector de picos. Ventana Blackman; $L_w = 3$ s; B_w 0 a 60 Hz.

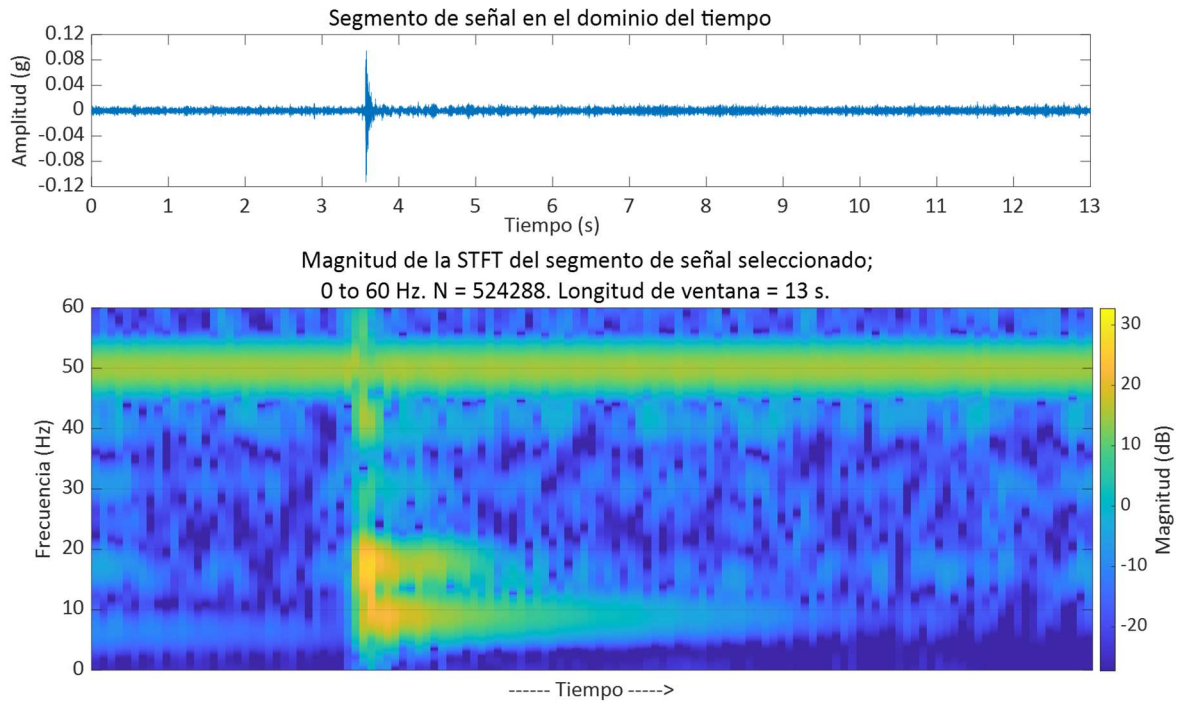


Figura 7.6. Señal 2. Parte superior: dominio temporal. Parte inferior: STFT de un segmento de señal de vibración. Ventana Blackman.

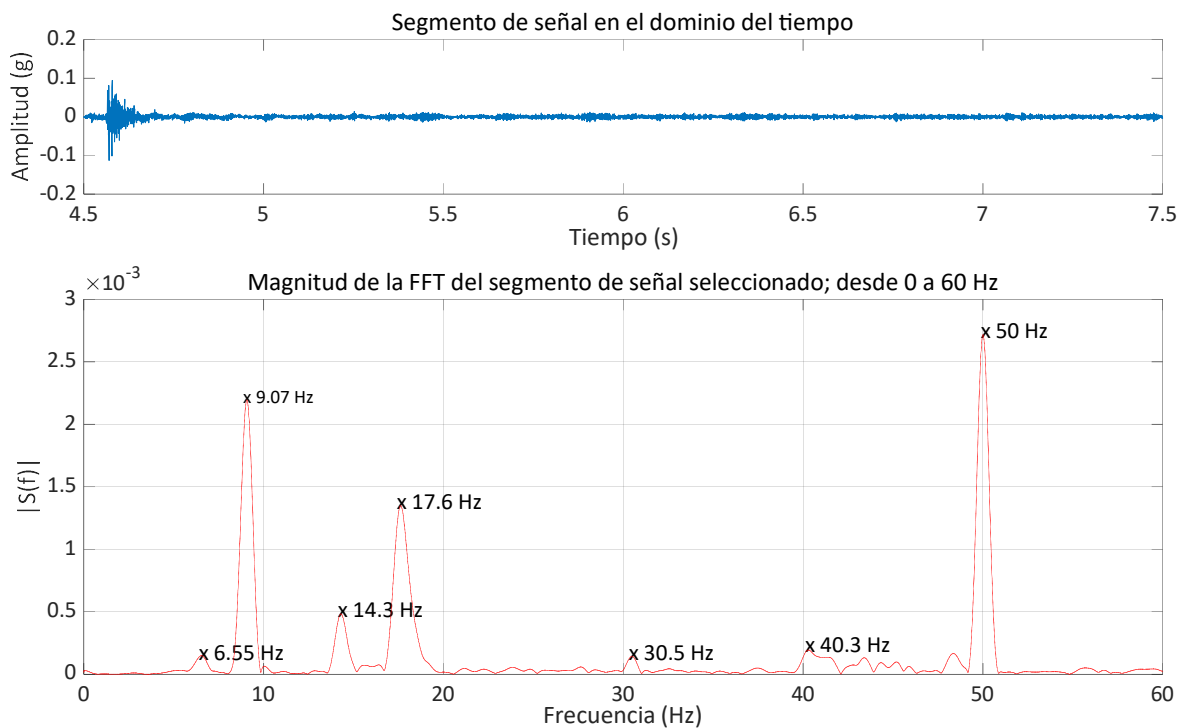


Figura 7.7. Señal 2. Parte superior, dominio temporal. Parte inferior, dominio de la frecuencia: Espectro de un segmento de señal utilizando detector de picos. Ventana Blackman; $L_w = 3$ s; B_w 0 a 60 Hz.

Es importante destacar que el valor de 50 Hz que aparece en las Figuras 7.4, 7.5, 7.6 y 7.7 se debe al acoplamiento de la frecuencia de la red de alimentación eléctrica en los cables de conexión de los acelerómetros con la tarjeta de adquisición de datos.

En la Figura 7.8 se muestra el análisis espectral mediante STFT y FFT de un movimiento en AR en modo *slewing* en condiciones normales correspondiente a la Prueba 5 del Anexo I. Se puede observar la evolución temporal del contenido espectral de la señal de vibración. Aparece constante el armónico de 50 Hz de la red

eléctrica y en la parte inferior de la STFT (Figura 7.8), un nivel de potencia debida a la CC presente en la señal, que se manifiesta en el tramo estacionario de la vibración.

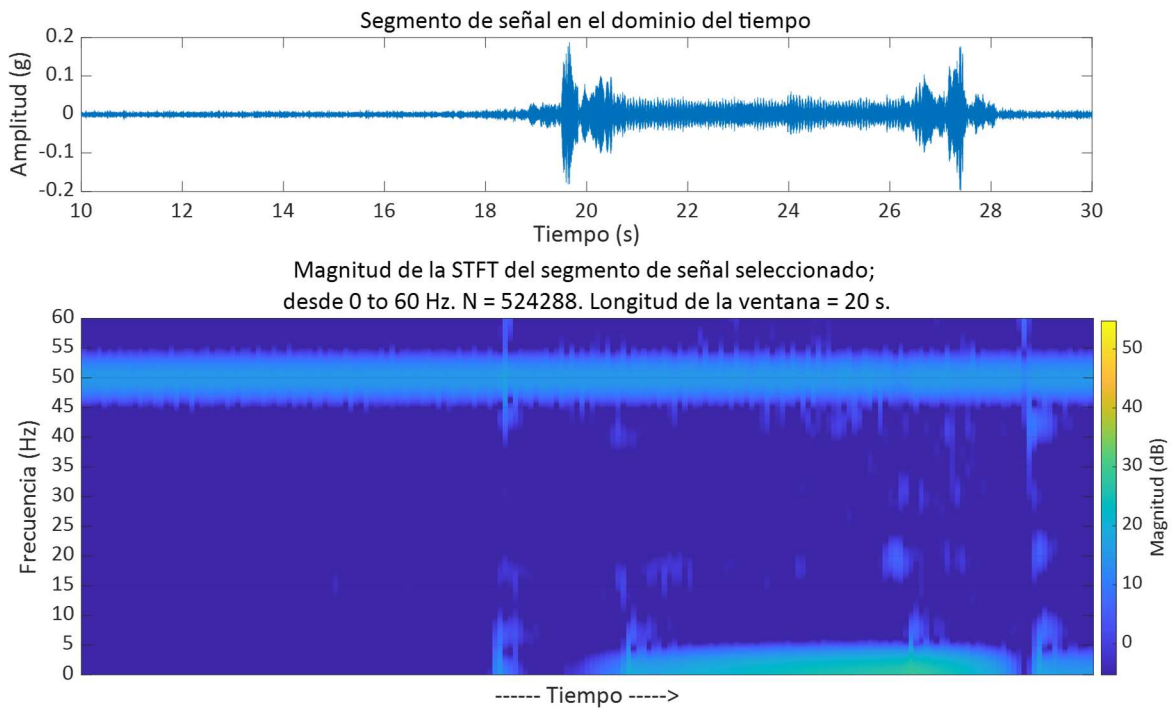


Figura 7.8. Prueba 5 del Anexo I. Parte superior: dominio temporal. Parte inferior: STFT de un segmento de señal de vibración. Ventana Blackman.

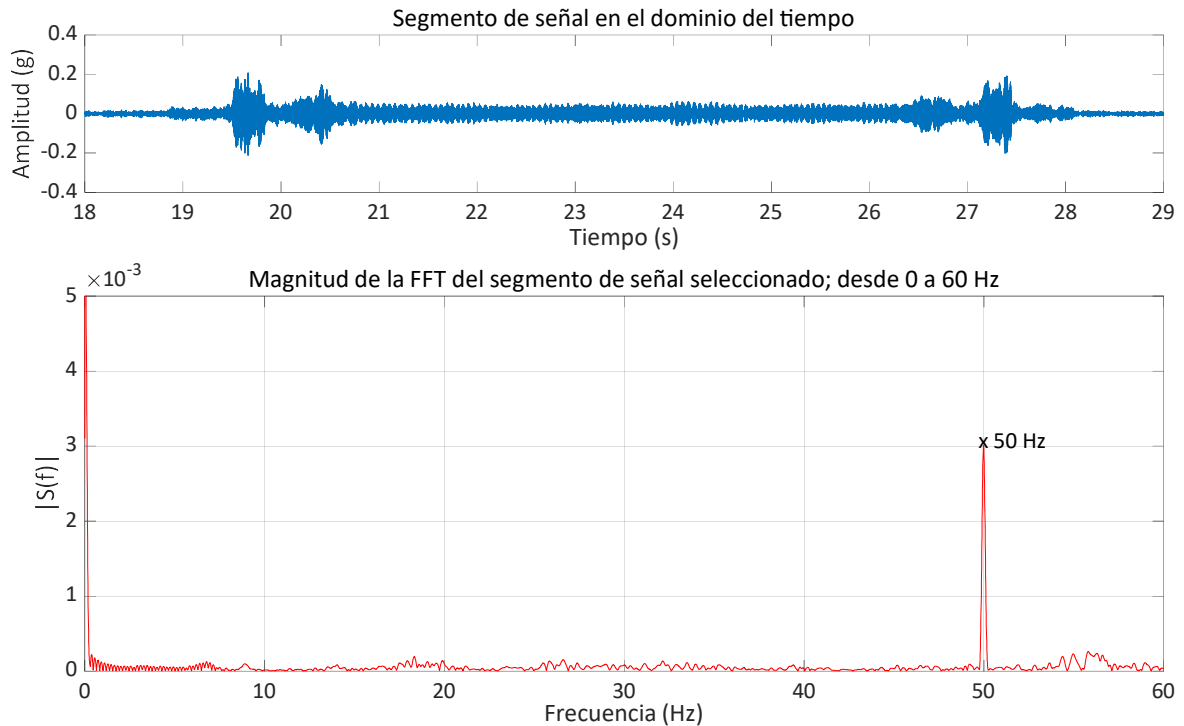


Figura 7.9. Prueba 5 del Anexo I. Parte superior, dominio temporal. Parte inferior, dominio de la frecuencia: Espectro de un segmento de señal utilizando detector de picos. Ventana Blackman; $L_w = 11$ s; B_w 0 a 60 Hz.

Por último, en la Tabla 7.1 se muestra la comparación (en diferencias porcentuales) de los tres experimentos realizados con los diferentes módulos elásticos entre el FEA, mostrado en la Tabla 6.5, y las frecuencias obtenidas del análisis espectral mediante FFT sobre la señal 1, como se muestra en la Figura 7.5.

Tabla 7.1. Comparación de frecuencias naturales del análisis espectral y FEA.

Modo	Análisis de frecuencia espectral (Hz)	$E_1 = 2 \cdot 10^{14} Pa$		$E_2 = 2 \cdot 10^{11} Pa$		$E_3 = 2 \cdot 10^{10} Pa$	
		Modo frecuencial (Hz)	Diferencia (%)	Modo frecuencial (Hz)	Diferencia (%)	Modo frecuencial (Hz)	Diferencia (%)
1º	6.36	8.38	24.1	7.20	11.67	5.80	-9.66
2º	9.13	9.98	8.52	9.07	-0.66	7.67	-19.04
3º	14.30	13.92	-2.73	13.24	-8.01	8.94	-59.96
4º	17.70	18.46	4.12	16.26	-8.86	13.83	-27.98
5º	30.80	33.58	8.28	31.34	1.72	24.32	-26.64
6º	40.30	62.78	35.81	55.37	27.22	39.25	-2.68

7.3 Discusión

El objetivo de este capítulo fue el de analizar las frecuencias naturales de la montura del telescopio JAST80 utilizando un modelo 3D simplificado y validarlo mediante el análisis espectral de las señales de los acelerómetros instalados en la instrumentación. Posteriormente, se utilizó el modelo validado y las señales de los acelerómetros en un movimiento en funcionamiento normal para analizar la influencia de las vibraciones sobre la montura.

7.3.1 Análisis espectral

En este capítulo se realizaron experimentos de análisis espectral sobre las señales de estudio utilizando las herramientas FFT optimizadas y presentadas en el Capítulo 4. El número de muestras tomadas en el dominio temporal de las señales, como se puede observar en las Figuras 7.1 y 7.2, influye en los resultados en el dominio frecuencial. Un menor tamaño de muestras implica una mayor anchura de los lóbulos principales, lo que puede ocultar otros lóbulos principales. Además, el peso relativo de los lóbulos aumenta cuanto menor es el número de muestras y menor es la ventana temporal, lo que puede llevar a confundir lóbulos secundarios con lóbulos principales.

El problema del valor máximo de frecuencia en un lóbulo ancho se soluciona con el detector de picos implementado. Sin embargo, si los lóbulos secundarios tienen un peso relativo significativo, pueden ser confundidos con lóbulos principales por el detector de picos. Para seleccionar los lóbulos principales es necesario reducir el número de lóbulos secundarios a la vez que se estrecha la anchura del lóbulo principal. En el compromiso entre reducir la anchura del lóbulo principal y disminuir los lóbulos secundarios elegimos este último objetivo mediante el enventanado de Blackman.

En el análisis de las señales 1 y 2 se utilizó además de la herramienta FFT, la herramienta STFT, que permite cuantificar la duración de un armónico en el tiempo. Esto resulta útil cuando se pretende valorar la influencia de un armónico en una estructura [107]. Al comparar los armónicos obtenidos en las Figuras 7.5 y 7.7 de la FFT de las señales 1 y 2 analizadas, se puede observar que las variaciones en frecuencia de los armónicos están por debajo del 1%, lo que indica que los dos ensayos en parada brusca por emergencia tienen la misma respuesta. Por el contrario, los pesos relativos de los armónicos difieren entre ambos espectros, siendo la señal 2 la que menos peso relativo tiene.

Por otro lado, la STFT muestra como la duración de los dos primeros armónicos con mayor magnitud se propagan durante más tiempo en la señal 1. Cuando se produce la parada brusca por emergencia, la montura queda vibrando a sus frecuencias naturales amplificadas por la vibración provocada. Un mayor tiempo de vibración de la montura está relacionado con una mayor influencia de las vibraciones producidas por la parada de emergencia.

7.3.2 Resultados del FEA frente al análisis espectral. Validación del modelo 3D simplificado

La validación del modelo 3D simplificado se llevó a cabo comparando las frecuencias naturales de la montura obtenidas mediante FEA con las frecuencias más relevantes obtenidas a partir del análisis espectral de las vibraciones medidas con los acelerómetros instalados en la instrumentación. Para ello, se realizaron varios experimentos.

En la Tabla 7.1 se observa que los resultados obtenidos del FEA con módulo elástico E_3 difieren considerablemente de los resultados obtenidos del análisis espectral y del FEA con módulos elásticos E_1 y E_2 , respectivamente. El FEA con módulo elástico E_3 se descarta por ser un material blando caracterizado por frecuencias naturales bajas, propias de módulos elásticos bajos. Los resultados con los módulos elásticos E_1 y E_2 tienen menores diferencias porcentuales con las frecuencias obtenidas del análisis espectral.

Para determinar cuál de los dos módulos elásticos del FEM se acerca más al modelo real se requiere que la distribución de masas de la Tabla 6.6 sea significativa en alguno de sus ejes o en los tres ejes. El modo 4º y el modo 6º, dada su distribución de masas, no presentan influencia sobre la montura, por lo que no serán determinantes en la comparación de las diferencias porcentuales de frecuencias con el análisis espectral. Los modos 1º, 2º y 5º del análisis con módulo elástico E_2 son los que tienen una menor diferencia porcentual frente al análisis con módulo elástico E_1 . En el caso del módulo elástico E_1 , el modo 3º es el que presenta una menor diferencia. Observando la distribución de masas de la Tabla 6.6, el modo 1º con un 32.6% en el eje X y el modo 2º con un 41.1% en el eje Z son los que más masa mueven y más influencia tienen sobre las frecuencias naturales de la montura. Todo lo anterior nos indica que debe considerarse el FEA con módulo elástico E_2 como el más aproximado al comportamiento real de la montura frente a vibraciones externas. Estos resultados están en línea con el estudio del desplazamiento del CCD en el telescopio JAST80 en la dirección Z [91]. Por último, los resultados determinaron que los desplazamientos máximos del CCD se producían para frecuencias en torno a 7 Hz, coincidiendo con la primera frecuencia natural de la estructura.

En el telescopio JAST80 se observó que la montura es más elástica que la del *Hobby-Eberly Telescope Wide-Field* [106], el Nuevo Telescopio Robótico (NRT, *New Robotic Telescope*) [108] y el telescopio JST250 adyacente al JAST80 [1], los cuales comparten una montura altazimutal con una frecuencia de resonancia en el primer modo de 10 Hz. Esto puede deberse a la geometría de la montura y al posicionamiento del telescopio, ya que éste está suspendido de la montura. Por otro lado, las monturas altazimutales tienen dos soportes que apoyan sobre el pilar, lo que confiere una mayor rigidez al conjunto montura-telescopio al no requerir contrapesos.

7.3.3 Análisis de movimientos en operación normal

Las condiciones para que la montura vibre en resonancia debido a las vibraciones producidas por el actuador dependen de que sus frecuencias coincidan con las frecuencias naturales de la montura y, además, de que su amplitud sea suficiente como para excitarlas significativamente.

En el análisis espectral mediante STFT y FFT de un movimiento en AR en modo *slewing*, las frecuencias naturales asociadas a los primeros modos obtenidos mediante el FEA no son significativas. La única frecuencia sobresaliente del resto de las frecuencias representadas son los 50 Hz de la red eléctrica.

Se concluye que las frecuencias del análisis espectral pueden coincidir con las frecuencias naturales de la montura, pero su amplitud no es determinante como para influir en la montura. Esto se puede corroborar si se compara la amplitud de los lóbulos de frecuencia pertenecientes a un movimiento con parada brusca por emergencia (Figura 7.5), con la amplitud de los lóbulos de la FFT del movimiento en funcionamiento normal (Figura 7.9).

Estudio de la firma de vibración en
la instrumentación

8

8. Estudio de la firma de vibración en la instrumentación

En este capítulo se realiza un estudio preliminar de la firma de vibración del telescopio JAST80 del OAJ mostrando, en primer lugar, el proceso de cálculo del desplazamiento que origina la vibración de la instrumentación. También se abordan los problemas asociados con frecuencias muy bajas encontrando que las frecuencias más críticas se encuentran por debajo de los 20 Hz, debido a que tales vibraciones producen los mayores desplazamientos de la instrumentación. Los resultados obtenidos permitirán, en el futuro, diseñar un sistema para detectar imágenes de observaciones no válidas adquiridas con desplazamientos excesivos a causa de la vibración.

8.1 Determinación de límites de aceleración y sus correspondientes desplazamientos

En este capítulo se determina el desplazamiento que la vibración provoca en la instrumentación del telescopio. La comparación entre este desplazamiento estimado y el máximo desplazamiento admisible, dado por el tamaño del subpíxel, es la referencia del sistema encargado de determinar si una imagen se toma o no con exceso de vibración.

Del planteamiento anterior se pretende estimar los valores límite de aceleración, según su frecuencia, para que no generen un desplazamiento superior al determinado por el tamaño del subpíxel. Los fundamentos teóricos del sistema se basan en un modelo simplificado en el que la vibración medida es una frecuencia pura. Esta es una buena aproximación a lo que frecuentemente se encuentra en las mediciones de aceleración tomadas en la vecindad de la cámara del telescopio. G. White realizó un trabajo simplificado similar aplicado al movimiento de una masa colgada de un muelle, aproximando el movimiento al de un armónico simple [118].

El principio teórico de funcionamiento del sistema es el siguiente: una vez se establece el desplazamiento máximo admisible dado por la distancia de subpíxel, se estima la aceleración máxima en cada frecuencia. Cuando se sobrepasa este valor máximo se considera que la calidad de la imagen tomada es deficiente y la imagen puede ser rechazada o sometida a un tratamiento de post-procesamiento (si procede). Esta idea permite avisar cuando una componente de aceleración puede provocar un desplazamiento por encima del umbral admisible.

El subpíxel se define como una longitud de seguridad por debajo del tamaño del píxel. La CCD está formada por una matriz de píxeles, con una longitud por píxel de $10\ \mu\text{m}$ de lado [119]. Desde el equipo de ingeniería OAJ-CEFCA se establece el tamaño de subpíxel sensible a dar una captura errónea de los fotones si existe una desviación con respecto al centro del píxel de $5\ \mu\text{m}$. Por tanto, una desviación mayor de $5\ \mu\text{m}$ se considera que está fuera del rango efectivo del píxel. Hay que tener en cuenta que el desplazamiento se mide en el punto donde se mide la aceleración, que son los puntos más cercanos a la CCD.

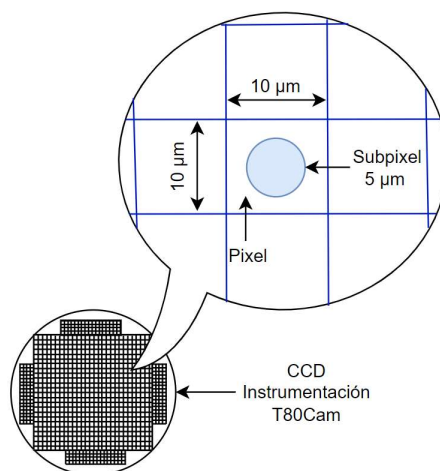


Figura 8.1. Detalle del tamaño del píxel y subpíxel.

Partiendo de la aceleración, que es la magnitud medida por el acelerómetro,

$$a(t) = A \cos(\Omega t) \quad [m/s^2] \quad (18)$$

Por doble integración, y asumiendo constantes de integración nulas, se obtiene un desplazamiento $d(t)$:

$$d(t) = \left(-\frac{A}{\Omega^2}\right) \cos(\Omega t) \quad [m^2] \quad (19)$$

Por lo tanto, el desplazamiento máximo es A/Ω^2 . Por otro lado, si se propone un valor límite $D_{subpixel} = 5 \mu m$ se tiene que:

$$\frac{A}{\Omega^2} < D_{subpixel} = 5 \mu m \quad (20)$$

La aceleración medida por los acelerómetros, A_g , tiene como unidad g, mientras que la aceleración de la Ecuación 20 utiliza la aceleración de la gravedad, por lo que es necesario hacer la conversión según $1 g = 9.8 m/s^2$.

$$A_g < \frac{(2\pi F)^2 D_{subpixel}}{9.8} \quad (21)$$

La medida de la aceleración por los acelerómetros se realiza por métodos discretos a través de conversores analógico/digital. Por ello, la aceleración vendrá dada en términos de una secuencia de tiempo discreto $a(n)$ que representa las muestras de la señal de aceleración medida. El proceso para determinar si esta señal supera el valor límite del subpíxel parte de la transformación de la secuencia $a(n)$ –muestreada a F_s muestras/s– a su representación en frecuencia mediante FFT.

Sea $|A(k)|$, $k = iF_s/N$; $i = 0, \dots, N - 1$; el módulo de la FFT de tamaño N de la secuencia $a(n)$. Sea $|A_{ss}(k)| = 2|A(k)|/N$, $k = jF_s/N$; $j = 0, \dots, (N/2) - 1$, la normalización unilateral de $|A(k)|$.

De este modo, se compararán las gráficas de los desplazamientos en el dominio temporal y frecuencial con el mismo límite $D_{subpixel}$. Conociendo las componentes de frecuencia de la señal de aceleración $|A_{ss}(k)|$, se comparan con la aceleración máxima que produciría un desplazamiento del valor límite al tamaño del subpíxel. Este límite viene dado por la discretización de la Ecuación 21. La relación desplazamiento-aceleración en frecuencia es entonces:

$$A_{subpixel}(k) = \frac{(2\pi k)^2}{9.8} D_{subpixel},$$

$$k = \frac{jF_s}{N}; \quad (22)$$

$$j = 0, \dots, (N/2) - 1$$

Se intuye que, por falta de resolución a baja frecuencia, es difícil observar si se supera el valor del subpíxel. Podemos obtener una información más clara a baja frecuencia representando los desplazamientos en lugar de las aceleraciones. Para ello, el desplazamiento máximo de subpíxel será constante en frecuencia y se obtiene mediante transformación de la aceleración. Para ello, despejando $D_{subpixel}$ de la Ecuación 22 se obtiene:

$$D(k) = \frac{|A_{ss}(k)|}{(2\pi k)^2} 9.8;$$

$$k = \frac{jF_s}{N}; \quad (23)$$

$$j = 0, \dots, (N/2) - 1$$

En resumen, la comparación de las mediciones con los límites impuestos por el tamaño del subpíxel puede hacerse en términos de aceleración:

$$|A_{ss}(k)| = \frac{2}{N} |A(k)| < A_{subpixel}(k) = \frac{(2\pi k)^2}{9.8} D_{subpixel};$$

$$k = \frac{jF_s}{N}; \quad (24)$$

$$j = 0, \dots, (N/2) - 1$$

o bien en términos de desplazamiento:

$$D(k) = \frac{|A_{ss}(k)|}{(2\pi k)^2} 9.8 < D_{subpixel}$$

$$k = \frac{jF_s}{N} \tag{25}$$

$$j = 0, \dots, (N/2) - 1$$

Para realizar representaciones frecuenciales continuas se cambia la variable discreta k por la variable continua comúnmente denotada como f . No obstante, se asume que las representaciones en el dominio de la frecuencia provienen de herramientas como la FFT que devuelven resultados en una variable frecuencial discreta.

En las Figuras 8.2 y 8.3 se realizan dos experimentos que muestran el proceso descrito para dos señales diferentes. En la parte superior izquierda se encuentra la representación en el dominio del tiempo de una señal de aceleración $a(n)$. En el gráfico superior central se tiene la comparación establecida por la Ecuación 24. Es decir, la representación en el dominio de la frecuencia de un solo lado de la aceleración medida, $A_{ss}(k)$, comparada con el límite en forma de parábola, $A_{subpixel}(k)$ (en línea roja). En el gráfico central inferior está la comparación en términos de desplazamientos establecida por la Ecuación 25. Esto es, la representación en el dominio de la frecuencia de un solo lado del desplazamiento $D(k)$ comparado con el límite constante $D_{subpixel}$ (en línea roja). Se puede confirmar que la aceleración medida supera el límite si y sólo si el desplazamiento calculado por la Ecuación 22 supera $D_{subpixel} = 5 \mu m$. Finalmente, en la parte inferior derecha se tiene el gráfico de la representación en el dominio del tiempo del desplazamiento correspondiente a la aceleración medida. Aquí, el desplazamiento se compara de nuevo con el valor máximo admisible $D_{subpixel} = 5 \mu m$ (en línea roja).

La Figura 8.2 muestra el proceso descrito para un solo tono $a_1(t) = A \cos(2\pi F_0 t)$, con $A = 0.04 \text{ g}$ y $F_0 = 39 \text{ Hz}$. Por un lado, muestra que la representación frecuencial de un solo lado $|A_{ss}(k)| = 2|A_1(k)|/N$, $k = jF_s/N$; $j = 0, \dots, (N/2) - 1$, con $A_1(k) = FFT[a_1(n)]$, da un armónico cuyo valor máximo (0.04 g) es la amplitud del tono único ($A = 0.04 \text{ g}$) y, por otro lado, se comprueba que la comparación de la señal medida con el límite puede realizarse tanto en términos de aceleración como de desplazamiento. En este caso, la aceleración medida supera el límite dado por las líneas rojas.

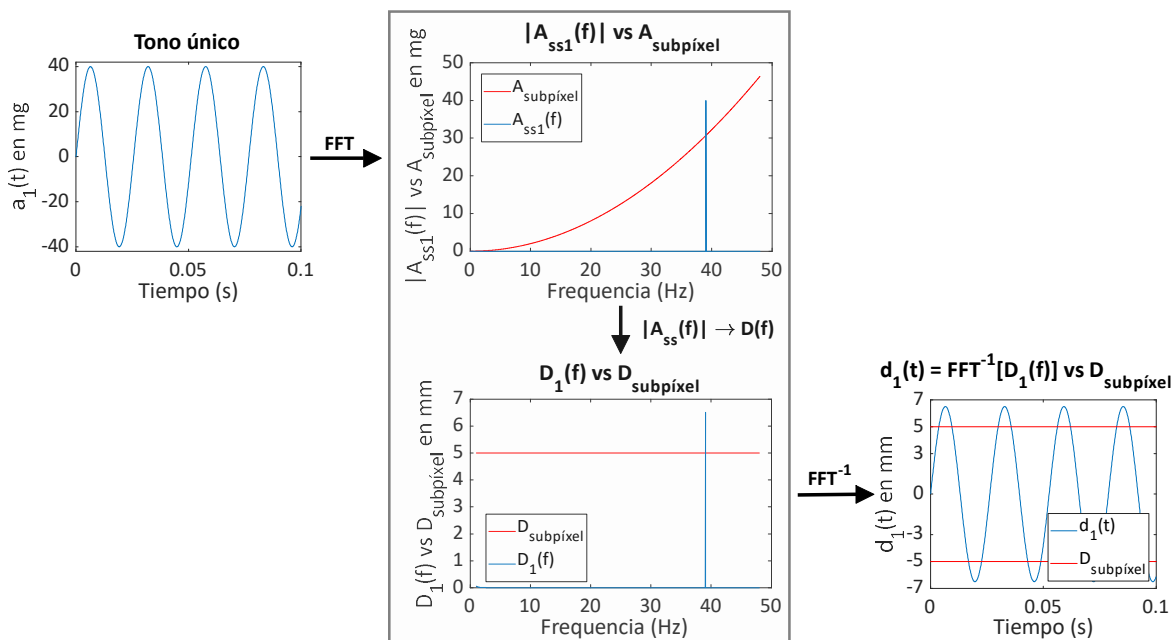


Figura 8.2. Comparaciones de umbrales dadas por la Ecuación 24 y la Ecuación 25 para una señal $a_1(t) = A \cos(2\pi F_0 t)$, con $A = 0.04 \text{ g}$ y $F_0 = 39 \text{ Hz}$. Las líneas rojas establecen el valor máximo de la aceleración (arriba) o su correspondiente desplazamiento (abajo).

La Figura 8.3 muestra el proceso descrito para una señal multitono $a_2(t) = \sum_{k=1}^5 A_k \cos(2\pi F_k t)$, con $A_k = [0.00015, 0.0015, 0.0055, 0.009, 0.018] \text{ g}$ y $F_k = [1.95, 6.84, 11.72, 16.60, 21.48] \text{ Hz}$. Cada armónico de la aceleración medida supera de nuevo el límite dado por la parábola roja $|A_{ss}(k)| > A_{subpixel}(k)$, pero apenas es visible para el armónico inferior. Sin embargo, el efecto de sobrepasar el límite es más visible a bajas frecuencias al representar desplazamientos en lugar de aceleraciones.

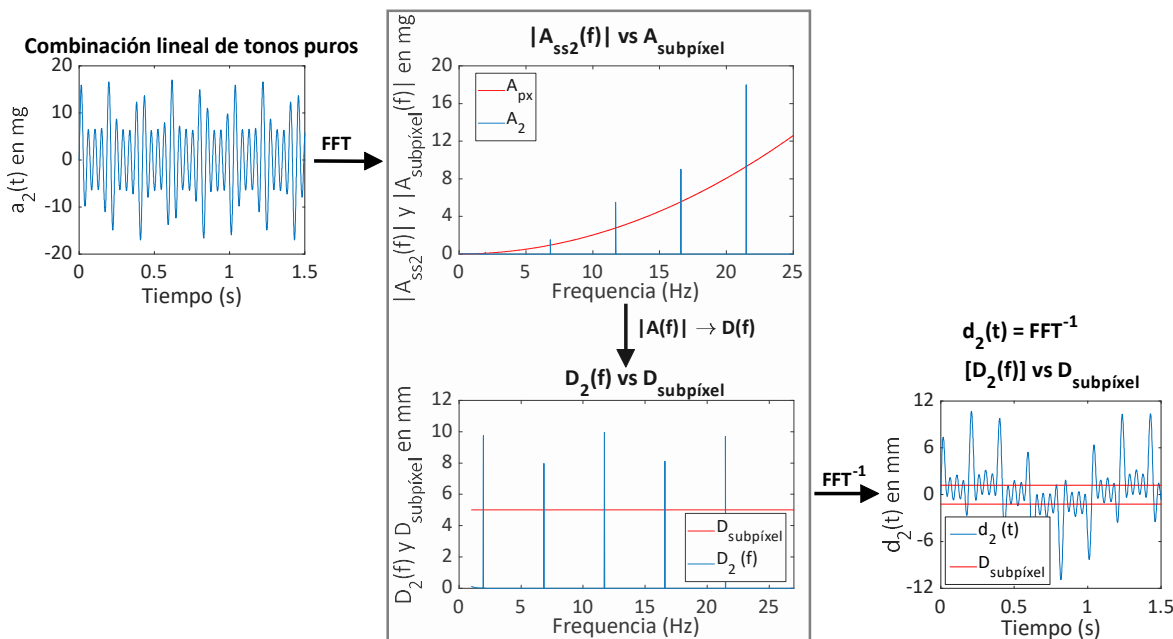


Figura 8.3. Comparaciones de umbrales dadas por la Ecuación 24 y la Ecuación 25 para una señal multitono $a_2(t) = \sum_{k=1}^5 A_k \cos(2\pi F_k t)$. Las líneas rojas establecen el valor máximo de la aceleración (arriba) o su correspondiente desplazamiento (abajo).

Del ejemplo presentado en la Figura 8.3 se puede concluir que las aceleraciones de baja amplitud (en el rango de mg) a frecuencias inferiores a 10 Hz son más críticas que las aceleraciones de mayor amplitud a frecuencias superiores. En otras palabras, el rango de frecuencias por debajo de 10 Hz es sumamente crítico.

Los resultados están en consonancia con el trabajo de G. White [118], que determinó que las altas frecuencias no podían asociarse a grandes desplazamientos.

Este hecho hace necesario conseguir una buena representación espectral de las frecuencias en el rango de 1 a 10 Hz, lo que se hace difícil, como se demostrará en los experimentos siguientes, cuando no se elimina el nivel de la CC por métodos de procesado de señal.

8.2 Desviación de las aceleraciones medidas en la instrumentación del telescopio JAST80

Antes de introducir nuevos experimentos, en la Figura 8.4 se muestra la aceleración medida en el telescopio JAST80 durante un movimiento de *slewing* con DEC de 40° a 0° y AR en 0° correspondiente a la Prueba 1 del Anexo I. El registro duró 60 segundos y la frecuencia de muestreo fue de 10240 muestras/s. En la parte superior de dicha figura se muestran los datos sin procesar (en azul) mientras que línea blanca representa el valor medio. Se puede identificar el movimiento de seguimiento desde $t = 4,5$ s hasta $t = 14$ s. Lo destacable en esta figura es la presencia de una deriva en el valor medio de la señal (claramente visible por la línea blanca).

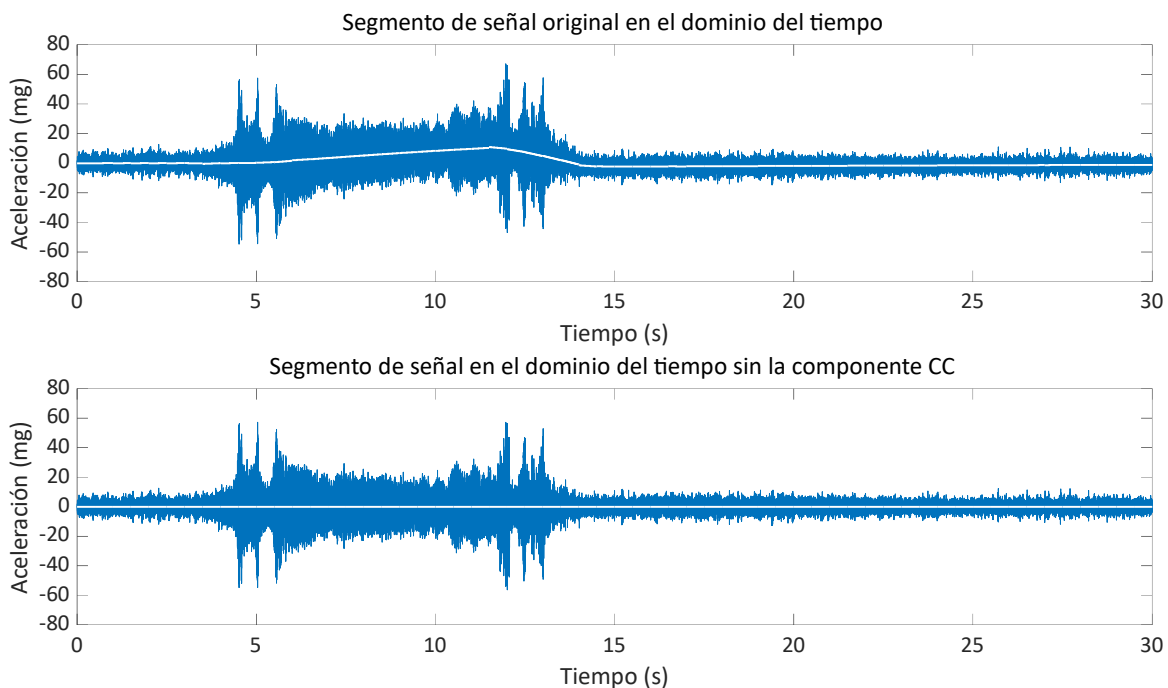


Figura 8.4. Prueba 1 del Anexo I. Efecto de eliminación de la CC.

En el gráfico inferior de la Figura 8.4 se elimina la de la señal mediante la función “*detrend*”, que elimina la línea de mejor ajuste recto de los datos. Es decir, resta la tendencia de los elementos de la señal de aceleración.

La CC encontrada en las mediciones de aceleración del telescopio aparece en forma de derivas lineales con diferentes pendientes. Los experimentos de simulación de la siguiente sección explican el escenario y ayudan a desarrollar una estrategia válida para tratar con mediciones reales. Se llegará a la conclusión de que es necesario eliminar la CC para permitir un procesado correcto de la señal en la banda de frecuencia más crítica, a muy baja frecuencia.

8.3 Experimentos para la eliminación de la CC

La presencia de CC en las señales de aceleración afecta negativamente a su representación espectral en frecuencias inferiores a 1 Hz. En la sección anterior (sección 8.1) se concluyó que el intervalo espectral de 1 a 10 Hz es de gran importancia en el contexto del trabajo, ya que incluso aceleraciones de muy baja amplitud pueden producir desplazamientos inaceptables. Por lo tanto, se propone un bloque de eliminación de CC

como primera etapa en la cadena de procesado de la señal. La ventaja de la eliminación de la CC se comprueba en los siguientes experimentos. También mejora al eliminar la CC la representación espectral dada por la FFT.

En todos los experimentos que se van a presentar, la notación será la siguiente: $a_1(n)$ denota la señal multitono original compuesta por armónicos muy cercanos (en azul en las figuras), $a_2(n)$ denota la señal $a_1(n)$ original con CC añadida (en verde en las figuras), por último, $a_3(n)$ representa la señal $a_2(n)$ tras eliminar la CC mediante una estrategia de filtrado de paso alto (en magenta en las figuras).

La comparación de la $FFT[a_1(n)]$ y la $FFT[a_2(n)]$ ilustra el efecto negativo de la CC en la banda de baja frecuencia. La comparación de $FFT[a_1(n)]$ y $FFT[a_3(n)]$ en el dominio de la frecuencia permite evaluar la estrategia de eliminación.

La Tabla 8.1 resume los parámetros de los experimentos. En todos los casos, el sistema trata con señales originales multitonales. Cada armónico tiene una amplitud de 0,8 mg. En los gráficos en el dominio de la frecuencia se ha adoptado la representación sólo en frecuencias positivas (*single side*), véase la Ecuación 24. Las diferencias entre los experimentos radican en la señal original y la resolución espectral. La CC añadida artificialmente es una deriva de alta pendiente seguida de una deriva de baja pendiente sintetizada según las características de las mediciones reales (véase el ejemplo de la Figura 8.4).

Tabla 8.1. Conjunto de experimentos destinados a eliminar la componente CC.

Experimento	Número de armónicos	Distribución de frecuencias	Resolución espectral
Experimento A	10	No equiespaciadas	$a_1(n)$ los armónicos son múltiplos de F_s/N
Experimento B	10	No equiespaciadas	$a_1(n)$ los armónicos no son múltiplos de F_s/N
Experimento C	40	Equiespaciadas	$a_1(n)$ los armónicos son múltiplos de F_s/N
Experimento D	40	Equiespaciadas	$a_1(n)$ los armónicos no son múltiplos de F_s/N

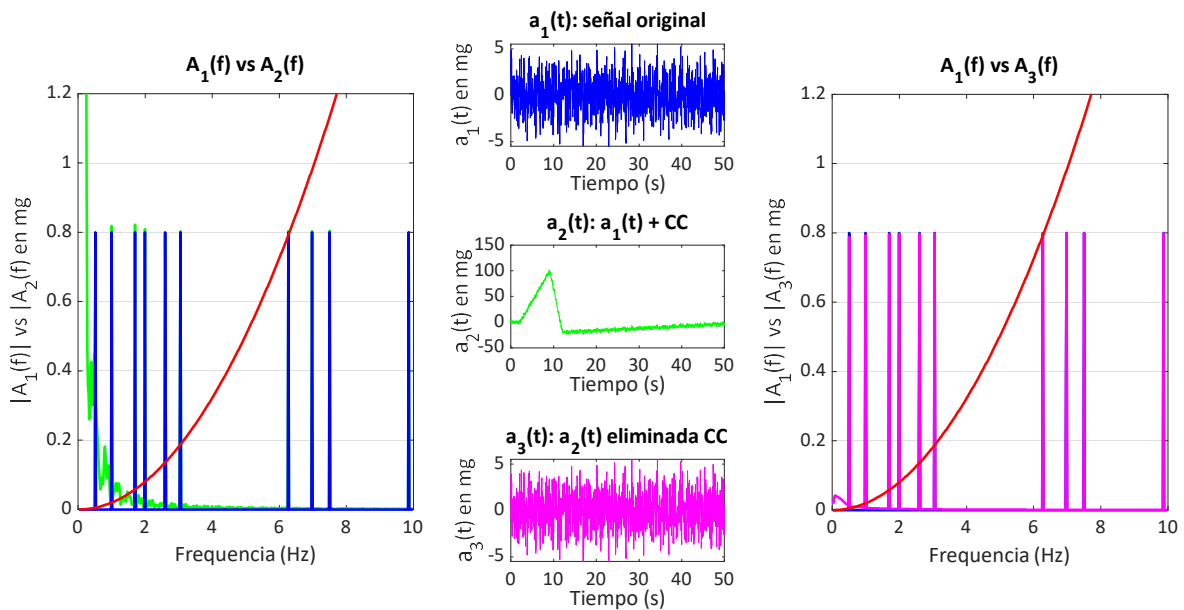


Figura 8.5. Experimento A. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.

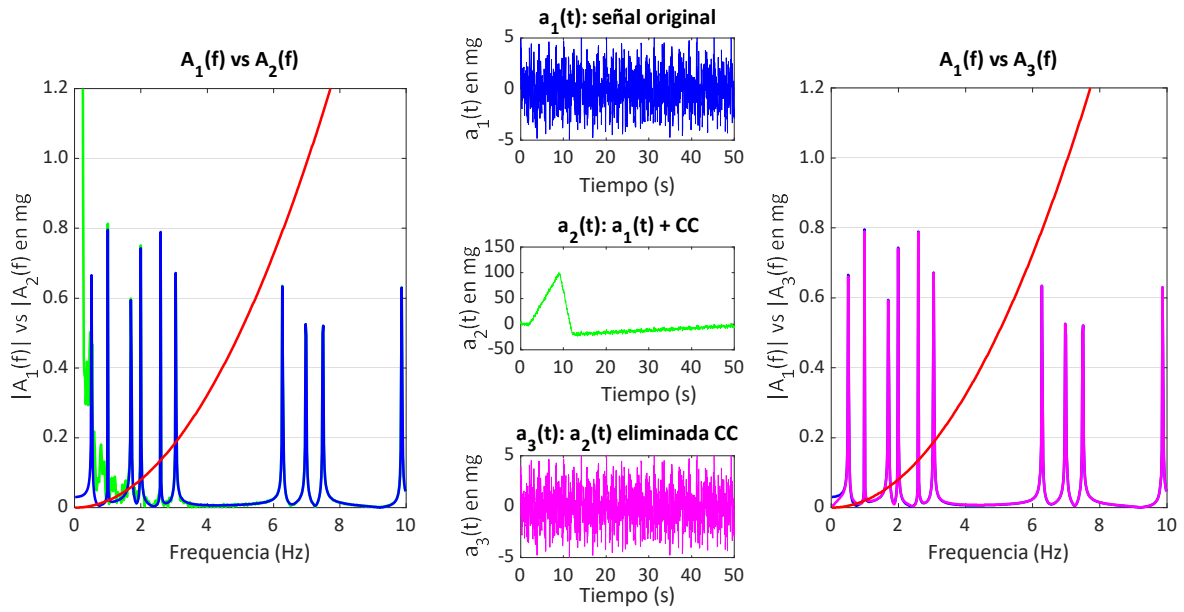


Figura 8.6. Experimento B. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.

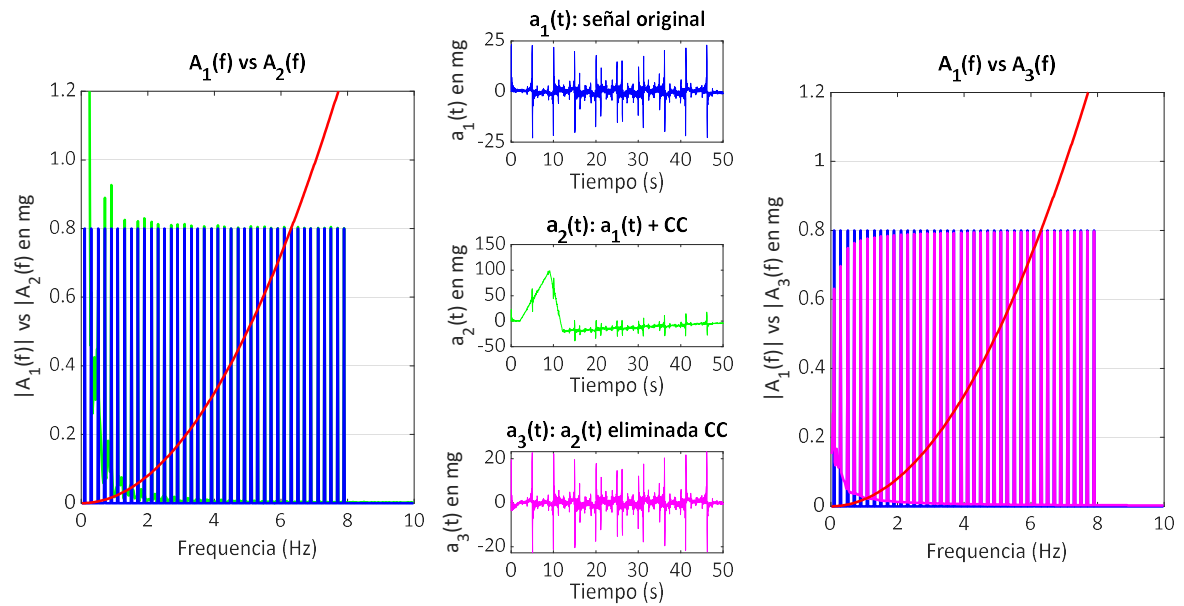


Figura 8.7. Experimento C. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.

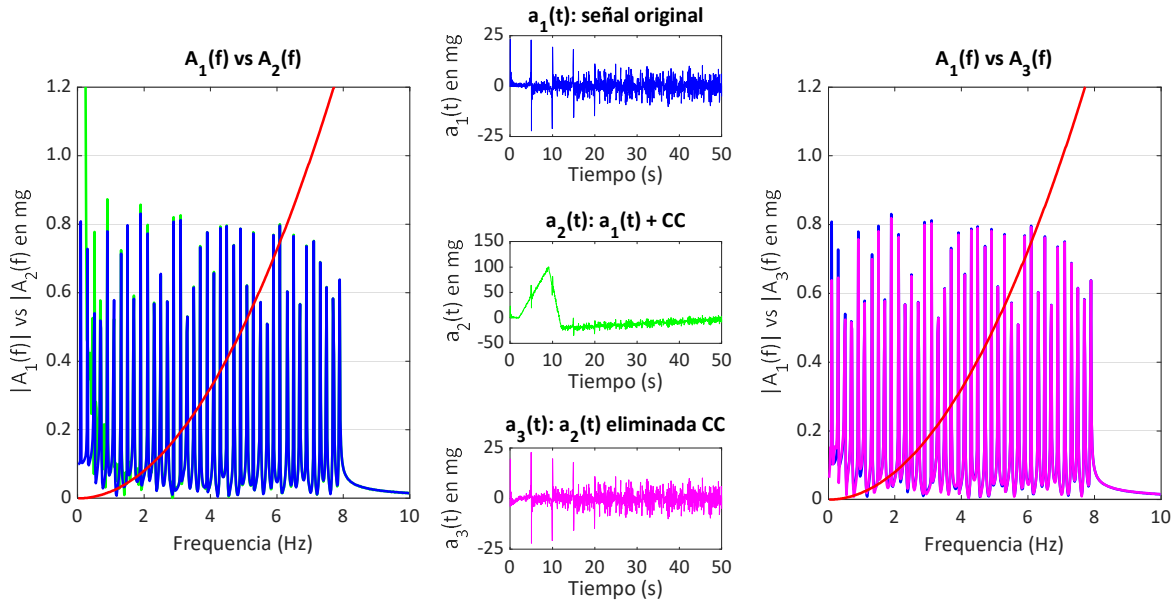


Figura 8.8. Experimento D. Efecto de eliminación de la componente CC en una señal sintetizada. La línea roja establece el valor máximo de la aceleración.

De las Figuras 8.5 a la 8.8 se puede deducir que:

La resolución espectral tiene una mayor importancia, ya que la amplitud de los armónicos en la representación gráfica puede verse muy reducida. Por ejemplo, comparar los armónicos azules en la gráfica $A_1(f)$ y $A_2(f)$ en la Figura 8.5 frente a la Figura 8.6, o la Figura 8.7 frente a la Figura 8.8. Suponiendo que el límite impuesto del nivel del armónico es la línea roja, se puede deducir que la falta de resolución espectral se traduce en una mayor complejidad en la idoneidad de la aplicación.

La distribución espectral de $a_2(t)$ está alterada por la CC y no refleja el espectro de la señal original $a_1(t)$. El efecto se muestra entre los espectros verdes y azules.

Sin embargo, si se elimina la CC, el espectro resultante de $a_3(t)$ se ajusta a lo esperado. Se observa que, si comparamos la señal original $A_1(f)$ y $A_3(f)$, para frecuencias superiores a 1 Hz es útil eliminar la CC para sintetizar una versión aceptable (en magenta) de la antigua señal multitono (en azul). Por debajo de 1 Hz, ni siquiera la eliminación de la CC sirve como estrategia. Se observa que, para frecuencias inferiores a 1 Hz, los valores del espectro se disparan debido al efecto de la doble integración para pasar de aceleración a desplazamiento. Esto lleva a tener que descartar las componentes de frecuencia inferiores a 1 Hz.

8.4 Resultados de experimentos

En esta sección se desarrollan dos experimentos con una señal de aceleración definida. El primero de ellos, centrado en la eliminación de la CC y su análisis espectral mediante FFT. En el segundo, se emplea un enventanado de la señal en diferentes tramos temporales y se comparan los resultados de su análisis espectral mediante FFT.

8.4.1 Filtrado de la CC

En la sección 8.2 se determinó que rangos frecuenciales por debajo de los 10 Hz son críticos, ya que incluso las aceleraciones de baja amplitud están asociadas a grandes desplazamientos. En la sección 8.3 se muestra como la presencia de una CC en las señales de aceleración afecta negativamente a su representación espectral dada por la FFT por debajo de 1 Hz. Por tanto, es necesario asegurar una representación espectral precisa de las frecuencias en el rango de 1 a 10 Hz para determinar los desplazamientos que afecten a la calidad de las imágenes.

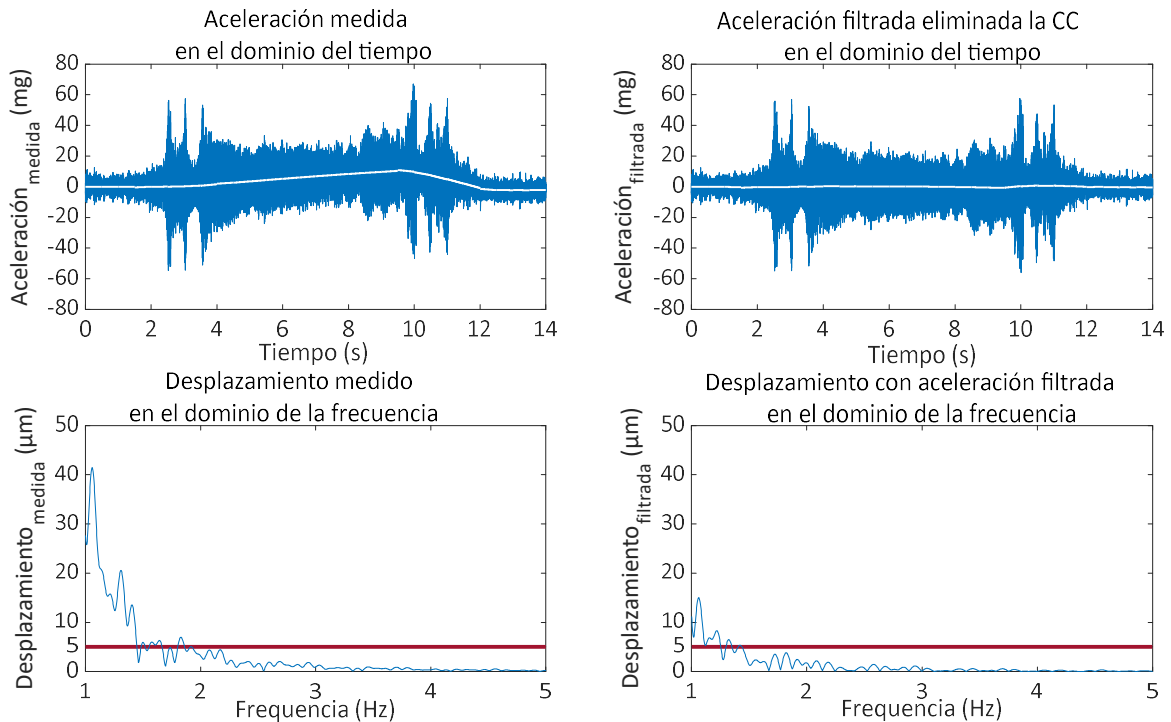


Figura 8.9. Efecto de eliminación de CC en una señal real DEC de 0° a 40° y AR 40°. La línea roja del gráfico establece el valor máximo del desplazamiento.

En el experimento mostrado en la Figura 8.9, se analiza una señal real producida por un movimiento DEC de 0° a 40° y AR 40°, (Prueba 1 del Anexo I). La CC se elimina mediante una función “detrend”. La eliminación de la CC disminuye la potencia de la señal a frecuencias inferiores a 2 Hz y, lo que es más importante, hace que todo el proceso sea más fiable.

8.4.2 Enventanado de la señal en diferentes intervalos de tiempo

En este experimento se ilustra como la elección del tamaño de la ventana rectangular que selecciona el fragmento de señal determina la anchura de los lóbulos en el dominio de la frecuencia.

En la parte superior de la Figura 8.10 se muestra la representación en el dominio temporal de la aceleración medida en un movimiento de *tracking* del telescopio con parada brusca por emergencia (Prueba 3 del Anexo I). La parte activa de la señal a analizar se selecciona mediante ventanas de diferente tamaño. La eliminación de CC se lleva a cabo como primera etapa. En la Figura 8.10 se seleccionaron tres ventanas rectangulares de diferente longitud (ventana cian de 0,4 s; ventana verde de 0,8 s y ventana magenta de 1,6 s).

Los colores de los códigos se mantienen en los gráficos en el dominio de la frecuencia mostrados en la parte inferior. Las ventanas avanzan en el tiempo para proporcionar un seguimiento en tiempo real. Todas las ventanas se desplazan por la señal a la misma velocidad, lo que permite contrastar el efecto del tamaño.

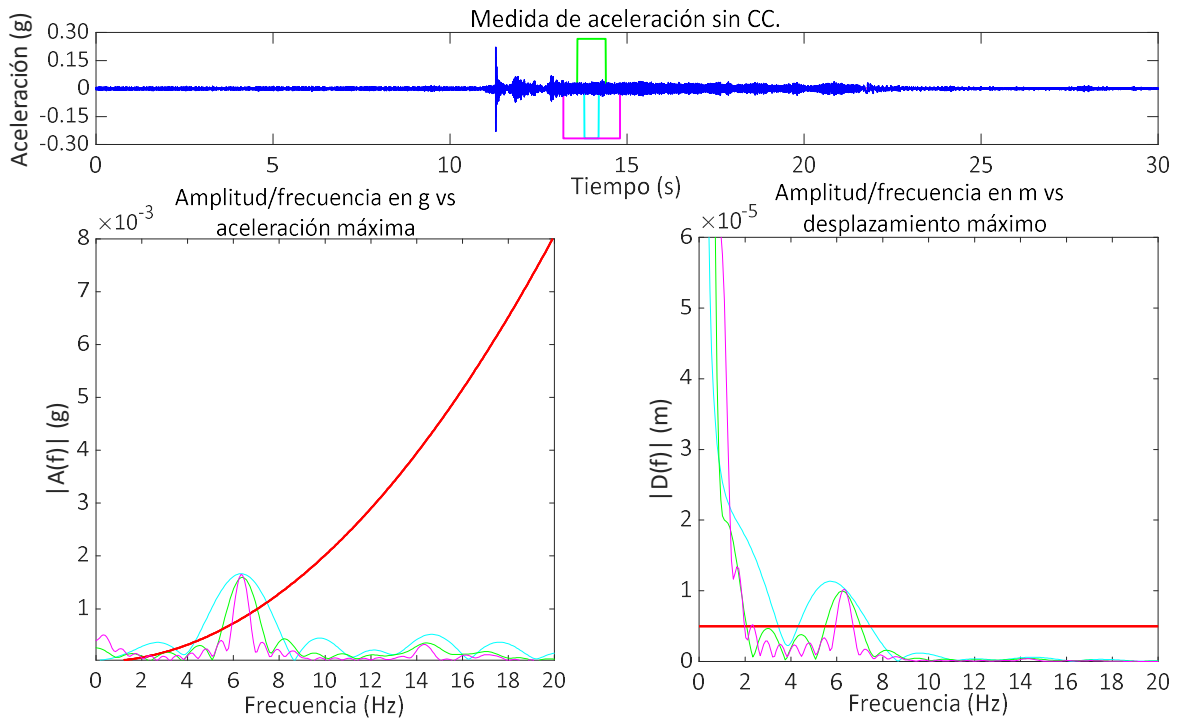


Figura 8.10. Seguimiento de un movimiento de tracking. Influencia de las ventanas en el análisis espectral. La línea roja indica el valor máximo de la aceleración y el desplazamiento, respectivamente.

Para cada intervalo de tiempo de la señal, seleccionado por las ventanas, la aplicación calcula la aceleración y el desplazamiento correspondiente en el dominio de la frecuencia denotados como $A(f)$ y $D(f)$, respectivamente. El gráfico inferior izquierdo muestra la aceleración y el inferior derecho el desplazamiento. Tanto $A(f)$ como $D(f)$ se comparan con el valor máximo correspondiente resaltado con líneas rojas. Una parábola establece el umbral para la aceleración mientras que un límite constante $D_{\text{subpíxel}} = 5 \mu\text{m}$, establece el desplazamiento máximo.

8.5 Discusión

En este capítulo se han desarrollado las ideas básicas para el diseño de un sistema que permita monitorizar en tiempo real los desplazamientos que se producen en la CCD de la instrumentación T80Cam del telescopio JAST80. Este sistema establece la calidad de imágenes en términos de vibración por el desplazamiento producido a nivel de píxel. En un futuro, con esa información, el operador del telescopio determinará la validez de las imágenes en función de los instantes en los que se han producido las vibraciones, junto con su duración. De esta manera, el post-procesado de imágenes evitará tratar las imágenes afectadas. Además, el software desarrollado también se utilizará para detectar posibles fallos electromecánicos o causados por fenómenos meteorológicos que influyan en la observación.

Se observa que las vibraciones a bajas frecuencias producen desplazamientos superiores a los permitidos en la CCD, tal y como se había analizado en los fundamentos teóricos y en el estado del arte. Valores de mg con frecuencias por debajo de los 10 Hz provocan desplazamientos que superan el límite subpíxel.

Los resultados del trabajo están en línea con el realizado por C. Trigona et al. [24] en el observatorio de "Serra la Nave". Los autores observaron picos de aceleración cerca de 5,5 Hz con amplitudes de 0,1 g, que, como en este caso, afectan a la calidad de la imagen. Utilizaron una estructura triaxial para medir las aceleraciones en los tres ejes del plano. Esto no ha sido posible en nuestro estudio, debido a la descompensación que se produciría en la instrumentación si colocáramos tres acelerómetros. El problema de las bajas frecuencias también se puso de manifiesto en el telescopio *Subaru* [61] y en el telescopio *TMT* [120]. En este último encontraron un rango frecuencial crítico entre 5 Hz y 20 Hz. A diferencia de nuestro estudio, en el que se miden todas las vibraciones que llegan a la instrumentación, los autores centraron su estudio en el engranaje del motor altazimutal. El estudio sobre vibraciones realizado por G. White [118] estableció las bajas frecuencias como un rango peligroso debido al desplazamiento que produce con bajas amplitudes, lo que apoya nuestros experimentos.

Conclusiones y líneas futuras de investigación

9

9. Conclusiones y líneas futuras de investigación

Los experimentos realizados en esta tesis doctoral evidenciaron la necesidad de supervisar y atenuar las perturbaciones en forma de vibraciones generadas por el accionamiento de la brida 2B en el telescopio JAST80 para el movimiento en AR en modo *slewing*. Debido a la geometría de la montura, el telescopio queda suspendido de su extremo, lo que facilita su flexión por la vibración causada por una parada brusca inesperada. Para abordar este problema se validó un modelo 3D simplificado de la montura que proporciona una plataforma para futuros experimentos sin necesidad de someterla directamente a una excitación mecánica. Además, en los experimentos realizados se midió el desplazamiento en la CCD debido a la vibración. El análisis espectral de las señales de los acelerómetros determinó las frecuencias que tienen mayor influencia en dicho desplazamiento. Los resultados cuantificados permitirán implementar nuevas técnicas de control que mitiguen las perturbaciones.

9.1. Conclusiones

Del trabajo realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- El equipo de medida empleado para cuantificar las vibraciones en la CCD de la instrumentación de observación demostró ser altamente efectiva. El análisis de coherencia entre los diferentes acelerómetros muestra una alta similitud en la gama de frecuencias estudiada. Esto implica que el posicionamiento de un acelerómetro en cualquiera de las esquinas de la FSU puede ser suficiente para representar la vibración medida en cualquier punto del plano. Sin embargo, es necesario completar los estudios realizados mediante ejes triaxiales que permitan medir la vibración en las tres direcciones. La conexión del chasis de la tarjeta de adquisición de datos a través de la red Ethernet del OAJ, junto con el sistema de comunicaciones empleado por CEFCA permitió superar la distancia entre el JAST80 y el laboratorio remoto. Esta comunicación facilita la realización de experimentos en línea sin necesidad de realizar desplazamiento alguno.
- Los resultados de las mediciones de vibración realizadas demuestran que las aceleraciones generadas durante cualquier movimiento en modo *slewing* no son significativas en ninguna frecuencia del espectro analizado. Sin embargo, durante el movimiento en AR en modo *slewing*, al realizar una parada brusca por emergencia, las amplitudes de vibración se acercan al límite máximo de la instrumentación de observación. Estos hallazgos respaldan la estrategia propuesta de utilizar la parada inesperada por emergencia como excitación externa a la montura del telescopio. Esta metodología se asemeja a la aplicación de medios físicos que golpean la estructura para excitarla como se verifica en estudios de telescopios en construcción. Por lo tanto, se sugiere que esta metodología pueda ser utilizada como una alternativa eficaz y segura de ensayo para obtener las frecuencias naturales de los telescopios en producción, lo que contribuye a la mejora de su rendimiento. Además, las frecuencias naturales de la montura del telescopio se sitúan en el rango frecuencial de los resultados de otras investigaciones, lo que confirma que las frecuencias por debajo de los 100 Hz son las más influyentes en la interacción con las frecuencias de resonancia de la montura y los desplazamientos producidos en la instrumentación.
- A partir del modelo 3D simplificado de la montura se realizaron simulaciones sobre la brida 2B utilizando módulos elásticos correspondientes a diferentes materiales. Los resultados determinaron que el ensayo con un módulo elástico similar al del acero es el que más se aproxima al comportamiento real de la brida 2B. Además, se llevó a cabo un estudio comparativo entre diferentes tamaños de mallado. Sin embargo, el coste computacional de un mallado con elementos más pequeños no compensa el resultado con el tiempo empleado en el procesado. Por lo tanto, un mallado con elementos intermedios proporciona resultados similares de manera más eficiente.
- Los resultados obtenidos a través del FEA sobre la distribución de masas mostraron que los modos 1º, 2º y 5º son los más influyentes sobre la montura. Se observó que coincidían con las frecuencias del análisis espectral. Este resultado se corroboró mediante un análisis STFT de la señal de excitación al mantener a la estructura vibrando durante más tiempo en dichos modos. Además, se comprobó que la masa en el 2º modo, concretamente en el eje Z, coincidía con el eje de instalación de los acelerómetros en el plano de la CCD. Este hallazgo refuerza aún más la

precisión del modelo 3D simplificado. La correlación entre los modos de vibración y las frecuencias espectrales proporcionan una comprensión más profunda de la distribución de masas en la montura. Estos resultados son fundamentales en futuros ensayos de simulación para mejorar del rendimiento.

- El modelo 3D validado se comparó con el análisis espectral de un movimiento normal en AR en modo *slewing*. Sin embargo, los resultados obtenidos indicaron que las frecuencias observadas en la FFT no guardan relación alguna con los resultados del FEA. En el análisis espectral de la señal, no destacó ninguna frecuencia relevante, a excepción de la frecuencia acoplada de la red eléctrica. Además, los valores de amplitud del análisis espectral son próximos a cero, lo que sugiere que no existe frecuencia alguna que pueda aproximarse a los modos frecuenciales del modelo 3D. A partir de este análisis se desprende que la interacción entre el movimiento dado y las frecuencias naturales de la montura es despreciable y por tanto no se genera interacción alguna.
- La influencia de la vibración con respecto a la calidad de imagen se analizó mediante la cuantificación del desplazamiento que se produce entre los fotones y la CCD. Para ello se calculó el desplazamiento de la instrumentación en las condiciones más desfavorables, con un movimiento AR en modo *slewing* y un límite de desplazamiento subpíxel. Durante los ensayos se observó que frecuencias bajas producían desplazamientos superiores al tamaño de subpíxel. Este desplazamiento genera la pérdida de fotones del píxel a píxeles colindantes, lo que se traduce en una disminución significativa de la calidad de imagen. Este hallazgo subraya la importancia de tener en cuenta la influencia de la vibración en aplicaciones que requieren una alta precisión y resolución como en la calidad de imagen. A través de una comprensión más profunda de este fenómeno se pueden desarrollar estrategias y técnicas para minimizar los efectos negativos de la vibración en el telescopio JAST80 como se comprueba en la revisión bibliográfica.

9.2. Líneas de investigación futuras

Las conclusiones obtenidas del trabajo realizado en esta tesis doctoral abren nuevas líneas de investigación que permitirán en el futuro extrapolar los resultados a otros telescopios profesionales. En concreto, los resultados pueden aprovecharse tanto para el telescopio objeto de estudio en nuestro trabajo como para otros telescopios con similar estructura (montura ecuatorial-alemana), tales como el telescopio gemelo en el CTIO (Chile).

En particular, los resultados abren la puerta a aplicaciones como un mantenimiento predictivo de la estructura. Siguiendo la línea de investigación de R. Guo et al. [121] y J. Meng et al. [122], los acelerómetros instalados permitirán estudiar el comportamiento de la estructura en función del desplazamiento de las frecuencias de vibración a lo largo del tiempo. Gracias a la metodología desarrollada, un análisis espectral de las señales registradas por los acelerómetros en ubicaciones específicas y durante intervalos de tiempo prolongados nos permitirá determinar un hipotético desplazamiento de las frecuencias más relevantes. Esto es posible, por ejemplo, comparando las frecuencias obtenidas en diferentes intervalos de tiempo para un mismo movimiento. Si las frecuencias medidas en dos intervalos de tiempo son más bajas que en una primera medición, esto indicaría que la estructura es más flexible y, por lo tanto, existe un desajuste mecánico. Por otro lado, si las frecuencias de vibración se mantienen constantes, esto significa que la estructura se mantiene rígida y no sufre desajustes.

En este mismo sentido, con el FEM del telescopio ya validado, es posible simular y obtener la respuesta vibratoria del mismo frente a las acciones de los diversos actuadores (motores) que proporcionan movimiento al telescopio. Por ejemplo, la rampa de aceleración y deceleración de los motores va a estar asociada a un par de aceleración y de frenado que excitarán la estructura y por lo tanto vibrará. En el FEM del telescopio se puede definir ese par acelerador o de frenado, que es variable a lo largo del tiempo, y determinar también la respuesta vibratoria del telescopio a lo largo del tiempo. Esa señal vibratoria determinada mediante simulación puede ser tratada mediante FFT y ver si excita, o no, las frecuencias resonantes del telescopio. Estos espectros se podrían comparar con los medidos experimentalmente en las maniobras de arranque y parada. Este análisis podría emplearse para "predecir" una posible interacción de los actuadores sobre el telescopio, evitando problemas de resonancia.

Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos del desplazamiento que la vibración puede causar en la CCD, se podría implementar un algoritmo en el procesado de las imágenes que tenga en cuenta tanto el

intervalo de tiempo como el desplazamiento del error producido. El objetivo sería mejorar la calidad de la imagen de tal forma que, el fotón capturado fuera de la zona subpíxel pueda ser cuantificado para estimar el error producido y compensar la imagen con la posición del píxel.

Durante la realización de la tesis, se realizaron medidas de vibración en la instrumentación JPCam en el telescopio JST250 del OAJ. Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron acelerómetros con tecnología Fabry-Perot de fibra óptica con el fin de evitar interferencias con la instrumentación causadas por campos electromagnéticos. El interrogador se conectó a la instalación de comunicaciones del OAJ de la misma forma que se hizo con el sistema de adquisición instalado en el JAST80, tal y como se muestra en la Figura 10.1. La descarga de datos se realizó *offline* a través de la interfaz de programación de aplicaciones (API, *Application Programming Interfaces*) proporcionada por el fabricante o de forma *online* con la aplicación API's de Matlab.

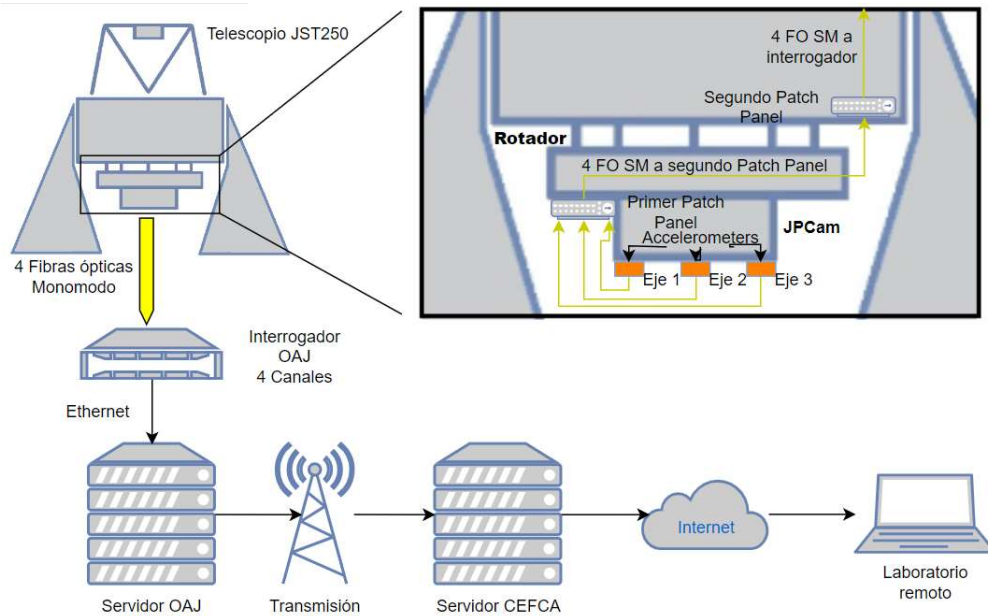


Figura 10.1. Instalación para la adquisición de datos vía telemática hasta el laboratorio remoto.

En relación a la JPCam, se llevó a cabo la instalación de un conjunto de acelerómetros triaxiales, acompañados de un compensador de temperatura necesario para contrarrestar las desviaciones causadas por cambios de temperatura en los acelerómetros, tal como se muestra en la Figura 10.2.

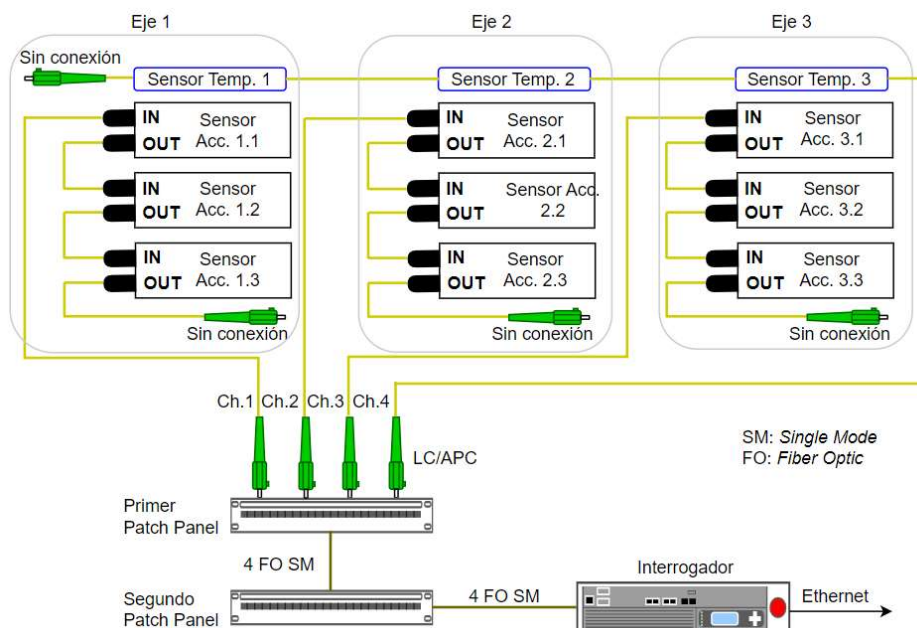


Figura 10.2. Conexión del circuito de fibra óptica desde los sensores hasta el interrogador y la salida de datos vía Ethernet.

El montaje mecánico se fijó al chasis de la JPCam utilizando tornillos. Los acelerómetros estaban ubicados alrededor de la base de la JPCam, a una separación de 120° entre ellos, con el propósito de medir la aceleración en dirección tangencial, radial y en el eje Z, como se muestra en la Figura 10.3.

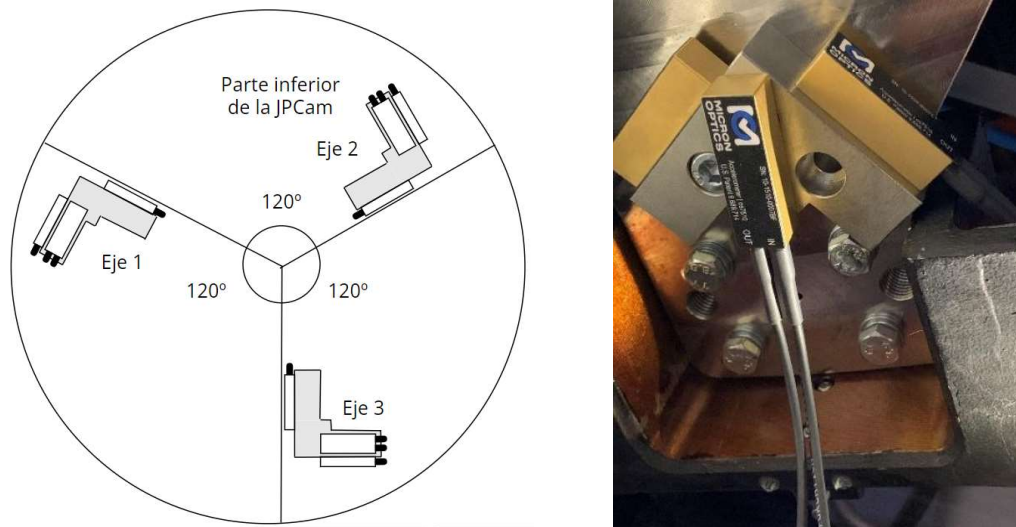


Figura 10.3. A la izquierda representación de los ejes triaxiales bajo la JPCam. A la derecha montaje mecánico.

Del montaje realizado, se llevó a cabo un estudio de la vibración que afectaba a la instrumentación con el fin de investigar su origen. Sin embargo, los resultados obtenidos no revelaron frecuencias destacadas, lo que nos llevaron a abandonar esta línea de investigación. No obstante, dado que se trata de una estructura de gran tamaño, queda abierta como línea de investigación la posibilidad de estudiar la atenuación de la vibración mediante la absorción del pilar y la montura, así como otros estudios relacionados con la vibración en la línea de X. Tian et al. [19].

Bibliografía

Bibliografía

- [1] S. François, P. Galvín, P. Museros, G. Lombaert, y G. Degrande, «Dynamic soil–structure interaction analysis of a telescope at the Javalambre Astrophysical Observatory», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 65, pp. 165-180, oct. 2014, doi: 10.1016/j.soildyn.2014.06.014.
- [2] G. Palacios-Navarro, F. Arranz, R. Martín, y P. Ramos, «Compensation Techniques Aimed at Mitigating Vibrations in Optical Ground-Based Telescopes: A Systematic Review», *Sensors*, vol. 21, n.º 11, p. 3613, ene. 2021, doi: 10.3390/s21113613.
- [3] Y. Lammen, A. Reinacher, B. Greiner, J. Wagner, y A. Krabbe, «Increasing the SOFIA Secondary Mirror Mechanism’s Fast Steering Capability by Identification of a Structural Resonance and Its Subsequent Elimination Through Mass Re-Distribution», *Journal of Astronomical Instrumentation*, vol. 7, n.º 4, p. 1840001, dic. 2018, doi: 10.1142/S2251171718400019.
- [4] F. Arranz, J. Abad, P. Ramos, S. Bielsa, A. Yanes-Díaz, y G. Palacios-Navarro, «On Identifying Natural Frequencies in the JAST80 Telescope and Validation With a Simplified 3-D Model», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-13, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3246530.
- [5] F. Arranz, R. Martín, G. Palacios-Navarro, y P. Ramos, «Study on the Vibration Characteristics of the Telescope T80 in the Javalambre Astrophysical Observatory (JAO) Aimed at Detecting Invalid Images», *Sensors*, vol. 20, n.º 22, p. 6523, ene. 2020, doi: 10.3390/s20226523.
- [6] D. Thomas, J. Meyers, y S. M. Kahn, «Improving Astronomy Image Quality Through Real-Time Wavefront Estimation», en *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021, pp. 2076-2085.
- [7] T. Bauer, «Super-Resolution Imaging: The Use Case of Optical Astronomy», en *Proceedings of the IADIS International Conference Computer Graphics, Visualization, Computer Vision and Image Processing*, Roma, jul. 2011, pp. 49-59.
- [8] E. G. P. O’Connor, A. Shearer, y K. O’Brien, «Energy-sensitive detectors for astronomy: Past, present and future», *New Astronomy Reviews*, vol. 87, p. 101526, dic. 2019, doi: 10.1016/j.newar.2020.101526.
- [9] V. A. Pimpalkhute, R. Page, A. Kothari, K. M. Bhurchandi, y V. M. Kamble, «Digital Image Noise Estimation Using DWT Coefficients», *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 30, pp. 1962-1972, 2021, doi: 10.1109/TIP.2021.3049961.
- [10] G. Ramesh, J. Logeshwaran, J. Gowri, y A. Mathew, «The management and reduction of digital noise in video image processing by using transmission based noise elimination scheme», *ICTACT Journal on Image and Video Processing*, vol. 13, pp. 2797-2801, nov. 2022, doi: 10.21917/ijivp.2022.0398.
- [11] M. A. Di Cesare, «Calibración espectrofotométrica del GTC», Tesis, Universidad de La Laguna, 2009.
- [12] D. Adams *et al.*, «Management of equipment vibration for extremely large telescopes», *JATIS*, vol. 8, n.º 2, p. 021512, jun. 2022, doi: 10.1117/1.JATIS.8.2.021512.
- [13] X. Yin, G. Song, y Y. Liu, «Vibration Suppression of Wind/Traffic/Bridge Coupled System Using Multiple Pounding Tuned Mass Dampers (MPTMD)», *Sensors*, vol. 19, n.º 5, p. 1133, ene. 2019, doi: 10.3390/s19051133.
- [14] S. Al-Subaihawi, C. Kolay, T. Marullo, J. M. Ricles, y S. E. Quiel, «Assessment of wind-induced vibration mitigation in a tall building with damped outriggers using real-time hybrid simulations», *Engineering Structures*, vol. 205, p. 110044, feb. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.110044.
- [15] W. Zhai, G. Kouroussis, Y. Wang, K. Wang, K. Lan, y F. Xu, «Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel», *Science of The Total Environment*, vol. 668, pp. 485-499, jun. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.397.
- [16] B. Wu, X. Chen, Q. Wang, H. Liao, y J. Dong, «Characterization of vibration amplitude of nonlinear bridge flutter from section model test to full bridge estimation», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 197, p. 104048, feb. 2020, doi: 10.1016/j.jweia.2019.104048.
- [17] A. M. Abdel-Ghaffar y R. H. Scanlan, «Ambient Vibration Studies of Golden Gate Bridge: I. Suspended Structure», *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 111, n.º 4, pp. 463-482, abr. 1985, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:4(463).
- [18] S. Chapain y A. M. Aly, «Vibration attenuation in high-rise buildings to achieve system-level performance under multiple hazards», *Engineering Structures*, vol. 197, p. 109352, oct. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109352.
- [19] X. Tian, Z. Song, y J. Wang, «Study on the propagation law of tunnel blasting vibration in stratum and blasting vibration reduction technology», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 126, p.

- 105813, nov. 2019, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105813.
- [20] N. Choi y J. E. Harvey, «Image degradation due to surface scatter in the presence of aberrations», *Applied Optics*, vol. 51, n.º 5, pp. 535-546, feb. 2012, doi: 10.1364/AO.51.000535.
- [21] C. Qin, Z. Xu, M. Xia, S. He, y J. Zhang, «Design and optimization of the micro-vibration isolation system for large space telescope», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 482, p. 115461, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115461.
- [22] O. Guyon, «Extreme Adaptive Optics», *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 56, n.º 1, pp. 315-355, dic. 2018, doi: 10.1146/annurev-astro-081817-052000.
- [23] T. D. Groff y N. J. Kasdin, «Kalman filtering techniques for focal plane electric field estimation», *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 30, n.º 1, pp. 128-139, ene. 2013, doi: 10.1364/JOSAA.30.000128.
- [24] C. Trigona, B. Andò, y S. Baglio, «Measurements and Analysis of Induced Vibrations in Optical Telescopes», en *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, mar. 2018, pp. 1476-1480. doi: 10.1109/SSD.2018.8570593.
- [25] B. García-Lorenzo y J. J. Fuensalida, «Atmospheric optical turbulence at the Roque de los Muchachos Observatory: data base and recalibration of the generalized SCIDAR data», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 416, n.º 3, pp. 2123-2129, sep. 2011, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19186.x.
- [26] D. L. Fried, «Statistics of a Geometric Representation of Wavefront Distortion», *Journal of the Optical Society of America*, vol. 55, n.º 11, pp. 1427-1435, nov. 1965, doi: 10.1364/JOSA.55.001427.
- [27] A. N. Kolmogorov, V. Levin, J. C. R. Hunt, O. M. Phillips, y D. Williams, «The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers», *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, vol. 434, n.º 1890, pp. 9-13, ene. 1997, doi: 10.1098/rspa.1991.0075.
- [28] P. Zhang, W. Gong, X. Shen, y S. Han, «Correlated imaging through atmospheric turbulence», *Physical Review A*, vol. 82, n.º 3, p. 033817, sep. 2010, doi: 10.1103/PhysRevA.82.033817.
- [29] D. A. Hope, S. M. Jefferies, M. Hart, y J. G. Nagy, «High-resolution speckle imaging through strong atmospheric turbulence», *Optics express*, vol. 24, n.º 11, pp. 12116-12129, may 2016, doi: 10.1364/OE.24.012116.
- [30] A. W. M. van Eekeren, K. Schutte, J. Dijk, P. B. W. Schwering, M. van Iersel, y N. J. Doelman, «Turbulence compensation: an overview», *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIII*, vol. 8355, pp. 224-233, may 2012, doi: 10.1117/12.918544.
- [31] A. Tomàs *et al.*, «The design and development of the M2, M3 and M5 cells for the European Extremely Large Telescope», en *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V*, SPIE, ago. 2022, pp. 177-200. doi: 10.1117/12.2629427.
- [32] D. G. MacMynowski, G. Z. Angeli, K. Vogiatzis, J. Fitzsimmons, y S. Padin, «Parametric modeling and control of telescope wind-induced vibration», *Modeling and Systems Engineering for Astronomy*, vol. 5497, pp. 266-277, sep. 2004, doi: 10.1117/12.552282.
- [33] S. Hagelin, E. Masciadri, y F. Lascaux, «Wind speed vertical distribution at Mt Graham», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 407, n.º 4, pp. 2230-2240, oct. 2010, doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17102.x.
- [34] S. Tichkule y A. Muschinski, «Effects of wind-driven telescope vibrations on measurements of turbulent angle-of-arrival fluctuations», *Applied Optics*, vol. 53, n.º 21, pp. 4651-4660, jul. 2014, doi: 10.1364/AO.53.004651.
- [35] A. Eff-Darwich, B. García-Lorenzo, J. A. Rodríguez-Losada, J. de la Nuez, L. E. Hernández-Gutiérrez, y M. C. Romero-Ruiz, «Comparative analysis of the impact of geological activity on the structural design of telescope facilities in the Canary Islands, Hawaii and Chile», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 407, n.º 3, pp. 1361-1375, sep. 2010, doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16925.x.
- [36] J. P. Wolf y C. Song, «Some cornerstones of dynamic soil-structure interaction», *Engineering Structures*, vol. 24, n.º 1, pp. 13-28, ene. 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(01)00082-7.
- [37] J. Lozi *et al.*, «Characterizing Vibrations at the Subaru Telescope for the Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics instrument», *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, vol. 4, n.º 4, pp. 1-26, sep. 2018, doi: 10.1117/1.JATIS.4.4.049001.
- [38] M. Hartung *et al.*, «On-sky vibration environment for the Gemini Planet Imager and mitigation effort», en *Adaptive Optics Systems IV*, SPIE, ago. 2014, pp. 202-213. doi: 10.1117/12.2057200.
- [39] B. Macintosh *et al.*, «The Gemini Planet Imager», en *Advances in Adaptive Optics II*, SPIE, jun. 2006,

- pp. 177-188. doi: 10.1117/12.672430.
- [40] D. G. MacMartin y H. A. Thompson, «Vibration budget for observatory equipment», *JATIS*, vol. 1, n.º 3, p. 034005, sep. 2015, doi: 10.1117/1.JATIS.1.3.034005.
- [41] C. G. Gordon, «Generic vibration criteria for vibration-sensitive equipment», en *Optomechanical Engineering and Vibration Control*, SPIE, sep. 1999, pp. 22-33. doi: 10.1117/12.363802.
- [42] T. Stalcup y K. Powell, «Image motion correction using accelerometers at the MMT Observatory», en *Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation*, jul. 2008, pp. 523-533. doi: 10.1117/12.790113.
- [43] A. Keck, J.-U. Pott, y O. Sawodny, «Accelerometer-based position reconstruction for the feedforward compensation of fast telescope vibrations in the E-ELT/MICADO», en *Ground-based and Airborne Telescopes V*, SPIE, jul. 2014, pp. 1569-1577. doi: 10.1117/12.2053769.
- [44] S. Chueca *et al.*, «Curvature wavefront sensing performance simulations for active correction of the Javalambre wide-field telescopes», en *Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation II*, International Society for Optics and Photonics, sep. 2012, p. 84500I. doi: 10.1117/12.925429.
- [45] E. Fedrigo, R. Muradore, y D. Zilio, «High performance adaptive optics system with fine tip/tilt control», *Control Engineering Practice*, vol. 17, n.º 1, pp. 122-135, ene. 2009, doi: 10.1016/j.conengprac.2008.05.015.
- [46] S. Esposito *et al.*, «Large Binocular Telescope Adaptive Optics System: new achievements and perspectives in adaptive optics», en *Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications IV*, SPIE, sep. 2011, pp. 11-20. doi: 10.1117/12.898641.
- [47] P. Y. Madec, «Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy», en *Adaptive Optics Systems III*, sep. 2012, p. 844705. doi: 10.1117/12.924892.
- [48] A. Sinn, S. Schachner, T. Riel, C. Schwaer, y G. Schitter, «Feed-forward vibration compensation for small telescopes», en *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V*, SPIE, ago. 2022, pp. 1169-1175. doi: 10.1117/12.2626965.
- [49] M. Johns *et al.*, «Giant Magellan Telescope: overview», en *Ground-based and Airborne Telescopes IV*, SPIE, sep. 2012, pp. 526-541. doi: 10.1117/12.926716.
- [50] L. R. Graves, G. A. Smith, D. Apai, y D. W. Kim, «Precision Optics Manufacturing and Control for Next-Generation Large Telescopes», *Nanomanuf Metrol*, vol. 2, n.º 2, pp. 65-90, jun. 2019, doi: 10.1007/s41871-019-00038-2.
- [51] T. Tang, B. Qi, y T. Yang, «Youla-Kucera Parameterization-Based Optimally Closed-Loop Control for Tip-Tilt Compensation», *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, n.º 15, pp. 6154-6160, ago. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2846817.
- [52] T. Tang, S. Xu Niu, T. Yang, B. Qi, y Q. Liang Bao, «Vibration rejection of Tip-Tilt mirror using improved repetitive control», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 116, pp. 432-442, feb. 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.06.060.
- [53] C. Kulcsár *et al.*, «Vibrations in AO control: a short analysis of on-sky data around the world», en *Adaptive Optics Systems III*, International Society for Optics and Photonics, sep. 2012, p. 84471C. doi: 10.1117/12.925984.
- [54] G. Agapito, F. Quirós-Pacheco, P. Tesi, A. Riccardi, y S. Esposito, «Observer-Based Control Techniques for the LBT Adaptive Optics under Telescope Vibrations», *European Journal of Control*, vol. 17, n.º 3, pp. 316-326, ene. 2011, doi: 10.3166/ejc.17.316-326.
- [55] M. Böhm, J.-U. Pott, O. Sawodny, T. Herbst, y M. Kürster, «Real-time vibration compensation for large telescopes», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 442, n.º 3, pp. 2446-2455, ago. 2014, doi: 10.1093/mnras/stu1012.
- [56] T. Tang, S. Niu, X. Chen, y B. Qi, «Disturbance Observer-Based Control of Tip-Tilt Mirror for Mitigating Telescope Vibrations», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, n.º 8, pp. 2785-2791, ago. 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2869437.
- [57] R. Muradore, L. Pettazzi, R. Clare, y E. Fedrigo, «An application of adaptive techniques to vibration rejection in adaptive optics systems», *Control Engineering Practice*, vol. 32, pp. 87-95, nov. 2014, doi: 10.1016/j.conengprac.2014.07.003.
- [58] S. Niu, T. Yang, T. Tang, T. Xu, Y. Ruan, y Q. Bao, «Wideband Vibrations Rejection of Tip-Tilt Mirror Using Error-Based Disturbance Observer», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 5131-5138, dic. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2962808.
- [59] T. Tang, S. Xu Niu, T. Yang, y B. Qi, «Suppressions of vibration in the Tip-Tilt mirror control system by add-on controller», *ISA Transactions*, vol. 102, pp. 245-250, jul. 2020, doi:

- 10.1016/j.isatra.2020.02.032.
- [60] S. Altarac *et al.*, «Effect of telescope vibrations upon high angular resolution imaging», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 322, n.º 1, pp. 141-148, mar. 2001, doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04111.x.
- [61] N. I. Tomio Kanzawa, Daigo Tomono, Tomonori Usuda, Naruhisa Takato, Satoru Negishi, Shinji Sugahara, «Improvement of the pointing accuracy of the Subaru Telescope by suppressing vibrations», en *Ground-based and Airborne Telescopes*, I. S. for O. and Photonics, Ed., 2006, p. 62673J.
- [62] A. Keck, J.-U. Pott, y O. Sawodny, «Accelerometer-based online reconstruction of vibrations in extremely large telescopes», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, n.º 3, pp. 7467-7473, ene. 2014, doi: 10.3182/20140824-6-ZA-1003.00265.
- [63] T. Durand-Texte, M. Melon, E. Simonetto, S. Durand, y M.-H. Moulet, «Single-camera single-axis vision method applied to measure vibrations», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 465, p. 115012, ene. 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2019.115012.
- [64] T. Yoshino, Y. Sano, D. Ota, K. Fujita, y T. Ikui, «Fiber-Bragg-Grating Based Single Axial Mode Fabry-Perot Interferometer and Its Strain and Acceleration Sensing Applications», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, n.º 9, pp. 2241-2250, may 2016, doi: 10.1109/JLT.2016.2521440.
- [65] W. R. McBride II y D. R. McBride, «Using frequency response functions to manage image degradation from equipment vibration in the Daniel K. Inouye Solar Telescope», *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VII*, vol. 9911, pp. 383-402, ago. 2016, doi: 10.1117/12.2234316.
- [66] N. Razzaq, S. A. A. Sheikh, M. Salman, y T. Zaidi, «An Intelligent Adaptive Filter for Elimination of Power Line Interference From High Resolution Electrocardiogram», *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1676-1688, mar. 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2548362.
- [67] M. Tomasini, S. Benatti, B. Milosevic, E. Farella, y L. Benini, «Power Line Interference Removal for High-Quality Continuous Biosignal Monitoring With Low-Power Wearable Devices», *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n.º 10, pp. 3887-3895, may 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2536363.
- [68] X. Huang *et al.*, «Sensor Configuration and Algorithms for Power-Line Interference Suppression in Low Field Nuclear Magnetic Resonance», *Sensors*, vol. 19, n.º 16, p. 3566, ene. 2019, doi: 10.3390/s19163566.
- [69] E. White *et al.*, «Green Bank Telescope: Overview and analysis of metrology systems and pointing performance», *Astronomy & Astrophysics*, vol. 659, p. A113, mar. 2022, doi: 10.1051/0004-6361/202141936.
- [70] V. B. Khaikin, A. Y. Shikhovtsev, A. P. Mironov, y X. Qian, «A study of the astroclimate in the Dagestan mountains Agul region and at the Ali Observatory in Tibet as possible locations for the Eurasian SubMM Telescopes (ESMT)», en *Proceedings of The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2022 — PoS(MUTO2022)*, SISSA Medialab, dic. 2022, p. 72. doi: 10.22323/1.425.0072.
- [71] J. Hearnshaw, «Light Pollution as a Risk for Astronomical Research and How to Manage It», en *Risk Management in Outer Space Activities: An Australian and New Zealand Perspective*, Singapore: Springer Nature, 2022, pp. 177-220. doi: 10.1007/978-981-16-4756-7_7.
- [72] T. Rimmele *et al.*, «The National Science Foundation's Daniel K. Inouye Solar Telescope: status and first results», en *Ground-based and Airborne Telescopes IX*, SPIE, ago. 2022, pp. 353-364. doi: 10.1117/12.2644469.
- [73] A. Ederoclte *et al.*, «Commissioning and Science Verification of JAST/T80», pp. 640-645, mar. 2017.
- [74] A. Marín-Franch, «Observatorio Astrofísico De Javalambre: A Dedicated Facility For Large Sky Surveys», p. 3, oct. 2017, doi: 10.5281/zenodo.1036776.
- [75] R. Luis-Simoes *et al.*, «Technical scientific developments at the OAJ», en *Highlights of Spanish Astrophysics VIII*, Proceedings of the XI Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society, may 2015, pp. 869-869.
- [76] A. J. Cenarro *et al.*, «The Observatorio Astrofísico de Javalambre: current status, developments, operations, and strategies», en *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems V*, International Society for Optics and Photonics, ago. 2014, p. 91491I. doi: 10.1117/12.2055455.
- [77] A. Yanes-Díaz *et al.*, «The Observatorio Astrofísico de Javalambre: engineering for empowering observatory operations», en *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII*, International Society for Optics and Photonics, jul. 2018, p. 1070421. doi: 10.1117/12.2313208.
- [78] A. Yanes-Díaz *et al.*, «Software and cyber-infrastructure development to control the Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ)», en *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy III*, International Society for Optics and Photonics, jul. 2014, p. 915215. doi: 10.1117/12.2054944.

- [79] U. Brauneck, R. Sprengard, S. Bourquin, y A. Marín-Franch, «A dense grid of narrow bandpass steep edge filters for the JST/T250 telescope: summary of results», en *Astronomical Optics: Design, Manufacture, and Test of Space and Ground Systems*, SPIE, sep. 2017, pp. 313-325. doi: 10.1117/12.2272424.
- [80] A. J. Cenarro *et al.*, «Commissioning and first scientific operations of the wide-field 2.6m Javalambre Survey Telescope», en *Ground-based and Airborne Telescopes VII*, SPIE, jul. 2018, pp. 93-109. doi: 10.1117/12.2309520.
- [81] H. Vázquez Ramió *et al.*, «Status of the commissioning of the JPAS-Pathfinder camera at JST/T250 at the Observatorio Astrofísico de Javalambre», pp. 587-592, mar. 2019.
- [82] R. Parada, S. Rueda-Teruel, y C. Monzo, «Local Seeing Measurement for Increasing Astrophysical Observatory Quality Images Using an Autonomous Wireless Sensor Network», *Sensors*, vol. 20, n.º 13, p. 3792, ene. 2020, doi: 10.3390/s20133792.
- [83] «(OAJ) · 44421 Arcos de las Salinas, Teruel», (OAJ) · 44421 Arcos de las Salinas, Teruel. Accedido: 18 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.google.es/maps/place/\(OAJ\)/@40.0393714,-1.0464746,11z/data=!4m5!3m4!1s0xd5e1c61244f3f07:0xb1df30e46a63f0b0!8m2!3d40.0420189!4d-1.0160831](https://www.google.es/maps/place/(OAJ)/@40.0393714,-1.0464746,11z/data=!4m5!3m4!1s0xd5e1c61244f3f07:0xb1df30e46a63f0b0!8m2!3d40.0420189!4d-1.0160831)
- [84] «Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón». Accedido: 18 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.cefca.es/>
- [85] «Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares (ICTS) | Ciencia - Ministerio de Ciencia e Innovación (es)». Accedido: 18 de mayo de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.ciencia.gob.es/portal/site/MICINN/ICTS>
- [86] J. M. Cubas y J. C. G. Puerta, *Astronomía y desarrollo rural: II Universidad de Verano de Aras de los Olmos Ciencia y Desarrollo Rural*. Universitat de València, 2020.
- [87] D. Cristóbal-Hornillos *et al.*, «J-PAS data management pipeline and archiving», en *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy II*, International Society for Optics and Photonics, sep. 2012, p. 845116. doi: 10.1117/12.925431.
- [88] D. Cristóbal-Hornillos *et al.*, «Data management pipeline and hardware facilities for J-PAS and J-PLUS surveys archiving and processing», en *Software and Cyberinfrastructure for Astronomy III*, International Society for Optics and Photonics, jul. 2014, p. 915200. doi: 10.1117/12.2055387.
- [89] D. Cristóbal-Hornillos *et al.*, «Hardware and software facilities for the J-PAS and J-PLUS surveys archiving, processing and data publication», en *Highlights of Spanish Astrophysics VIII*, may 2015, pp. 798-803.
- [90] N. Benitez *et al.*, «J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey», mar. 2014, doi: 10.48550/arXiv.1403.5237.
- [91] A. J. Cenarro *et al.*, «J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey», *A&A*, vol. 622, p. A176, feb. 2019, doi: 10.1051/0004-6361/201833036.
- [92] A. V. Smith Castelli *et al.*, «The Fornax Cluster through S-PLUS», *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, vol. 62, pp. 180-182, jul. 2021, doi: 10.48550/arXiv.2104.07524.
- [93] C. Mendes de Oliveira *et al.*, «The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 489, n.º 1, pp. 241-267, oct. 2019, doi: 10.1093/mnras/stz1985.
- [94] M. Postman *et al.*, «The cluster lensing and supernova survey with Hubble: an overview.», *ApJS*, vol. 199, n.º 2, p. 25, mar. 2012, doi: 10.1088/0067-0049/199/2/25.
- [95] M. Moles *et al.*, «The Alhambra survey: A large area multimediu-band optical and near-infrared photometric survey», *The Astronomical Journal*, vol. 136, n.º 3, pp. 1325-1339, ago. 2008, doi: 10.1088/0004-6256/136/3/1325.
- [96] O. Ilbert *et al.*, «Cosmos photometric redshifts with 30-bands for 2-deg²», *The Astrophysical Journal*, vol. 690, n.º 2, pp. 1236-1249, dic. 2008, doi: 10.1088/0004-637X/690/2/1236.
- [97] S. Reichel, U. Brauneck, S. Bourquin, y A. Marín-Franch, «Narrow bandpass steep edge optical filter for the JAST/T80 telescope instrumentation», en *UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts VI*, SPIE, sep. 2013, pp. 169-180. doi: 10.1117/12.2023667.
- [98] J. M. Beckers, «Adaptive Optics for Astronomy: Principles, Performance, and Applications», *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 31, n.º 1, pp. 13-62, 1993, doi: 10.1146/annurev.aa.31.090193.000305.
- [99] R. Donnerstein y D. Zaritsky, «The Southern Photometric Local Universe Survey (S-PLUS): improved SEDs, morphologies, and redshifts with 12 optical filters», *Monthly Notices of the Royal Astronomical*

- Society*, vol. 489, pp. 241-267, ago. 2019, doi: 10.1093/mnras/stz1985.
- [100] J. P. and O. S. A. Keck, «Accelerometer-based online reconstruction of vibrations from delayed measurements», en *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2015, pp. 424-429. doi: 10.1109/CCA.2015.7320666.
- [101] D. Gabor, «Theory of communication. Part 1: The analysis of information», *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, vol. 93, n.º 26, pp. 429-441, nov. 1946, doi: 10.1049/ji-3-2.1946.0074.
- [102] X. Li *et al.*, «A New Mechanical Resonance Suppression Method for Large Optical Telescope by Using Nonlinear Active Disturbance Rejection Control», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 94400-94414, jun. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928050.
- [103] F. Zhao, P. Wang, Y. Gong, L. Zhang, C. Meng, y J. Lin, «Numerical simulation of airflow in a 2m telescope», en *4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes*, SPIE, may 2009, pp. 123-128. doi: 10.1117/12.831445.
- [104] V. P. Smekalin, V. N. Fedoseyev, Yu. I. Shanin, y D. A. Yagnyatinskiy, «Finite Element Analysis of the Structural Mechanics of the Telescope Objective for the Lira-B Space Experiment», *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, vol. 55, n.º 5, pp. 525-534, sep. 2019, doi: 10.3103/S8756699019050170.
- [105] P. Gatkine y B. Kumar, «Dynamical modeling and resonance frequency analysis of 3.6 m optical telescope pier», vol. 3, n.º 1, pp. 1-10, abr. 2014.
- [106] M. S. Worthington, N. T. Mollison, I. M. Soukup, J. J. Zierer, J. M. Good, y S. P. Nichols, «Design and analysis of the tracker bridge for the Hobby-Eberly Telescope wide field upgrade», en *Ground-based and Airborne Telescopes III*, SPIE, ago. 2010, pp. 1414-1425. doi: 10.1117/12.857090.
- [107] J. Sebag *et al.*, «LSST telescope modeling overview», en *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy VII*, SPIE, ago. 2016, pp. 883-891. doi: 10.1117/12.2233178.
- [108] A. Ranjbar *et al.*, «Conceptual design of a fast-slewing mount for the New Robotic Telescope», en *Ground-based and Airborne Telescopes VIII*, SPIE, dic. 2020, pp. 975-985. doi: 10.1117/12.2561320.
- [109] K. Fujita y N. Kuramoto, «Finite-Element Simulation of Effect of Surface Roughness of Coaxial Cylindrical Electrodes on Small Mass and Force Measurements Using Voltage Balance Apparatus», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-6, abr. 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3165249.
- [110] B. N. Parlett y D. S. Scott, «The Lanczos algorithm with selective orthogonalization», *Math. Comp.*, vol. 33, n.º 145, pp. 217-238, 1979, doi: 10.1090/S0025-5718-1979-0514820-3.
- [111] D. Giagopoulos, A. Arailopoulos, V. Dertimanis, C. Papadimitriou, E. Chatzi, y K. Grompanopoulos, «Structural health monitoring and fatigue damage estimation using vibration measurements and finite element model updating», *Structural Health Monitoring*, vol. 18, n.º 4, pp. 1189-1206, jul. 2019, doi: 10.1177/1475921718790188.
- [112] P. Langer, C. Jelic, C. Guist, A. Peplow, y S. Marburg, «Simplification of Complex Structural Dynamic Models: A Case Study Related to a Cantilever Beam and a Large Mass Attachment», *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 12, p. 5428, jun. 2021, doi: 10.3390/app11125428.
- [113] A. Thakur, A. G. Banerjee, y S. K. Gupta, «A survey of CAD model simplification techniques for physics-based simulation applications», *Computer-Aided Design*, vol. 41, n.º 2, pp. 65-80, feb. 2009, doi: 10.1016/j.cad.2008.11.009.
- [114] K. S. Lim, M. K. A. Zaini, Z.-C. Ong, F. Z. M. Abas, M. A. B. M. Salim, y H. Ahmad, «Vibration Mode Analysis for a Suspension Bridge by Using Low-Frequency Cantilever-Based FBG Accelerometer Array», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-8, ago. 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3018578.
- [115] J. Wu, X. Zhang, y B. Li, «A study on vibration component separation of a rotor system during startup and its application in fault diagnosis», *Measurement Science and Technology*, vol. 30, n.º 9, p. 095104, jul. 2019, doi: 10.1088/1361-6501/ab199c.
- [116] P. Romano y M. Paolone, «Enhanced Interpolated-DFT for Synchrophasor Estimation in FPGAs: Theory, Implementation, and Validation of a PMU Prototype», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, n.º 12, pp. 2824-2836, dic. 2014, doi: 10.1109/TIM.2014.2321463.
- [117] D. Belega y D. Petri, «Accuracy Analysis of the Multicycle Synchrophasor Estimator Provided by the Interpolated DFT Algorithm», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, n.º 5, pp. 942-953, may 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2236777.
- [118] G. White, *Introducción al análisis de vibraciones*. Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima, 2010.
- [119] K. Taylor *et al.*, «Jpcam: a 1.2 gpixel camera for the j-pas survey», *Journal of Astronomical*

-
- Instrumentation*, vol. 3, n.º 1, p. 1350010, ene. 2014, doi: 10.1142/S2251171713500104.
- [120] P. M. Thompson, D. G. MacMartin, H. A. Thompson, y M. J. Sirota, «Minimizing motor cogging and vibration for the Thirty Meter Telescope», en *2017 IEEE Aerospace Conference*, mar. 2017, pp. 1-15. doi: 10.1109/AERO.2017.7943747.
- [121] R. Guo, Y. Wang, H. Zhang, y G. Zhang, «Remaining Useful Life Prediction for Rolling Bearings Using EMD-RISI-LSTM», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-12, ene. 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3051717.
- [122] J. Meng, C. Yan, G. Chen, Y. Liu, y L. Wu, «Health Indicator of Bearing Constructed by rms-CUMSUM and GRRMD-CUMSUM With Multifeatures of Envelope Spectrum», *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-16, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3054000.

Anexo



Anexo I. Banco de pruebas

Los experimentos realizados se clasifican como se indican a continuación. El primer grupo corresponde a movimientos de los actuadores en AR y DEC. Los experimentos pueden ser de un único actuador o de varios actuadores consecutivamente.

Experimentos en AR y DEC

Prueba 1

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	0°	10240 m/s	60 s	Se incluye movimiento de cúpula
DEC	40°	0°			

Prueba 2

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento a posición de Parking => AR = 0, D = 40
DEC	0°	40°			

Prueba 3

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	90°	10240 m/s	60 s	Se monitoriza error y se para el telescopio.
DEC	40°	40°			

Prueba 4

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	40°	10240 m/s	60 s	Se monitoriza error y se para el telescopio.
DEC	40°	40°			

Prueba 5

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	-40°	10240 m/s	60 s	
DEC	40°	40°			

Prueba 6

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	40°	10240 m/s	60 s	
DEC	80°	80°			

Prueba 7

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	40°	90°	10240 m/s	60 s	
DEC	80°	80°			

Prueba 8					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	90°	0°	10240 m/s	60 s	
DEC	80°	80°			

Prueba 9					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento a posición de Parking => AR = 0, D = 40.
DEC	80°	40°			

Prueba 10					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	40°	10240 m/s	60 s	
DEC	40°	40°			

Prueba 11					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	40°	0°	10240 m/s	60 s	
DEC	40°	40°			

Prueba 12					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	90°	10240 m/s	60 s	Se monitoriza error y se para el telescopio.
DEC	40°	40°			

Prueba 13					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	90°	0°	10240 m/s	60 s	
DEC	40°	40°			

Prueba 14					
Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	0°	265°	10240 m/s	60 s	Movimiento con ángulo de giro horario. Se monitoriza error y se para el telescopio. Movimiento de AR falla mientras el movimiento DEC continua. Se pulsa seta de emergencia. Punto de activación de la seta de emergencia: AR: 42' 48.7 "
DEC	40°	140°			

Prueba 15

Eje	Movimiento		F_m	Duración	Observaciones
	Inicio	Fin			
AR	42' 48.7 "	0°	10240 m/s	60 s	
DEC	107° 13' 28.47"	40°			

El siguiente grupo de experimentos está centrado en la FSU cuando las bandejas de filtros se mueven para su posición. Para ello el telescopio se mantiene en una posición fija de parking y los actuadores realizan diferentes movimientos en sus dos bandejas de filtros.

Movimientos en la FSU**Prueba 16**

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento de la bandeja de filtros J0202. De OPEN => 395 nm (1/7 de vuelta)
DEC	40°			

Prueba 17

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento de la bandeja de filtros J0202. De 395 n => 348 nm (3/7 de vuelta)
DEC	40°			

Prueba 18

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento de la bandeja de filtros J0202. De 348 nm => OPEN (3/7 de vuelta)
DEC	40°			

Prueba 19

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento de la bandeja de filtros J0201. De OPEN => 430 nm (3/7 de vuelta)
DEC	40°			

Prueba 20

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento de las dos bandejas de filtro J0201 y J0202. (A 348 nm)
DEC	40°			

La FSU contiene el obturador de la instrumentación, éste permite abrir y cerrar la cámara para recibir luz.

Movimientos del obturador**Prueba 21**

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento del obturador.
DEC	40°			

La siguiente prueba consistió en combinar los movimientos de los experimentos 1 y 10.

Pruebas 1 y 10 simultáneamente**Prueba 22**

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento combinado de pruebas 1 y 10.
DEC	40°			

El espejo primario, por sus características está orientado para recibir el haz de luz, pero de la misma forma recibe del exterior proyecciones en forma de agua de lluvia, polvo en suspensión, viento. Para evitar que las inclemencias exteriores puedan afectar a la calidad del pulido del espejo y preservarlo de cualquier agente, se dispone de una cobertura retráctil denominada cortina de espejo. Para su uso es necesario un actuador que la pueda poner de forma automática. Se realizan experimentos de apertura y cierre.

Movimiento de la cortina del espejo.

Prueba 23

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	60 s	Movimiento del mirror cover. De cerrado a abierto. No se graba completo en 60".
DEC	40°			

Prueba 24

Eje	Posición	F_m	Duración	Observaciones
AR	0°	10240 m/s	120 s	Movimiento del mirror cover. Movimiento de abierto a cerrado.
DEC	40°			

La óptica activa del espejo M2 tiene un hexápodo descrito en 4.4.2. Se realizan movimientos de los actuadores.

Movimiento del hexápodo.

Prueba 25

Eje	F_m	Duración	Observaciones
AR	10240 m/s	120 s	Mover hacia arriba del eje Y a Y+.
DEC			

Prueba 26

Eje	F_m	Duración	Observaciones
AR	10240 m/s	60 s	Mover hacia derecha del eje X a X+.
DEC			